

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA
Coordenação

A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA

COORDENAÇÃO

A GEOLOGIA DE ENGENHARIA E OS RECURSOS GEOLÓGICOS

GEOLOGIA DE ENGENHARIA

VOLUME I



Coimbra • Imprensa da Universidade

COORDENAÇÃO EDITORIAL
Imprensa da Universidade de Coimbra

CONCEPÇÃO GRÁFICA
António Barros

PAGINAÇÃO
Victor Hugo Fernandes

EXECUÇÃO GRÁFICA
G.C. – Gráfica de Coimbra, Lda.

ILUSTRAÇÃO DA CAPA
Pedreira de Morais - Gralhós
Foto: © Martim Portugal V. Ferreira, 1997

ISBN
972-8704-14-3
DEPÓSITO LEGAL
203510/03

© 2003, IMPRENSA DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

OBRA PUBLICADA COM O PATROCÍNIO DE:
Fundação para a Ciência e a Tecnologia
EDP Produção
Fundação Calouste Gulbenkian
Associação Portuguesa de Geólogos
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

ÍNDICE

VOLUME I

APRESENTAÇÃO	9
• JAZIGOS PORTUGUESES DE MINÉRIOS DE URÂNIO E SUA GÉNESE	15
Professor Doutor João Manuel Cotelo Neiva <i>(urânio, filões, mineralização epitermal, fluidos de solidificação granítica, água meteórica)</i>	
TRABALHOS DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA	77
GEOLOGIA DO AMBIENTE E URBANA	
• MULTI-SCALE GEOMETRICAL ANALYSIS OF FRACTURE NETWORKS IN GRANITE MASSIFS AND ITS APPLICATION TO LANDFILL SITE SELECTION	79
António Mateus, Mário Abel Gonçalves, Fernando O. Marques e Fernando Monteiro Santos <i>(fracture networks, multi-scale analysis, fractal geometry, granite massifs, waste disposal, landfill)</i>	
• INCIDÊNCIAS AMBIENTAIS ASSOCIADAS À INSTALAÇÃO DE CEMITÉRIOS: ABORDAGEM HIDROGEOLÓGICA	93
A. Lima, J. Pamplona, S. Antunes e J. C. Gonçalves <i>(impacto ambiental, cemitério, contaminação, hidrogeologia, água subterrânea)</i>	
• MONITORIZAÇÃO DO ATERRO MULTIMUNICIPAL DO CENTRO, COIMBRA.....	107
F. P. O. Figueiredo, N. E. V. Rodrigues e A. I. S. Andrade <i>(aterro sanitário, monitorização, método eléctrico de resistividade e dispositivos tripotenciais)</i>	
• AS MINERALIZAÇÕES DE URÂNIO E A RADIO-ACTIVIDADE NATURAL EM PORTUGAL: FACTORES GEOLÓGICOS CONDICIONANTES E IMPLICAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO	121
A. J. S. C. Pereira, L. J. P. F. Neves, M. M. Godinho e J. M. M. Dias <i>(mineralizações de U, radioactividade natural, ordenamento, Portugal)</i>	
CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA REGIONAL E URBANA	
• AS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS E O COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS TERRENOS NO BAIRRO DA BICA, LISBOA.....	133
I. Moitinho de Almeida, J. Lopo Mendonça, M. Oliveira da Silva, G. Barbosa de Almeida e C. Fonseca <i>(Lisboa, Miocénico, hidrogeologia urbana, problemas geotécnicos)</i>	

- ANÁLISE DE PROBLEMAS DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA EM ZONAS DIAPÍRICAS: OS CASOS DE BELO HORIZONTE, SANTA CLARA E MORRO DO LENA (LEIRIA) 145
Cláudia Amado, Anabela Veiga, Mário Quinta Ferreira e José Velho
(*Geologia de engenharia, diapiros, ensaios, solos e rochas*)
- ESTUDOS GEOTÉCNICOS NO CAMPUS DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA 157
M. A. Chaves, J. A. Rodrigues Carvalho, P. C. Lamas e A. P. Silva
(*estudos geotécnicos, estudo de sítios, prospecção e ensaios, fundações*)
- PLANTA GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE ALQUEVA 171
J. Neves, F. Ferreira e L. Gonçalves
(*Alqueva, fundação da barragem, planta geológica-geotécnica*)
- CONTRIBUIÇÃO DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA NO EMPREENDIMENTO DE VENDA NOVA II 185
Nadir Plasencia e Celso Lima
(*reconhecimento de superfície, prospecção, classificação do maciço, sustimento, monitorização*)
- GEOLOGIA DE ENGENHARIA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS 199
Nadir Plasencia
(*geoengenharia, geologia de engenharia, túneis urbanos, túneis não urbanos*)
- RECONHECIMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DO CANAL HIDROELÉCTRICO DO CONTADOR (REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE) 211
Paulo H. Alves
(*deslizamento, escorregamento, São Tomé, geologia, geotecnia, riscos naturais*)

MECÂNICA DE SOLOS E ROCHAS

- APLICAÇÃO DO MODELO HIPERBÓLICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO RESIDUAL GRANÍTICO 227
Luís José Andrade Pais
(*solo residual, estruturação, modelo hiperbólico*)
- CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA AOS LIXIVIADOS CORRELACIONÁVEL COM PROPRIEDADES FÍSICAS DE SOLOS FINOS PORTUGUESES. SEU INTERESSE NA CONSTRUÇÃO DE BARREIRAS DE CONFINAMENTO 237
A. J. Roque
(*aterros de resíduos, barreiras de confinamento, correlação linear, condutividade hidráulica, propriedades geotécnicas, solos finos portugueses*)
- AVALIAÇÃO DA ESCAVABILIDADE DE UMA FUNDAÇÃO NO GRÊS DE SILVES, COM BASE NAS VELOCIDADES SÍSMICAS 251
Mário Quinta Ferreira e Fernando Pedro Figueiredo
(*velocidades sísmicas, escavabilidade, geologia de engenharia*)
- GRANITOS ORNAMENTAIS DO NORDESTE DE PORTUGAL – INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO 263
L. M. O. Sousa
(*granito, rocha ornamental, propriedades físico-mecânicas, fissuração, meteorização*)

DECAIMENTO DE ROCHAS E AGREGADOS

• EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO SALINA EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	275
C. A. Simões Alves, A. S. Gonçalves Antunes e J. M. S. Matias (contaminação salina, deterioração, materiais de construção)	
• IDENTIFICAÇÃO DE PRODUTOS DE REACÇÕES INTERNAS EM BETÃO	287
I. Fernandes e F. Noronha (reacção, álcalis-agregado, exsudações, gel, etringite)	
• AS PEDREIRAS DO POIO (FOZ CÔA) – A REGIÃO E O TURISMO	299
L. M. Ferreira Gomes e P. Gabriel de Almeida (pedreira, Foz-Côa, xisto ardósífero, construção civil, aspectos turísticos, ambiente)	
• GEORRECURSOS AMBIENTAIS DA PENÍNSULA DE SETÚBAL: UM PROCESSO PARTICIPADO DE ESTUDO E CLASSIFICAÇÃO DE PATRIMÓNIO GEOLÓGICO	317
J. C. Kullberg, P. S. Caetano, R. B. Rocha e M. S. Rocha (georrecurso, património geológico, Setúbal, ciência viva)	
• CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES LÍTICAS CARBONATADAS NA REGIÃO DE COIMBRA	333
A. Oliveira Tavares (unidades líticas, rochas carbonatadas, caracterização in situ, propriedades físicas, instabilidade)	
• CARACTERIZAÇÃO DE UM ESCORREGAMENTO PLANAR NUM TALUDE ENTRE A PONTE 25 DE ABRIL E A TRAFARIA (ALMADA).....	345
P. Cunha Lamas e J. A. Rodrigues-Carvalho (taludes de Almada, escorregamento planar, mecanismo de rotura, retroanálise)	
• EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TALUDES NATURAIS E DE ESCAVAÇÃO	355
António Luís de Almeida Saraiva e Pedro Gomes Cabral Santarém Andrade (taludes, instabilidade, classificação, caracterização)	
• SLOPE BEHAVIOUR IN HIGHWAYS: A DECADE OF DETERIORATION IN METAMORPHIC ROCKS WITH VOLCANO-SEDIMENTARY ORIGIN ALONG THE IP4 (NE PORTUGAL).....	367
A. A. Sá, M. Portugal Ferreira e C. C. Pires (taludes artificiais, estabilidade, deterioração, factores, unidades vulcano-sedimentares, detritos)	
ÍNDICES REMISSIVOS	377
PALAVRAS CHAVE	379
AUTORES	381

VOLUME II

TRABALHOS DE RECURSOS GEOLÓGICOS	9
--	---

MINEROGRAFIA E MINERAÇÃO

• A UTILIZAÇÃO DA MICROSCOPIA DE MINÉRIOS, SEU DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO	11
O. C. Gaspar (microscopia de minérios, história, metalogenia, mineralurgia)	
• DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA MINERAÇÃO METÁLICA EM PORTUGAL: REALIDADE OU UTOPIA?.....	25
L. M. Plácido Martins (minérios metálicos, prospecção, exploração)	

GEOQUÍMICA, MINERALOGIA E GEOLOGIA DE DISTRITOS METALÍFEROS

- ISOTOPIC CONSTRAINTS ON THE CLASSIFICATION OF THE JALES AU DISTRICT (NORTHERN PORTUGAL)..... 31
D. R. N. Rosa e S. B. Romberger
(*gold, Variscan, intrusion-related, Portugal*)
- O CAMPO MINEIRO DE PENEDONO (VISEU, PORTUGAL). TRABALHOS DE PROSPECÇÃO E ESTADO ACTUAL DO CONHECIMENTO DO POTENCIAL DAS MINERALIZAÇÕES 45
J. M. Castelo Branco
(*trabalhos de prospecção, mineralização aurífera, corredores de cisalhamento, deformação, alteração hidrotermal*)
- O JAZIGO DA FACUCA REVISITADO 59
F. Noronha, A. Dória e J. M. Farinha Ramos
(*facuca, chumbo, mineralogia, fluidos, pós-hercínico*)
- GEOQUÍMICA DE VOLFRAMITES PORTUGUESAS 73
A. M. R. Neiva
(*volframite, zonamento, nióbio, ferberite, hubnerite, Portugal*)
- ANÁLISE PARAGENÉTICA E CLASSIFICAÇÃO DOS PEGMATITOS GRANÍTICOS DA CINTURA HERCÍNICA CENTRO-IBÉRICA 85
C. Leal Gomes e J. Lopes Nunes
(*cintura pegmatítica, pegmatito, aplito, estado paragenético, limiar químico-mineralógico, intrusão, fraccionação*)
- ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS EM MINERAIS DA UNIDADE DE JASPES E CARBONATOS DA MINA DE NEVES CORVO 111
A. Moura
(*jaspes, fluidos, Neves Corvo*)
- OS FILÕES DE QUARTZO COM W-Au-Sb DA REGIÃO DE SARZEDAS - CASTELO BRANCO 123
P. C. S. Carvalho e A. M. R. Neiva
(*filões de quartzo, volframite, ouro, sulfuretos, Sarzedas*)
- LITOGEOQUÍMICA NA ÁREA DE SARZEDAS (CASTELO BRANCO). CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE OCORRÊNCIAS DE OURO 135
J. M. Santos Oliveira
(*litogeoquímica, ouro, metassedimentos, prospecção mineira, Portugal*)
- CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DE MINERAIS DE JAZIGOS DA REGIÃO DE SEGURA (CASTELO BRANCO)..... 157
I. M. H. R. Antunes, A. M. R. Neiva e M. M. V. G. Silva
(*mineralizações de Sn-W, Ba-Pb-Zn, granitos, Segura*)
- 6 • MINERALIZAÇÕES DE GALENAS EM PORTUGAL; COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA DO CHUMBO 169
J. Medina, C. Tassinari, M. E. R. Martins, K. Kawashita, M. R. Azevedo, J. F. Santos, J. M. Pessoa, B. Valle-Aguado e M. S. Pinto
(*galenas, Portugal, isótopos de chumbo, espectrómetro de massa de ionização térmica (TIMS)*)
- GEOQUÍMICA DOS MINERAIS PORTADORES DE URÂNIO DA MINA DE VALE DE ABRUTIGA, CENTRO DE PORTUGAL 179
M. M. S. C. Pinto, M. M. V. G. Silva e A. M. R. Neiva
(*mineralização de urânio, fosfatos secundários de urânio, Portugal*)

GEMAS

- EVOLUÇÃO DA BACIA DO CONGO E AS UNIDADES DIAMANTÍFERAS EM ANGOLA 193
B. Reis, E. Pereira e J. Rodrigues
(*bacia do Congo, abertura do Atlântico, intrusões quimberlíticas, depósitos sedimentares diamantíferos*)
- CONTRIBUTO DA DIAMANG PARA A AVALIAÇÃO DOS RECURSOS DIAMANTÍFEROS, EM ANGOLA 205
Bernardo Reis e A. Monforte
(*Diamang, problemática das prospeções, jazigos detriticos e primários, conglomerado Calonda, quimberlito, reservas*)
- O PAPEL DOS FENÓMENOS DE EVOLUÇÃO TARDIA NA GÊNESE DE GEMAS PEGMATÍTICAS - ILAÇÕES DA ANÁLISE PARAGENÉTICA EM PEGMATITOS LCT DO ALTO LIGONHA (MOÇAMBIQUE) 217
C. Leal Gomes
(*pegmatito, LCT, NYF, unidades tardias, gema*)

RECURSOS HÍDRICOS E GEOTÉRMICOS

- GEOCHEMICAL STUDIES AS SUPPORT OF GEOTHERMICS 229
L. A. Aires-Barros e J. M. Marques
(*geothermics, geochemistry, isotopes, water/rock interaction*)
- CARACTERIZAÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS DO MACIÇO CRISTALINO DO NORTE DE PORTUGAL: IMPLICAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO REGIONAL 245
J. M. Carvalho, H. I. Chaminé e N. Plasencia
(*planos de bacia hidrográfica, recursos hídricos subterrâneos, maciço antigo, norte de Portugal*)
- RECURSOS HÍDRICOS EM PEQUENOS DOMÍNIOS INSULARES: O CASO DA ILHA DAS FLORES, AÇORES 265
J. M. M. Azevedo e M. R. Portugal Ferreira
(*ilha, hidrogeologia, aquífero, exurgência, captação-exploração*)
- TERMAS DE CHAVES: I – AS BASES TECTÓNICAS E LITOESTRATIGRÁFICAS PARA A MODELAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DO SISTEMA HIDROTHERMAL 277
M. Portugal Ferreira, A. Sousa Oliveira e A. N. Trota
(*águas minerais, geotermia, aquíferos, recarga, descarga, célula hidrotermal, tectónica*)

INERTES, ROCHAS ORNAMENTAIS E MINERAIS INDUSTRIAIS

- POTENCIALIDADES DOS MACIÇOS GRANÍTICOS DO DISTRITO DA GUARDA PARA A PRODUÇÃO DE INERTES E PEDRA ORNAMENTAL 295
J. M. Farinha Ramos, A. Moreira, M. R. Leite, L. Gomes e S. Spínola
(*maciços graníticos, inertes, granitos ornamentais, distrito da Guarda*)
- MODELAÇÃO ESTOCÁSTICA DA COMPARTIMENTAÇÃO DOS MÁRMORES NA UNIDADE DE BORBA 309
J. A. Almeida, C. Vintém, A. G. Luís e M. Lopes
(*exploração de mármore, densidade linear de fracturação, simulação estocástica, zonamento de reservas, modelação da incerteza*)
- ESTUDO GEOLÓGICO DA PEDREIRA DA CURVIÃ Nº2 (JOANE-V.N. DE FAMALICÃO). CARACTERÍSTICAS DA FRACTURAÇÃO 323
J. M. Farinha Ramos, A. Casal Moura, A. Moreira e A. Oliveira
(*maciço granítico, padrão de fracturação, pedreira de inertes*)

• EXPLORAÇÕES DE SERPENTINITO, TALCO E ASBESTO TREMOLÍTICO NO NORDESTE DE PORTUGAL	335
R. J. S. Teixeira, A. M. R. Neiva e M. E. P. Gomes <i>(serpentinito, talco, asbestos anfibólicos, maciços de Bragança e Morais)</i>	
• MINERAIS INDUSTRIAIS: SITUAÇÃO ACTUAL EM PORTUGAL DAS ARGILAS COMERCIAIS	349
C. de Sousa Figueiredo Gomes <i>(argilas comuns e especiais, argilas comerciais, geologia, propriedades, aplicações industriais, produções, mercados)</i>	
• POTENCIALIDADES DAS AREIAS CARBONATADAS BIOGÉNICAS DO PORTO SANTO PARA APLICAÇÕES EM GEOMEDICINA	367
C. de Sousa Figueiredo Gomes e J. B. Pereira Silva <i>(areias carbonatadas biogénicas, propriedades térmicas e químicas, geomedicina)</i>	
• HOW MINERALS ARE IMPORTANT FOR HUMAN HEALTH	379
C. de Sousa Figueiredo Gomes <i>(clay, sand, rock salt, spring water, human health, geomedicine)</i>	
• ESTUDO DA PRÁTICA ANCESTRAL ROMANA DE INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE TIJOLO PARA ARGAMASSAS COM PRESA HIDRÁULICA	391
A. L. Velosa, J. Coroado, M. R. Veiga e F. Rocha <i>(argamassas, incorporação de resíduos, período romano)</i>	
TRABALHOS DE EDUCAÇÃO EM GEOLOGIA	403
• O PORQUÊ DA SEDIMENTOLOGIA	405
G. Soares de Carvalho <i>(sedimentologia, análise dimensional, diagramas de Friedman, areia de praia e duna, areias vermelhas de Maputo)</i>	
• HISTÓRIAS COM ÁGUA E PEDRAS. NEM SEMPRE MOLE, NEM SEMPRE DURAS.....	419
J. Delgado Rodrigues <i>(reparação obras hidrogeotécnicas, alteração de rochas xistosas, preservação de arte rupestre, preservação contra a submersão)</i>	
• CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE: O LUGAR DA GEOLOGIA, O PAPEL DO PROFESSOR	437
A. Soares de Andrade e Luís Marques	
• OS ECLOGITOS DA REGIÃO DE BRAGANÇA-VINHAIS: DOS FACTOS AOS MODELOS	449
M. L. Ribeiro e A. Ribeiro <i>(eclogitos, metamorfismo de alta pressão, geodinâmica, Terreno Ibérico)</i>	
• MALACOLOGIA DOS GRÉS COSTEIROS DE MOÇAMBIQUE	457
A. Reis Moura <i>(malacologia, fóssil, Grés costeiro, Moçambique)</i>	
• UTILIZAÇÃO DE MODELOS SOBRE VULCANISMO E SISMOLOGIA NO ENSINO DA GEOLOGIA. ANÁLISE DE UM CASO DE APLICAÇÃO	477
Mário Quinta Ferreira, Eunice M. Viegas Santos e Teresa I. G. Mota Mela <i>(geologia, ensino, modelos, vulcanismo, sismologia)</i>	
ÍNDICES REMISSIVOS	489
PALAVRAS CHAVE	491
AUTORES	493

APRESENTAÇÃO

Queremos acreditar que, no quadro geral da sociedade, se valoriza o trabalho e o sucesso na pesquisa do conhecimento sobre as concepções integradoras das diversidades dos sistemas, sobre os recursos que de imediato ou potencialmente são disponíveis, sobre a melhoria dos métodos, técnicas e equipamentos que permitem a diminuição das incertezas, ou o incremento da produtividade. Temos como certo que, no curto prazo, o crédito da ciência e da tecnologia em o valor do conhecimento acrescentado, dos benefícios que transfere para a melhoria da qualidade de vida dos cidadãos. Por isso, os resultados directos e as implicações dos trabalhos científicos e tecnológicos tem de ser divulgados.

O crédito concedido à ciência e tecnologia colhe também o benefício da afirmação pessoal e profissional daqueles que a praticam com talento e que tem uma personalidade que facilita a transmissão e a criação da receptividade para os seus ensinamentos, pareceres e pronúncias. É confortante assumir, com toda a profundidade, que a afirmação da importância e da necessidade do conhecimento científico passa pela valorização e homenagem aos méritos dos cientistas e técnicos que se destacam pela sua obra. E a forma mais ajustada para homenagear o cientista de referência será, porventura, a de os elementos da sua própria comunidade lhe dedicarem o trabalho das suas pesquisas dentro das áreas em que ele mais se distinguiu. Regressa ao autor que se homenageia o capital de ciência que dele se recebeu, com o acréscimo que cada um lhe deu. É este o espírito em que se alicerça esta homenagem que prestamos, em 21 e 22 de Novembro de 2003, ao Professor Doutor João Manuel Coteló Neiva.

Vai felizmente longa a sua vida científica e de consultoria técnica dedicada à geologia de uma maneira geral, mas em particular à Geologia de Engenharia e aos Recursos Geológicos.

Teve e mantém brilhante e prolongada vida profissional. Expressou-se, desde cedo, numa fulgurante carreira universitária, iniciada na Universidade do Porto, em 1939, e continuada, a partir de 1949, na Universidade de Coimbra e nas instituições com a tutela da investigação e estruturação universitária. Ganhou o reconhecimento em prolongado exercício de consultoria técnica dedicada à Geologia de Engenharia e dos Recursos Geológicos, na orientação profissional dentro da Direcção Geral de Geologia e Minas, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

e da EDP. O perfil do Professor complementa-se na autoria de publicações científicas e acrescenta-se nas intervenções do participante em muitas dezenas de reuniões científicas.

O seu legado científico é, seguramente, uma referência para quem é, ou venha a ser, profissional dentro da educação, da investigação e da tecnologia nas múltiplas áreas da geologia em que se distinguiu.

Vai neste sentido o programa articulado para esta homenagem, e que se pretende seja também um contributo para o desenvolvimento e divulgação da ciência e tecnologia. Assim, foi considerado que deveria haver duas áreas de elegibilidade circunscritas aos campos mais afins aos da sua vasta intervenção profissional e um outro, aberto para os temas da formação e das suas intervenções mais alargadas.

No âmbito da Geologia de Engenharia há necessariamente uma parcimoniosa visibilidade, sob a forma de divulgação para a comunidade científica, pela própria natureza dos trabalhos de consultoria empresarial. O seu C.V. dá a expressiva notícia de que estudou, desde há meio século, numerosos casos na área das fundações de barragens e albufeiras, das terraplenagens e pedraplenagens e dos seus materiais, de túneis, de fundações para rodovias e ferrovias, da estabilidade de vertentes e taludes, da alteração dos materiais de construção.

A sua versatilidade foi uma vez enfatizada pelo meu saudoso aluno e depois colega Doutor Bernardo de Sousa com a expressão que aqui recordo “cumpre-me realçar a habilidade e perspicácia com que o Doutor Cotelo Neiva faz a ligação da Geologia, como ciência pura, com a Geologia Aplicada, num desejável e louvável serviço à Comunidade. Nesse campo é, sem dúvida, um dos mais conceituados geólogos portugueses no domínio da Geologia Económica. Com o seu trabalho e autoridade científica e profissional, contribuiu para impor a dignificação da função de geólogo em Portugal”.

Os vinte e três estudos aqui apresentados dentro da Geologia de Engenharia, no Volume I, podem ser sistematizados dentro das áreas da geologia urbana e do ambiente, da caracterização geotécnica regional e urbana, da mecânica de solos e das rochas, do decaimento de rochas e agregados, do comportamento mecânico dos maciços rochosos. Através deles é possível ter uma visão perspectivada sobre as solicitações externas e as preocupações e capacidades institucionais instaladas nas áreas da cartografia e prospecção, caracterização, dimensionamento, projecto, equipamentos, construção, sustimento, monitorização de obras subterrâneas e a céu aberto. Grande foi o percurso percorrido, muitas são as preocupações acrescentadas, quantas novas técnicas foram aprendidas, desenvolvidas e aplicadas pelos geólogos portugueses nestes últimos trinta anos, dentro da Geologia de Engenharia. Em diversos casos, não se vê a fronteira para a Engenharia.

O tema dos Recursos Geológicos teria de ser escolhido por ir de feição com os elementos mais substantivos da investigação e produção científica do geólogo-precursor que cada autor teve como referência.

É forçoso recordar que o Professor Doutor Coteló Neiva estudou diversos aspectos da morfologia, mineralogia e paragénese, geoquímica, origem e evolução dos jazigos pegmatíticos e hidrotermais filiados na granitização hercínica, pelo que também viveu, por dentro, as febres da volframite e da schelite e conheceu profundamente o Norte e o Centro de Portugal; depois, dirigiu e fez a cartografia geológica do Maciço de Bragança, com os seus metalotectos dos jazigos de cromite e platinóides, de que descreveu as morfologias, os minérios e as petrografias encaixantes. Por esse tempo, fazer geologia de jazigos dentro de rochas ultramáficas, nesse quase desconhecido maciço do Nordeste transmontano, só tinha o benefício de estarem disponíveis as cortas, as galerias, os poços e as frentes consequentes da intensa actividade mineira. Tudo o mais eram as dificuldades de uma ruralidade escassamente ligada ao exterior e quase sem rede viária, os enganosos paradigmas geológicos e ausência de conhecimentos de suporte. Porque se vivia então, em Portugal, “a terceira idade do ferro”, muitos foram os trabalhos que realizou sobre os jazigos de Fe-Mn de Trás-os-Montes, do Alentejo e de Goa, sempre perspectivados para o conhecimento das paragénese, da génese, das reservas e da explorabilidade. Conhecemos a apetência que demonstrava para as mineralizações de urânio, então partilhada por uma notável galeria de mineiros-geólogos e engenheiros. Manteve-se sempre dentro do quadro de referência em que as relações morfológicas dentro das associações mineralógicas e a geoquímica mineralógica são determinantes para esclarecer a génese e condicionar a exploração.

Acrescem os estudos, com perfil essencialmente técnico, sobre pedreiras de inertes e rochas ornamentais, depósitos argilosos e de minerais e rochas industriais e até algumas incursões sobre as águas minerais. Esta perspectiva clarifica o espectro das suas vivências dentro dos Recursos Geológicos.

O Serviço de Fomento Mineiro, de que foi grande impulsionador e colaborador regular durante duas décadas, foi criado quando ele se iniciava como professor na Universidade do Porto. Relevam as dissertações que, apenas com o apoio de uma licenciatura generalista, de dois curtos estágios técnicos e da base logística e laboratorial da Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, elaborou para o Doutoramento (1944) e para o concurso ao lugar de Professor Extraordinário (1948). Uma e outra incidiram na área dos jazigos minerais metálicos.

Os cinquenta e cinco autores de estudos dedicados aos Recursos Geológicos e que dão consistência ao II Volume desta obra trazem consigo algumas das muitas perspectivas possíveis dentro desta diversificada área das Ciências da Terra.

Depois de dois estudos no âmbito das técnicas e desenvolvimentos da minerografia e do futuro possível para a mineração em Portugal, apresentam-se doze situações casuísticas em que se descrevem e interpretam depósitos metalíferos maioritariamente enquadráveis em metalotectos graníticos e estruturas hercínicas, que geralmente estão perspectivados para a descrição e interpretação dos seus cortejos mineralógicos e das correlativas assinaturas geoquímicas, até à escala dos

isótopos; em menos casos, as perspectivas são mais tectonicistas e regionalizáveis. O quadro genético das mineralizações metalíferas vê-se ampliado para novos episódios temporais, dentro do Paleozóico inferior e alpinos precoces e intermédios, e para processos de remobilização e concentrações progressivas que alargam os horizontes da estrita granitização-recristalização-estruturação hercínica.

Em três outros trabalhos, faz-se a apresentação de alguns “santuários” dos recursos muito nobres de Angola – com os seus jazigos primários e secundários de diamantes, e de Moçambique – aqui com a modelação para a génese das gemas dos pegmatitos do Alto Ligonha.

As contribuições no âmbito dos recursos hídricos e geotérmicos constituem um retorno para o geólogo que começou por se interessar pela hidroquímica e desde sempre fez projectos para que a água percorra bons caminhos, seja armazenada em locais seguros e não se esco para o mar sem que dela se colham grandes valias.

Os oito estudos em que se reportam e interpretam algumas das diversidades dos recursos não metálicos, suas naturezas e propriedades intrínsecas, seus depósitos e usos são significativa amostragem sobre a presente e a futura importância dos recursos geológicos, até mesmo no campo dos novos materiais e da novas tecnologias.

No balanço destes cinquenta estudos encontram-se desde as pronúncias de investigadores muito experientes até às primeiras produções científicas de jovens que encontram esta porta aberta. Para todos, e muito particularmente para os jovens, deixamos uma expressão que encontramos nos Estatutos Pombalinos da Universidade de Coimbra e que saudavelmente se recorda nesta homenagem ao Professor Doutor João Manuel Coteló Neiva – “Que se animem os demais com estes sinais honoríficos a se fazerem cada vez mais beneméritos e dignos de poderem chegar ao mesmo ponto de louvor e de honra”.

Quando se considerou que esta obra deveria ter um terceiro tema sobre a Formação em Geologia, teve-se em atenção o perfil do Professor de muitas gerações, em diversas licenciaturas, e estudioso de muitos saberes. Entre 1941 e 1987, exerceu a docência em cadeiras de diversas licenciaturas, que cobrem o espaço desde a Cristalografia até Geologia de Engenharia, e, mesmo depois da sua jubilação, ensinou, ao nível da pós-graduação, na FEUP e na FMUC. Uma nota brevíssima para recordar que no seu curso livre de Geologia Aplicada, criado e mantido regularmente na década de 1950, há as raízes de numerosos geólogos e engenheiros que fizeram a vida dentro da Geotecnia.

Importa registar algumas das suas intervenções universitárias relevantes, para além da longa prática de ensino universitário, que nunca interrompeu mesmo enquanto foi Reitor, e das muitas responsabilidades e trabalhos inerentes à gestão universitária ao nível da Direcção do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico e dos seus Núcleos de Investigação, da Direcção da Faculdade de Ciências, do Conselho Superior do Instituto de Alta Cultura e do seus sucessos na Reitoria da Universidade. Saliento, porque a conheço bem, a excelência do que fez para a

construção do plano curricular da Licenciatura em Geologia, na reforma de 1963-64, e para a consolidação da revolução da educação architectada e implementada por Veiga Simão, e que tão bem frutificou na Universidade.

As perspectivas do desenvolvimento laboratorial no campo da mineralogia, petrologia e geoquímica como instrumentos indispensáveis para a geologia dos recursos metalíferos e não metalíferos e a percepção sobre a necessidade do intercâmbio científico, nomeadamente através das revistas de especialidade, já marcavam o jovem professor que chegou à Universidade de Coimbra com 32 anos. Vinha ocupar a cátedra que por muitas décadas fora de um outro Mestre na vida universitária e na solidariedade cívica, e que para todos os seus discípulos que eu conheci e para muitos de nós é inesquecível — o Doutor Anselmo Ferraz de Carvalho. O Professor Doutor Custódio de Morais, que foi o seu gentil e sereno anfitrião, ocupava então a cátedra da Petrologia.

A Universidade do Porto, que desde os seus tempos de Academia Politécnica, ao longo de mais de um século, aqui viera à procura de Mestres, pagava em metal sonante. O Professor disponível, ágil, persistente, dotado de inesgotável capacidade de trabalho, de intuitiva percepção das prioridades e das soluções mais avisadas e de fluente capacidade de comunicação trazia consigo as perspectivas da Ciência Aplicada, antecipando as da Ciência e Tecnologia. A sabedoria foi-se-lhe acrescentando com o trabalho e a reflexão sobre as boas e más experiências da vida.

A leitura dos trabalhos que lhe são dedicados fora dos dois temas restritos têm o sólido timbre dos seus autores e cada um deles recorda uma vertente específica da abertura do Professor para o mundo do conhecimento. Desde o Porquê da Sedimentologia, na pergunta – resposta formulada por um dos pioneiros da Geologia de Portugal, até um ensaio didáctico sobre dois temas, sismologia e vulcanismo, que assustam e encantam dentro da Geologia, passando pelas “Histórias com água e com pedras” contadas por quem conhece bem as patologias que a água provoca no património arquitectónico, ou pela reflexão sobre a Sociedade, a Geologia e o Professor, ou ainda pela incursão dentro dos eclogitos que o Professor Doutor Coteló Neiva redescobriu em Bragança, e ainda pela escrita de um naturalista e artista sobre a malacologia fóssil em Moçambique. São importantes estes testemunhos sobre a ciência.

Saudamos os cento e quarenta e um autores dos cinquenta e sete estudos aqui publicados. Agradecemos aos membros do Conselho Científico o aconselhamento dispensado a esta edição.

A concretização deste testemunho de homenagem e, em particular, a publicação dos três volumes agora editados só foi possível porque beneficiámos dos apoios da Câmara Municipal de Alijó, da Associação Portuguesa de Geólogos, da EDP, da Fundação para a Ciência e Tecnologia, da Fundação Calouste Gulbenkian, da Faculdade de Ciências e Tecnologia, da Imprensa da Universidade de Coimbra.

Aos seus presidentes devemos o bom e eficaz acolhimento. Cumpre reconhecer e agradecer.

Porque estão a nosso lado muitos amigos do Professor Doutor João Manuel Coteló Neiva, esta obra científica que lhe é dedicada antecipa a homenagem nacional com que é distinguido.

A handwritten signature in black ink, written in a cursive style. The signature appears to read 'Martim R. Portugal Vasconcelos Ferreira'. Below the signature is a horizontal line.

Prof. Doutor Martim R. Portugal Vasconcelos Ferreira

JAZIGOS PORTUGUESES DE MINÉRIOS DE URÂNIO E SUA GÉNESE

J. M. COTELO NEIVA ¹

PALAVRAS CHAVE: urânio, filões, mineralização epitermal, fluidos de solidificação granítica, água meteórica

KEY WORDS: uranium, veins, epithermal mineralization, granitic solidification fluids, meteoric water

RESUMO

Os jazigos de urânio localizam-se nas Beiras e NNE do Alentejo, relacionados com os granitos uraníferos variscos que cortam. Caracterizados os tipos de jazigos, refere-se a sua distribuição em relação com a morfologia e geologia das duas regiões. Estudadas as paragénese minerais primárias de variados jazigos, reconheceu-se que a epitermal uranífera se sobrepõe frequentemente à mesotermal dos jazigos de sulfuretos e, por vezes, à hipotermal dos jazigos de cassiterite e volframite. Os metassomatismos sobrepõem-se, também, nas rochas encaixantes. Foi estudado com maior pormenor o metassomatismo do granito produzido quando da génese dos filões de quartzo e de quartzo-jaspe com minérios de urânio. Com base na geoquímica, no carácter epitermal e na localização dos jazigos e na geologia regional estabeleceu-se um esquema genético a partir de mistura dos fluidos libertados quando da solidificação do granito e de água meteórica infiltrada, em apreciável quantidade, ao longo de extensas e profundas falhas variscas, hoje flancos da Serra da Estrela, que iria dissolvendo o urânio da uraninite (\pm monazite) deste granito. Por ascensão dessa mistura e outras subseqüentes formaram-se, em fracturas e falhas, muitas coincidentes com jazigos de sulfuretos e outras com jazigos de cassiterite e volframite, concentrações epitermais de pecheblenda e de outros

¹ Professor Catedrático Jubilado da Universidade de Coimbra

minerais a partir de soluções algumas delas coloidais. Quando da intrusão de filões de rochas básicas, no Triássico Superior, terá havido nova mobilização de minerais uraníferos do granito e da mineralização uranífera. Outra hipótese genética é semelhante à das fontes termais, havendo, também, possibilidade desta.

ABSTRACT: Portuguese uranium deposits and their genesis

The uranium deposits are located in Beiras and NNE of Alentejo. They are related to uranium-bearing Variscan granites that they intruded. The different types of uranium deposits are characterized. Their distributions are related to the morphology and geology of both areas. Primary mineral paragenesis of several uranium deposits were studied. Commonly epithermal uranium mineralization overlap mesothermal sulphide deposits and some of the hypothermal cassiterite and wolframite deposits. Their metasomatic effects on country rocks also overlap. The granite metasomatism due to the fluids of uranium quartz and jasper-quartz veins was studied in more detail than the others. A genetic model was defined based on the geochemistry, epithermal characteristics of uranium mineralization, location of these deposits and regional geology. Fluids released during the granite solidification mixed with significant amount of meteoric water descending through long and deep Variscan faults of Serra da Estrela. These fluids dissolved uranium from the granite uraninite (\pm monazite). The U-bearing fluids ascended along fractures and faults, most of them in sulphide deposits and some in cassiterite and wolframite deposits, and originated epithermal pitchblende and other minerals from solutions, some of them being colloidal. When the Upper Triassic veins of basic rocks intruded, new mobilization of uranium minerals from granite and uranium mineralization took place. The other genetic hypothesis is similar to that form thermal springs.

INTRÓITO

16

Relacionado com actividades hidrotermais graníticas, tive ocasião de estudar jazigos de cassiterite e wolframite (NEIVA, 1944, 1972), de ouro (NEIVA, 1945, *et al.*, 1990) e de sulfuretos (NEIVA, 1951). Embora houvesse estudado jazigos uraníferos, ficava-me a impressão pouco clara da sua génese e de que em todas as mais variadas hipóteses genéticas havia um fundo de verdade (NEIVA, 1995).

Desde 1953 procurei, a pouco e pouco, ir estudando a paragénesis epitermal dos minerais primários dos mais variados jazigos uraníferos, acabando por fazer um quadro-síntese dessa paragénesis. Mas, em muitos casos, ela estava sobreposta

à paragénese de jazigos mesotermiais de sulfuretos e, noutros, à paragénese de jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite. Mais tarde, procurei estudar: a paragénese dos minerais primários de alguns jazigos de sulfuretos da Beira Baixa, e elaborar um quadro-síntese; e a paragénese dos minerais primários de alguns jazigos de cassiterite e volframite das Beiras, e estabelecer um quadro-síntese; e fazer as comparações dos três quadros-síntese e estabelecer as respectivas sobreposições.

Além disso, encontrei rara uraninite idiomorfa e inclusa em columbite no pegmatito de Cabração (Serra de Arga) (NEIVA, 1954) e, ultimamente, no mesmo mineral, em raros jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite das Beiras, mas não inclusa nos outros minerais destes jazigos nem nos dos jazigos de sulfuretos mesotermiais.

Mas minerais radioactivos são comuns como acessórios nos granitos. Nas Beiras e NNE do Alentejo, por ordem decrescente de radioactividade, ocorrem uraninite, monazite, xenotima, zircão e óxidos de Ti-Fe, com domínio de inclusões nas micas (85%) e nos outros minerais (10%) do granito e em finos grânulos no contacto intergranular (5%) dos minerais da mesma rocha (PAGEL, 1951). É destes minerais do granito que U e Th foram mobilizados e entraram numa mineralização epitermal que flocou, gelificou e exsicou em variadas armadilhas, e também, entre elas, em jazigos filonianos variscos de cassiterite e volframite e em jazigos de sulfuretos (Zn, Cu, Pb) das Beiras e do NNE do Alentejo.

É destes assuntos que trata o trabalho que a seguir se apresenta, dedicado aos meus Discípulos, Amigos, Colegas Geólogos, a Todos com quem trabalhei no campo e no laboratório, às minhas Filhas, e às memórias dos meus Mestres, Pais e minha Mulher.

1. LOCALIZAÇÃO DAS JAZIDAS DE MINÉRIOS DE URÂNIO EM PORTUGAL

Na Figura 1*, está indicada a localização das jazidas de minérios de urânio em Portugal. Reconhece-se, da figura, que essas concentrações estão relacionadas com granitos variscos e dominam nas Beiras e no NNE do Alentejo, onde ocorrem jazigos com apreciáveis reservas minerais (DIAS, 1982, 1983).

As jazidas são, na grande maioria, filonianas. Nas Beiras e NNE do Alentejo, estão principalmente relacionadas com granitos γ_{2b}^{II} , γ_{3b}^{II} , γ_{3c}^{II} , γ_{3d}^{II} (Carta Geológica de Portugal, 1/500000, 1992), que cortam, e algumas atravessam metassedimentos da zona do endocontacto com esses granitos. A norte do rio Douro, relacionam-se, também com esses granitos, filões de quartzo com minerais uraníferos próximo de Penafiel, Amarante e Viariz (Baião).

* Figura de DIAS *et al.*, 1970, com algumas adaptações.



Fig. 1 - Localização dos jazigos e jazidas de minérios de urânio.

Contudo, nas Beiras, a noroeste, na região entre S. Pedro do Sul, Vouzela, Boa Aldeia e S. João do Monte, as jazidas filonianas uraníferas cortam o granito γ_3^I , com o qual se relacionam.

A norte do rio Douro, relacionam-se com os granitos γ_3^I e γ_1^{II} de entre Porto, Aguçadoura e Folgosa, as jazidas filonianas da zona de endocontacto (que não ultrapassa 2 km) de metassedimentos que vão do Câmbrico ao Silúrico. Atravessando granito γ_3^I há, em Sr^a. da Cunha (Alijó), jazida filoniana, sem valor económico como estas. Também na região da Vilarça (Moncorvo), principalmente entre Eiras das Hortas e Horta da Vilarça, no contacto entre rochas xistentas do Câmbrico e o granito hercínico γ_3^I , há filões de quartzo leitoso e fumado com minerais secundários de U (FARIA, 1966).

No Alentejo, há também jazidas uraníferas em Vila Viçosa, Terena (Alandroal), Mocissos (Rosário), Oriola (Portel) e Barrancos em rochas xistentas metamorfizadas do endocontacto (FARIA, 1966), em que os granitos estarão relativamente a dezenas ou muito poucas centenas de metros de profundidade. Esses granitos, com os quais a mineralização estará relacionada, serão provavelmente idênticos aos γ_3^I .

Os granitos com os quais as jazidas de minérios de urânio se relacionam são uraníferos.

2. GRANITOS URANÍFEROS* EM PORTUGAL

Os depósitos portugueses de minérios uraníferos estão principalmente relacionados com os granitos referenciados na Carta Geológica de Portugal 1/500000 (1992) por γ_{2b}^{II} , γ_{3b}^{II} , γ_{3c}^{II} , γ_{3d}^{II} . Tais granitos dominam principalmente no NNE do Alto Alentejo e nas Beiras, em que preferencialmente ocorrem aqueles jazigos, e estendem-se para NW pelo Douro e Minho.

Tomaram-se em consideração as datações dos granitos pelo método Rb-Sr (rocha total) e não as de K-Ar da biotite por estas darem resultados mais jovens por, frequentemente, a biotite estar um pouco cloritizada.

Os granitos γ_{2b}^{II} são granitos a monzogranitos porfiróides, muito grosseiros a grosseiros, biotíticos ou biotítico-moscovíticos, peraluminosos, com encraves tonalíticos e também metassedimentares. Em plutões zonados constituem a zona periférica. Por alteração metassomática, alguns plutonitos sofreram apreciável moscovitização, como, por exemplo, o plutonito de Penamacor-Monsanto (NEIVA, *et al.*, 1992). Genericamente têm idade entre 297 e 319 Ma, com U entre 5 e 14 ppm (mais frequentemente 9-12 ppm) e Th entre 12 e 47 ppm (mais frequentemente 12-22 ppm). Podem ser granitos híbridos, de mistura dum magma anatóxico granítico

* O granito uranífero tem teor em U superior ao do *clarke* dos granitos. Este *clarke*, segundo TAYLOR (1964), é de 4 ppm.

e dum magma máfico do manto, como acontece, por exemplo, em Carregal do Sal (SILVA, 1995; SILVA *et al.*, 1999), em Fornos de Algodres (AZEVEDO, 1996), em Terras de Bouro (NEIVA, 1993) e entre o Tâmega e o Douro (NEIVA, 1998). Mas na Serra da Estrela foi um magma granodiorítico, formado por fusão parcial de metassedimentos do Câmbrico, que deu, por cristalização fraccionada, o magma γ_{2b}^{II} (NEIVA *et al.*, 1987).

Os granitos γ_{3b}^{II} são granitos a monzogranitos porfíróides, grosseiros a médios, biotítico-moscovíticos, por vezes de duas micas, peraluminosos, com encraves de granodiorito e metassedimentares. Em plutões zonados constituem o núcleo do plutão, como no sul das Beiras; mas no plutão de NNE do Alentejo, de Nisa a Albuquerque (Espanha), é o granito dominante, e o núcleo, estreito, alongado, é de granito levemente porfíróide, médio, moscovítico-biotítico, talvez γ_{3c}^{II} . No geral o granito γ_{3b}^{II} tem idade entre 277 e 297 Ma (AZEVEDO, 1996; SILVA *et al.*, 1999; MENÉNDEZ, 1998). Nesses granitos, determinou-se U = 6-21 ppm (mais frequentemente 9-17 ppm) e Th = 8-36 ppm (mais frequentemente 9-29 ppm). Em diversos locais foi reconhecida a diferenciação do magma γ_{2b}^{II} para o magma γ_{3b}^{II} acompanhado de assimilação de material metassedimentar (SILVA, 1995). Mas na Serra da Estrela, o granito γ_{3b}^{II} formou-se, por cristalização fraccionada, a partir de um magma γ_{2b}^{II} , que, como atrás referido, resultou da cristalização fraccionada de um magma granodiorítico, formado por fusão parcial de metassedimentos do Câmbrico (NEIVA *et al.*, 1987).

Os granitos γ_{3c}^{II} , granitos a monzogranitos porfíróides, médios ou médios a finos, biotítico-moscovíticos, por vezes de duas micas, raramente moscovíticos, peraluminosos, não se encontram na sequência da diferenciação de γ_{2b}^{II} e γ_{3b}^{II} , correspondendo a pulsação magmática distinta, talvez dum magma granítico anatótico derivado de refusão parcial do Complexo Xisto-Metagrauváquico. Os granitos do grupo γ_{3c}^{II} têm no geral idades entre 278 e 305 Ma, com U = 6-13 ppm e Th = 1-43 ppm (SILVA *et al.*, 1999; AZEVEDO, 1996).

Granito γ_{3d}^{II} , de grão fino a médio, ligeiramente porfíróide, moscovítico-biotítico, peraluminoso, por exemplo ocorre em manchas no seio do granito γ_{3b}^{II} em Vale do Rossim (Serra da Estrela); formou-se por cristalização fraccionada do magma γ_{3b}^{II} . Contém U = 8 ppm e Th = 2 ppm (NEIVA *et al.*, 1987).

Mas um outro granito da Serra da Estrela, que aflora na parte apical do granito γ_{3b}^{II} em Covão do Meio, granito médio moscovítico, com U = 11 ppm e Th = 2 ppm, ter-se-á formado por difusão termo-gravitacional com os voláteis a terem, também, um papel importante (NEIVA *et al.*, 1987).

Com os conjuntos graníticos referidos, relacionam-se mineralizações epitermais uraníferas, mesotermiais de sulfuretos, hipotermiais de Sn e W e pegmatíticas de Be.

Há, em Portugal, granitos de características muito semelhantes às dos granitos γ_{2b}^{II} e γ_{3b}^{II} , indicados na Carta Geológica de Portugal 1/500000 (1992) por γ^{III} . São também uraníferos, aflorando nas regiões de: Monção; Serras do Soajo e Gerez;

Telões, Vila Pouca de Aguiar, Vilarinho das Paranheiras; Lamas de Ôlo; Freixo de Numão; Ferreirim-Prova; SSE da Serra de Leomil; Sezures-Antão; Lavadores (Vila Nova de Gaia).

Na Serra do Gerez, o granito dos Carris, de grão médio, biotítico, com 302 ± 4 Ma, o granito porfiróide, grosseiro a médio, levemente róseo, biotítico, de 293 ± 8 Ma, de apreciável extensão (desde as albufeiras de Vilarinho das Furnas, Caniçada, Salamonde e Paradela e a fronteira espanhola), e o granito ligeiramente porfiróide, médio a grosseiro, biotítico, a S da albufeira de Paradela, de 280 ± 17 Ma (mas o par biotite-rocha total deu 287 ± 3 Ma) são granitos de tipo I, com esfena e alanite, com assinatura do manto superior, correspondendo a uma isócrona única de Rb-Sr de idades entre 299 e 305 Ma. Contêm U = 6-17 ppm e Th = 23-52 ppm (NEIVA, 1993). Com tais granitos relacionam-se jazigos hipotermiais de volframite, cassiterite e molibdenite.

Em Monção, o granito é muito semelhante ao dominante na Serra de Gerez, com U = 15 ppm e Th = 29 ppm (BEETSMA, 1995).

Granitos de Pedras Salgadas (porfiróide, médio, biotítico), Vila Pouca de Aguiar (porfiróide, médio, biotítico) e de Gouvães da Serra (porfiróide, grosseiro, biotítico-moscovítico), de idades entre 282 a 308 Ma, contêm U = 6-22 ppm e Th = 13-23 ppm. Esses granitos ter-se-ão formado por hibridização de material baso-crustal, ou mesmo mantélico, e um magma crustal, havendo também granitos de fusão parcial de metassedimentos (MARTINS, 1998).

Em Lamas de Ôlo, o monzogranito porfiróide, médio a grosseiro, biotítico e um leucogranito moscovítico-biotítico têm U = 10-26 ppm e Th = 13-20 ppm. E os aplitos filonianos que cortam aquele granito contêm U = 15 ppm e Th = 29 ppm (HELAL, 1992).

Na região de Freixo de Numão, aflora granito porfiróide, de grão médio, biotítico-moscovítico com encraves homeógenos de grandes dimensões, com predomínio de biotite, alguma hornblenda verde, feldspatos, algum quartzo, e, entre os acessórios menores, idiomorfos zonados de alanite (NEIVA *et al.*, 1952).

Genericamente os granitos γ^{III} são contemporâneos dos granitos γ^{II}_{3b} . Contudo, a rocha granítica de Lavadores, um monzogranito a granodiorito, porfiróide, médio a grosseiro, biotítico, também indicado na Carta Geológica de Portugal (1992) como γ^{III} , tem idade 314 ± 1 Ma*, praticamente a mesma do granito γ^{II}_{2b} ; será um granito híbrido, mistura completa de magma granítico crustal com um magma básico (SILVA, 1995).

No norte do País, há granitos designados por γ^{I}_3 na Carta Geológica de Portugal 1/500000 (1992), também uraníferos e que ocupam grandes afloramentos em antiformas hercínicas.

* Mais recentemente (MARTINS *et al.*, 2001) dataram o zircão deste granito por U-Pb, obtendo 298 ± 12 Ma.

Na antiforma Montalegre-Chaves-Bouça (Valpaços), há, na região de Rebordelo, Bouça, Torre de D. Chama e Agrochão, determinações de U e Th em granitóides regionais: tonalito, fino a médio, de esparsos fenocristais, com U = inferior ao limite de detecção e Th = 20 ppm; granodiorito, porfiróide, fino a médio, biotítico, com U = 10 ppm e Th = 18 ppm; e granito porfiróide, médio, biotítico-moscovítico com U = 11 ppm e Th = 16 ppm. Essas rochas definem uma isócrona de Rb-Sr total de 386 ± 9 Ma e uma sequência magmática por diferenciação por cristalização fraccionada da mesma câmara, com assimilação de material metassedimentar para originar o granito com 357 ± 9 Ma. As duas primeiras rochas corresponderão à fase tectónica F1 e a terceira à tardi-F1 ou precoce-F2. São rochas híbridas, relacionadas com subducção, resultantes de misturas de magma básico mantélico e de magma anatótico crustal e deformadas pela fase F3. Mas na região predominam granitos moscovítico-biotíticos, genericamente de tipo S, provenientes de quatro magmas anatóticos crustais: uma pulsação magmática que deu origem a granito porfiróide, médio a fino, moscovítico-biotítico, com U = 10 ppm e Th = 20 ppm, que não foi possível datar; outra que originou granito de tendência porfiróide, médio, moscovítico-biotítico, com U = 8 ppm e Th = 12 ppm, de idade 328 ± 9 Ma; que, por cristalização fraccionada, deu granito levemente porfiróide, médio a fino, moscovítico-biotítico, com U = 11 ppm e Th = 10 ppm e o granito fino a médio moscovítico com U = 14 ppm e Th = *. Os três últimos granitos referidos definem a isócrona de 327 ± 9 Ma; e nova pulsação magmática, originando granito porfiróide, médio a grosseiro, moscovítico-biotítico com U = 8 ppm e Th = 11 ppm e isócrona de 319 ± 7 Ma; e, também, uma pulsação magmática final de que cristalizou o granodiorito porfiróide, médio, moscovítico-biotítico, com U = ** e Th = 12 ppm, que deu isócrona de 315 ± 8 Ma. Os granitos são peraluminosos, do tipo S ou crustal, que resultaram de fusão parcial de material crustal heterogéneo e intruíram entre 336 e 307 Ma e, portanto, sin-F₃ (GOMES *et al.*, 2002).

A antiforma que abrange o SW da Serra da Peneda, parte da Serra Amarela, a Serra da Cabreira, a Serra Alvão, a região de Vila Real, passando por Carrazeda de Ansiães e Escalhão até à fronteira espanhola, mostra importantes afloramentos de granitos γ_3^1 . Na Serra Amarela, um granito fino a médio, moscovítico-biotítico, do tipo S, de 336 ± 9 Ma, contém em média U = 7 ppm e Th = 48 ppm, e o granito grosseiro, moscovítico-biotítico, a N da albufeira de Vilarinho das Furnas, que a W contacta com este, de 303 ± 3 Ma, tem U = 13 ppm e Th = 12 ppm (Neiva, 1993). A SSW de Telões (Vila Pouca de Aguiar), aflora granito fino, moscovítico-biotítico, de 320 ± 12 Ma, que possui U = 7 ppm e Th = 3 ppm (NEIVA *et al.*, 1991).

No sistema granítico de Jales, o magma do granito porfiróide, médio a grosseiro, seriado, de duas micas, com U = 9-12 ppm e Th = 8-12 ppm, terá intruído há 309 ± 3 Ma, dando origem, por cristalização fraccionada, a granito porfiróide,

* = inferior ao limite de detecção.

** = inferior ao limite de detecção.

grossoiro, moscovítico-biotítico, com U = 7 ppm e Th = 6 ppm e a granito fino moscovítico, com turmalina, com U = 3 ppm e Th = 4 ppm. Filões de aplito-pegmatito (U = 16 ppm, Th = 1 ppm), de aplito (U = 20 ppm, Th = 1 ppm) e pegmatito (U = 4 ppm, Th = 1 ppm), relacionados com o granito porfiróide, seriado, mostram que a fácies aplítica é mais rica em U e a fácies pegmatítica a mais pobre em U e Th (NEIVA *et al.*, 1991; NEIVA, 1992).

Na região de Alijó-Sanfins (NEIVA, 1973), os granitos de duas micas, genericamente os mais frequentes, são porfiróides, grosseiros, médios ou finos, e outros, os não porfiróides, são finos a médios, mas todos moscovítico-biotíticos, e constituem duas séries de diferenciação magmática: uma, GII→GVII, com U = 13-4-4-5-23 ppm, Th = 10-9-4-2-6 ppm; e outra, pós-tectónica GXI→GXIII, com U = 12-10-8 ppm e Th = 34-36-27 ppm, tardi a pós-tectónica, sendo GXII de cor rósea e GXIII de cor vermelha. E entre as duas séries, três pulsações magmática distintas, a GVIII com U = 7 ppm, Th = 15 ppm, GIX com U = 5 ppm, Th = 9 ppm, GX com U = 15 ppm e Th = *. Os resultados de U e Th foram obtidos por A. NEIVA ulteriormente a 1973 e ainda não publicados.

Junto à fronteira, do lado espanhol, na região de Barrueco Pardo, na continuação da antiforma, os granitos de duas micas, fortemente peraluminosos, ricos em terras raras leves e pobres em terras raras pesadas, contêm U = 6-19 ppm e Th = 5-7 ppm (BEATSMÁ, 1995).

Nos afloramentos de granitos de duas micas da antiforma de Tarouca, Marialvas, Cidadelhe, Escalhão, há as mesmas características petrográficas que nos da antiforma atrás referida. Assim, entre os vales do Tâmega e Douro, na região muito próxima e a W de Alpendurada e Souzelo, aflora granito porfiróide, fino, biotítico-moscovítico de 352 ± 9 Ma, com U = 10 ppm e Th = 61 ppm, como enclave no granito γ_{2b}^{II} , granito médio a fino de duas micas (335 ± 13 Ma), com U = 7 ppm e Th = 12 ppm, em Santiago de Piães, e granito porfiróide médio, moscovítico-biotítico com U = 12 ppm e Th = 11 ppm, sendo este diferenciado do anterior por cristalização fraccionada (NEIVA, 1988). Na região de Paredes da Beira – Penedono, os granitos moscovítico-biotíticos mostram-se: os porfiróides, um fino, com U = 10 ppm e Th = 7 ppm, e outro médio, com U = 9 ppm e Th = 7 ppm; os porfiróides, médios, um com U = 21 ppm e Th = 20 ppm e outro com U = 9 ppm e Th = 9 ppm, e o grosseiro, ligeiramente foliado, com U = 7-13 ppm e Th = 9-3 ppm, das amostras menos para as mais ácidas; e os granitos moscovíticos têm, localmente, o porfiróide U = 9-1 ppm e Th = 55 ppm, e o porfiróide, controlado por falhas, que atravessam o anterior, U = 18 ppm e Th = 7 ppm. Embora entre alguns destes granitos se encontrem diversas gradações de diferenciação magmática, pequenos efeitos metassomáticos dificultam os testes da cristalização fraccionada (SILVA *et al.*, 1990).

* = inferior ao limite de detecção.

Aflorando diversos granitos na antiforma de Porto-Oliveira de Frades-Boa Aldeia, há alguns em que foram determinados U e Th. Por exemplo, no monzogranito do Porto, médio, moscovítico-biotítico, peraluminoso, sincolisional, de magma anatético crustal, de 343 ± 10 Ma, provavelmente de fusão de ortognaisses, com U = 2 ppm e Th = 17 ppm (SILVA, 1995), mostrando não ser uranífero; em Campia, a SSW de Oliveira de Frades, o granito porfiróide, médio, de duas micas é uranífero (U = 21 ppm e Th = 39 ppm), mas o granito moscovítico médio, com U = 5 ppm e Th = 4 ppm (BEATSMÁ, 1995) não o é.

Em conclusão:

1. A grande maioria dos granitos variscos portugueses é uranífera.
2. É principalmente com os granitos da série de diferenciação magmática $\gamma_{2b}^{II} \rightarrow \gamma_{3b}^{II}$ que se relaciona a grande maioria dos jazigos portugueses de minérios uraníferos (Fig. 2). Destes granitos, uns são híbridos, derivados de mistura de magma anatético crustal e de magma básico mantélico, ou de cristalização fraccionada acompanhada de assimilação de material metassedimentar; e outros resultantes da diferenciação dum magma granodiorítico, de tipo S, anatético crustal, que sofreu diferenciação por cristalização fraccionada, e, nalguns casos, com difusão termo-gravitacional, com os voláteis a terem um papel importante. Os granitos γ_{2b}^{II} serão tardi-F3 e os granitos γ_{3b}^{II} tardi a pós-F3. Com estes granitos relacionam-se jazigos pegmatíticos com berilo, hipotermiais de cassiterite e volframite, mesotermiais de sulfuretos (blenda, calcopirite, galena) e epitermais de minérios de urânio.
3. Os granitos γ^{III} são, na maioria, mais uraníferos do que os referidos em 2 (Fig. 2), e os mais toríferos são os da Serra do Gerez, granitos I, com os quais se relacionam alguns jazigos hipotermiais de volframite, cassiterite e molibdenite. Mas outros granitos são híbridos, como em Pedras Salgadas-Vila Pouca de Aguiar, de mistura de um magma granítico, anatético, crustal, com um magma básico mantélico. Com eles relacionam-se jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite e mesotermiais de sulfuretos. Os granitos γ^{III} serão contemporâneos dos granitos γ_{3b}^{II} (tardi a pós-F3).
4. Os granitos γ_3^I são tão uraníferos quanto os γ_{2b}^{II} e γ_{3d}^{II} e aproximando-se dos γ_{3b}^{II} (Fig. 2). Dos granitos γ_3^I , há alguns híbridos sin-F1 e tardi-F1 ou precoces-F2; mas os dominantes são granitos de tipo S, anatéticos, crustais, correspondentes a algumas pulsações magmáticas distintas, embora nalguns casos com séries de diferenciação magmática, sendo sin-F3, outros tardi-F3 e outros, ainda, pós-F3. A maior parte dos jazigos hipotermiais filonianos de cassiterite e volframite, hipo a mesotermiais de sulfuretos e ouro, e mesotermiais de sulfuretos (Zn, Cu, Pb) do centro e norte do País estão relacionados com os granitos γ_3^I .

5. Fica a interrogação por que razão os jazigos epitermais de pechblenda estão principalmente relacionados com os granitos γ_{2b}^{II} e γ_{3b}^{II} , embora haja jazigos com minerais secundários de U relacionados com granitos γ_3^I . É um assunto que será tratado no capítulo das Considerações Genéticas sobre os jazigos uraníferos.

3. TIPOS DE JAZIDAS DE MINÉRIOS DE URÂNIO EM PORTUGAL

É possível definir os seguintes tipos de jazidas uraníferas no nosso País: a) filões de quartzo; b) filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia; c) "stockworks" e disseminações em xistos e granitos; d) brechas filonianas, graníticas ou xistentas, quartzo-jaspóides; e) brechas filonianas, graníticas ou xistentas, quartzo-limoníticas; f) vénu-las de pecheblenda e fluorite; g) impregnações secundárias; h) depósito lacustre.

Alguns aspectos classificativos das jazidas encontram-se em: CAMERON, 1960; J.E.N., 1968; DIAS *et al.*, 1970; FERREIRA *et al.*, 1971 e 1982; BASHAM *et al.*, 1988.

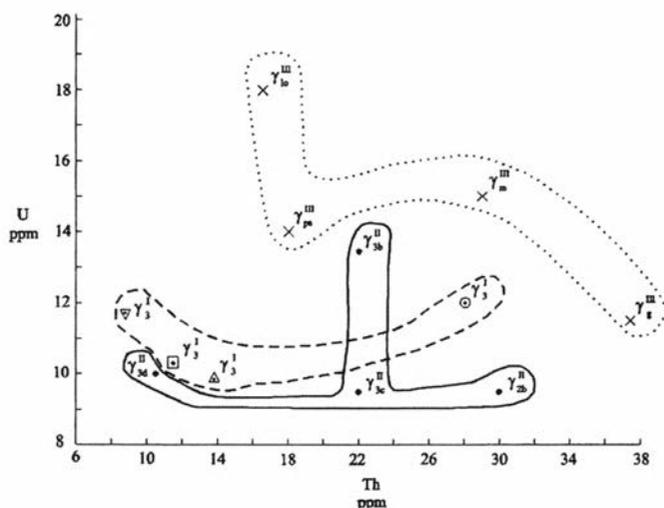


Fig. 2 - Valores médios de U e Th de granitos do Centro e Norte de Portugal.

Granitos γ^m : γ_m^m - Monção, γ_g^m - Serra do Gerez, γ_{pm}^m - Vidago - Telões,
 γ_{lo}^m - Lamas de Ólo.

Granitos γ^n : $\gamma_{2b}^n, \gamma_{3b}^n, \gamma_{3c}^n, \gamma_{3d}^n$ das Beiras e NNE do Alentejo.

Granitos γ_3^I : □ da antiforma de Montalegre - Valpaços, △ da antiforma de Serra da Peneda - V. Real - fronteira, ▽ da antiforma de Tarouca - Escalhão, ○ da antiforma Porto - Abraveses.

3.1. FILÕES DE QUARTZO

O quartzo é frequentemente maciço, leitoso a acinzentado, e no geral ocupa uma falha. Esta rejogou e o quartzo fracturou longitudinalmente ou deu fragmentos de dimensões diversas. Nova solução siliciosa ascendeu e formaram-se cristais de quartzo que cresceram normalmente às paredes das fracturas e em direcção ao centro do intervalo destas. Este quartzo é leitoso e, por vezes, hialino, ametista, hematóide e defumado, com zonamento franco. Tais cristais também se apresentam, com frequência, em estrutura cocárdica, zonada e semi-radiada, como, por exemplo, na região de Aguiar da Beira (Fig. 3).

A estrutura bandada dos filões é frequente, distinguindo-se pela cristalinidade do quartzo e pelas colorações que apresenta; e, também, pela fracturação dos filões segundo o seu alongamento e nos contactos com a rocha encaixante e por onde penetraram as soluções mineralizantes.

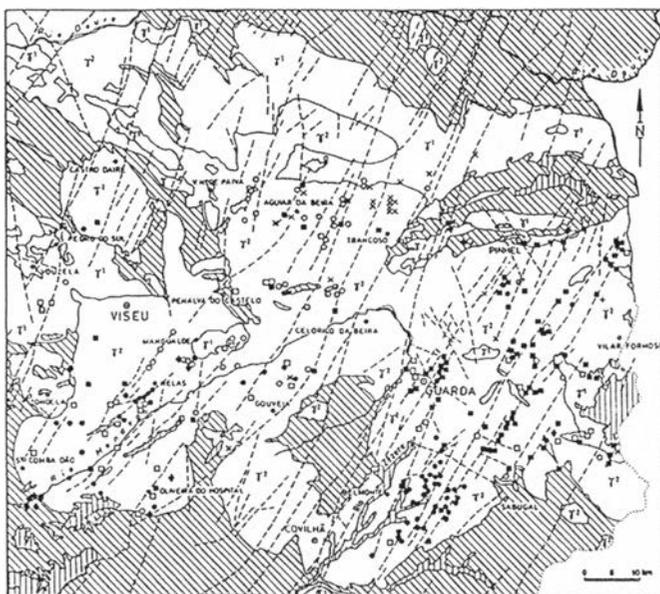
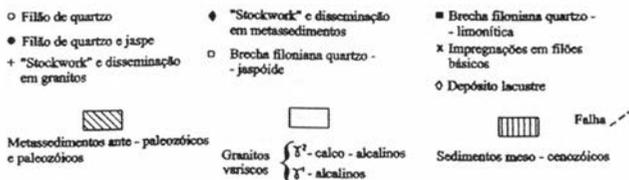


Fig. 3 – Localização de jazidas de minérios de urânio das Beiras.



Os filões, no geral, encaixam no granito, mas encontram-se alguns encaixados nas rochas xistosas, nas proximidades do contacto com o granito.

Quando um filão corta normal ou obliquamente o contacto granito-xisto e na transição para o xisto não o penetrou segundo a xistosidade, vai curvando, ganhando uma curva sigmóide até penetrar segundo a atitude da xistosidade, mantendo-se nalgumas dezenas de metros com esta atitude, mas, depois, desdobra-se em diversas vénulas de quartzo e terminam lembrando um rabo de cavalo. Isso vê-se bem em parte da região Nisa-Marvão (Fig. 4).

Por vezes os filões, nalguns tramos, têm estrutura brechóide, com os fragmentos das rochas dos hasteais (granitos ou xistos) cimentados pelo quartzo do enchimento filoniano, passando, assim, a brechas filonianas.

Nos filões de quartzo, a mineralização de pecheblenda é maciça a colofórmica, ocorrendo também neopecheblenda pulverulenta, coinite, gumites, minerais secundários de U, sulfuretos (pirite, blenda, calcopirite, marcassite) no geral em pequena quantidade. Outras vezes os sulfuretos são em maior quantidade, ocorrendo arsenopirite e molibdenite, e alguns sulfossais. Mais raramente encontra-se cassiterite e volframite.

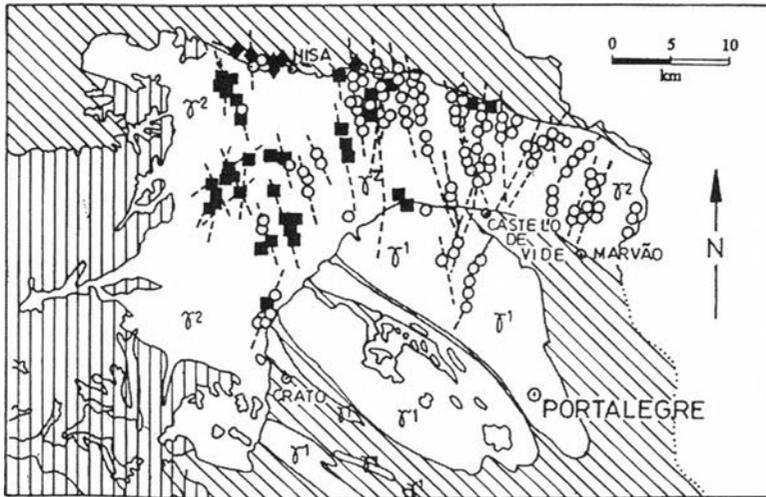


Fig. 4 - Localização de jazidas de minérios uraníferos do NNE do Alentejo.



Nas Beiras, estes filões de quartzo com minérios de U dominam num polígono: a norte com vértices em Ariz e Sebadelhe da Serra; a oeste em Ferreira de Aves, Esmolfe, Penalva do Castelo e Santar; a este em Vila Ruiva, Muxagata, Aldeia Nova e Carapito; e a sul em Nelas e Gouveia (Fig. 3*) São subverticais a verticais e de direcções NNE-SSW, N-S e, por vezes, ENE-WSW.

No NNE do Alto-Alentejo, predominam na região de Nisa, Marvão e Crato (Fig. 4**), sendo o quartzo acompanhado de fluorapatite e minerais secundários de U (NEIVA *et al.*, 1952). De W para E, a direcção dos filões varia de NNW-SSE para N-S e depois NNE-SSW e com pendor subvertical.

3.2. FILÕES DE QUARTZO-JASPE E/OU CALCEDÓNIA

Estes filões são constituídos por quartzo leitoso, por vezes fumado, ametista, róseo e hematítico, às vezes ferruginoso, e massas de jaspe e/ou calcedónia. Estas massas recristalizaram parcial a totalmente para quartzo microcristalino vermelho (jaspe) e translúcido ou transparente (calcedónia).

Depois de se observarem diversos jazigos deste tipo, fica-se com a impressão de dois casos possíveis: a) em filão de quartzo, por vezes bandado, como referido em 3.1, nas fracturas longitudinais e diversas transversais e no contacto com a rocha encaixante penetrou solução siliciosa coloidal, hematítica ou não, que deu origem, respectivamente, ao jaspe e à calcedónia que cimentaram o conjunto; b) em filões de quartzo maciço ou não, como os de 3.1, que ocupavam caixas de falhas, estas rejogaram e o quartzo e os fragmentos das rochas encaixantes foram cimentadas pelos minerais de sílica coloidal (jaspe e/ou calcedónia). A recristalização microcristalina do jaspe ou da calcedónia foi ulterior.

Os filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia predominam em duas regiões: uma a sul de Viseu, delimitada por um polígono com vértices em Faíl, Santar, 3 km SSE de Nelas, Candosa, St^a. Comba Dão e Tondela (Fig. 3); e outra a ENE da Covilhã, dentro do polígono com vértices em João Antão, Belmonte, 2 km a SW de Pêra Boa, 3 km a SSW de Casteleiro e Águas Belas. Como exemplos, na primeira região citam-se os jazigos de Urgeiriça, Valinhos, Mocho, Picoto, Barroco, no concelho de Nelas; e, da segunda região, referem-se os jazigos de Bica, Carrasca, Vale de Arca, Rosmaneira, no concelho de Sabugal, e Borrega, no concelho de Belmonte. São filões subverticais a verticais, de orientações NNE-SSW, NE-SW, ENE-WSW.

* A Fig. 3 foi elaborada com elementos duma figura de BASHAM *et al.*, 1988, dando-lhe um fundo geológico em grande parte extraído da Carta Geológica de Portugal, 1/500000, 1972, e da edição, desta, de 1992, no referente a falhas e cisalhamentos, com algumas adaptações.

** A Fig. 4 foi na sua quase totalidade elaborada por J.M. MATOS DIAS e PEINADOR FERNANDES e por mim completada.

A mineralização é de pecheblenda, maciça, botrióide e esferulítica, que evoluiu parcialmente para coinite, neopecheblenda pulverulenta, fosfatos e silicatos uraníferos; os sulfuretos (pirite, blenda, calcopirite, galena e marcassite) são pouco abundantes, e encontra-se, também, siderite, calcite e fluorite. Também, em diversos jazigos, detecta-se sobreposição da mineralização epitermal uranífera à mineralização mesothermal de sulfuretos e, nalguns casos, à mineralização hipothermal de cassiterite e volframite.

O grau de metassomatismo das rochas encaixantes destes filões é mais intenso do que o das encaixantes dos filões 3.1.

3.3. “STOCKWORKS” E DISSEMINAÇÕES EM XISTOS E GRANITOS

Em alguns locais, principalmente na zona de endometamorfismo de contacto de metassedimentos do Câmbrio, às vezes do Ordovícico e mais raramente do Silúrico, com os granitos, que no geral não excede os 2 km, e onde ocorrem corneanas e xistos mosqueados, muito dobrados, por vezes em isoclinais, há alguns filões de quartzo paralelos ao contacto e, entre eles, numerosas vénulas lenticulares anastomosadas de quartzo leitoso e fumado, a que, com frequência, se associam jaspe e/ou calcedónia. Forma-se, assim, uma rede de tipo “stockwork”, que, em Horta da Vilariça (Moncorvo) tem orientação geral WNW-ESE (BASHAM *et al.*, 1988), em Ázere-Sinde (Tábua) de disposição NW-SE com 7 km × 1,2 km (FARIA, 1966) e, provavelmente, em Nisa-Monte Claro, no NNE do Alentejo, de atitude WNW-ESE com 5 km × (0,12-1,2) km (PILAR, 1966).

Nos granitos, os “stockworks” de quartzo, por vezes com jaspe e calcedónia, são menos extensos e vêem-se, por exemplo, no distrito da Guarda a NNE, NW e SSE de Almeida.

No “stockwork” de Ázere-Sinde, há uma sobreposição da mineralização epitermal uranífera à mineralização hipothermal de volframite e sulfuretos, como se pode induzir do trabalho de PINTO (2001). Isso leva, também, a considerar a hipótese da similitude de ocorrência e jazida para Nisa-Monte Claro, pois PILAR (1966) admite que a pecheblenda maciça e a associação paragenética de calcopirite e pecheblenda permitem inferir origem profunda. Mas só sondagens profundas, até 200-300 m, e o estudo cuidadoso da amostragem e o estabelecimento da paragénese do jazigo poderá esclarecer.

Nas áreas onde há “stockworks”, como em Horta da Vilariça e Ázere-Sinde, há importante disseminação de minerais supergénicos uraníferos, como neopecheblenda pulverulenta, fosfatos (autunite, torbernite, uranocircite, saleíte, sabugalite e fosfuranilite), silicatos (uranófana α e β), sulfatos (uranopilite e zipeíte), arseniatos (zeunerite, uranospinite, novacequite) e outros. São minerais a que a alteração da pecheblenda deu origem; e formaram-se na zona de oxidação e

hidratação desta e de todos os outros tipos de jazigos uraníferos. Ocupam a zona de oxidação e a de variação do nível hidrostático, podendo atingir profundidade deveras apreciável, mais importante ainda se a morfologia e a tectónica regional o possibilitarem, como parece acontecer quando há os “stockworks”, e esses minerais foram disseminados e disseminam-se nas fracturas e poros das rochas xistentas e graníticas, que as águas superficiais invadem.

3.4. BRECHAS FILONIANAS, GRANÍTICAS OU XISTENTAS, QUARTZO-JASPÓIDES E/OU CALCEDÓNICAS

São filões do tipo 3.1 cujas falhas, onde se formaram, rejogaram e os fragmentos foram subsequentemente cimentadas por jaspe e/ou calcedónia acompanhados de nova mineralização uranífera; ou do tipo 3.2, em que uma segunda solução siliciosa coloidal de jaspe e/ou calcedónia, acompanhada de outra mineralização uranífera, voltou a cimentar o conjunto depois das falhas antigas rejogarem e/ou terem-se estabelecido novas falhas.

Estas estruturas filonianas têm no geral orientação NNE-SSW a NE-SW, menos frequentemente ENE-WSW a E-W.

Estas brechas filonianas são, nas Beiras, mais frequentes a ocidente da Serra da Estrela (18,7 %) do que a oriente (11,2 %). Ocorrem, também, no NNE do Alto Alentejo.

A mineralização destes jazigos é semelhante à dos jazigos de tipo 3.2.

Estas brechas ocorrem também em tramos de jazidas dos tipos 3.1, 3.2 e 3.3.

3.5. BRECHAS FILONIANAS, GRANÍTICAS OU XISTENTAS, QUARTZO-LIMONÍTICAS

São brechas de caixas de falhas, constituídas mais frequentemente por fragmentos de granito e, por vezes, por fragmentos de rocha xistenta, cimentados por quartzo leitoso. Tais falhas rejogaram ulteriormente, e soluções coloidais siliciosas penetraram os vazios e delas floclaram, gelificaram e exsicaram o jaspe e/ou calcedónia que cimentaram o conjunto e, contemporaneamente, permitiram mineralização pecheblêndica e de alguns sulfuretos. Mas, em diversos casos e anteriormente, de soluções verdadeiras precipitaram alguns sulfuretos, principalmente pirite. Esta alterou até apreciável profundidade para goetite e limonite, minerais que também impregnaram fracturas e poros que se foram formando; mas é possível que parte do pigmento hematítico do jaspe se tivesse também limonitizado e o jaspe passou a ter cor castanha escura. Juntamente com todas estas alterações mineralógicas, houve também alteração da pecheblenda para neopecheblenda pulverulenta e minerais secundários de urânio fortemente coloridos.

Este tipo de jazidas de minérios de U domina a oriente da Serra da Estrela (53 %), principalmente na metade sul do polígono com vértices em Pinhel, Guarda, João Antão, Vilar Formoso e a fronteira luso-espanhola. Também ocorre a ocidente (13 %); e no Alto Alentejo.

Tais jazigos têm mineralização primária semelhante ao tipo 3.2.

3.6. VÉNULAS DE PECHEBLENDA E FLUORITE

Este tipo de jazida, raro em Portugal, encontra-se em Aljão (Gouveia). É constituído por vénulas de pecheblenda e fluorite que ocupam fracturas e fendas de episienito local, derivado do granito monzonítico que sofreu cataclastismo, hematização, cloritização e lixiviação do quartzo (FERREIRA *et al.*, 1982).

3.7. IMPREGNAÇÕES SECUNDÁRIAS

São jazidas comuns a todos os tipos até agora referidos, pois, na zona de alteração, hidratação e oxidação das jazidas e rochas encaixantes, as fracturas preexistentes e as neofracturas são numerosas e as soluções radioactivas supergénicas locais ou de jazidas próximas invadiram-nas e invadem-nas. Jazigos de outros minerais são armadilhas também frequentes.

Tanto nas Beiras como no Alto-Alentejo, outras armadilhas para as soluções supergénicas uraníferas podem encontrar-se em filões aplíticos, pegmatíticos, hidrotermais quartzosos e em armadilhas tectónicas (falhas e zonas de cisalhamento), onde as fracturas de compressão e tensão são numerosíssimas e profundas nos granitos e nos xistos, que podem estar ou não relacionadas com os jazigos primários (FARIA, 1966), e onde é possível encontrar jazigos supergénicos de impregnação.

É devido a oscilações do nível freático que a alteração superficial dos minerais uraníferos se acentua e, em locais de depressão tectónica, é adjuvada por circulação de soluções vindas de jazidas vizinhas, formando-se importante impregnação secundária correspondente ao que PILAR (1966) chamou de “chapéu de urânio”. Isso nota-se no “stockwork” de Ázere-Sinde (Tábua) e no possível “stockwork” de Nisa-Monte Claro, em rocha xistenta, de apreciáveis valores económicos, em filões de quartzo com cassiterite e volframite como o da Barrosa (Vouzela), Boeiro da Tapada (Vouzela) e Cume (Viseu), de orientação NNE-SSW. Também no “stockwork” da Bejanca (Vouzela), num greisen estirado segundo NNW-SSE, formado a partir de modificações metassomáticas do granito porfiróide, médio a grosseiro, biotítico-moscovítico, produzidas pelas soluções hidrotermais que originaram as vénulas anastomosadas e entrelaçadas de quartzo mineralizado por cassiterite, volframite, sulfuretos e minerais uraníferos e fortemente tectonizado por falhas NNW-SSE e outras NNE-SSW e NE-SW, estando o granito bastante

caulinizado. Numerosos cristais de minerais secundários de U (autunite e torbernite) aí ocorrem, dominando esta, e glomérulos de neopecheblenda pulverulenta nas fracturas do quartzo e das rochas encaixantes e impregnando as salbandas greisenizadas e caulinizadas (NEIVA, 1944). Também na rocha que se vê entre o jazigo e a lavaria, situada a E a umas centenas de metros, aquele granito está muito caulinizado e de cor esverdeada devida a muito fina impregnação por torbernite. De curioso, belas associações de cristais de torbernite que precipitaram em velhas canalizações de água na zona em exploração do “stockwork”, como observámos em 1940. Na região há algumas fontes termais de água radioactiva.

As impregnações podem atingir profundidades apreciáveis em caixas de falhas e zonas de cisalhamento, como, por exemplo, em Fonte dos Cântaros (Sabugal), Cótimos (Trancoso) e Vale do Nespereiro (Oliveira do Hospital), em que os jazigos filonianos de quartzo e jaspe e brechas cortam xistos e metagrauvaques grafitosos (FARIA, 1966). E são também importantes nos jazigos filonianos de quartzo-jaspe e granitos encaixantes, como, por exemplo, na Urgeiriça (Nelas), João Antão (Guarda), Borrega (Belmonte), Bica (Sabugal).

Em filões e diques de doleritos e de lampróficos, rochas de idade de 235-205 Ma (FERREIRA *et al.*, 1969), no geral com disjunção esferoidal e por vezes prismática, e fracturas e fendas segundo aquela disjunção e radiais, acentuadas pela alteração dos minerais das rochas, encontram-se impregnações de minerais secundários de U, por vezes de apreciável valor económico até profundidade de 15 a 60 m, nessas fendas e fracturas e nos contactos das rochas encaixantes. Estes filões dominam a NNW, N e NE de Trancoso (Fig. 3). Tais filões e diques ocupam no geral caixas de falhas NNE-SSW, NE-SW, NW-SE, WNW-ESE a W-E. Há alguns casos em que na mesma falha ocorrem, lado a lado, filão de rocha básica e filão de quartzo, ambas com minerais secundários de U, mas os filões de quartzo por vezes também com sulfuretos e minerais primários de U.

3.8. DEPÓSITO LACUSTRE

Encontram-se sedimentos lacustres cenozóicos na região morfológica das Beiras designada por plataforma do Mondego, com pequenas bacias tectónicas com cascalhos, arcoses, grés grosseiros a finos e, por vezes, argilas, considerados como Eocénico-Oligocénico-Miocénicos.

Na Urgeiriça (Nelas) há depósitos lacustres com espessura de 0,5-9 m e cobrindo uma área de 250 000 m². São constituídos por grés com intercalações de cascalho quartzoso e grés finos caulínicos, esverdeados, impregnados de minerais fosfatados de U, com a maior concentração numa zona limonítica. A sua exploração rendeu 25-30 t de U₃O₈ (SERAFINO, 1961). O minério uranífero fosfatado, secundário, pode haver precipitado quando da sedimentação.

4. AS DUAS REGIÕES URANÍFERAS PORTUGUESAS

Referiu-se em 1 que, no País, há duas regiões uraníferas por excelência, que se prolongam para Espanha. Uma corresponde à região das Beiras, embora com menores dimensões do que esta a oeste, e a outra a região NNE do Alentejo.

4.1. A REGIÃO URANÍFERA DAS BEIRAS

4.1.1. NOTAS SOBRE A GEOMORFOLOGIA DA REGIÃO

A Serra da Estrela, a maior parte granítica (granitos variscos) e restante xistenta (formações ante-Ordovícico), é um “horst” SSW-NNE basculado para NNE (RIBEIRO, 1949, 1954; DAVEAU, 1969), com vários planaltos. O planalto topo do “horst” tem a SSW altitude de 1993 m (Torre) e a NNE 616 m nas proximidades de Celorico da Beira (Carta Geológica de Portugal, 1/500000, 1992).

O bloco central da Serra da Estrela (Fig. 3) é limitado a W por uma falha NNE-SSW que passa por Aldeia Nova, Mesquitela, torcendo depois para NE-SW a 2,5 km a E de Gouveia, continuando por Vila Cova à Coelheira, Cerdeira e prolongando-se para SW; e a E pela falha NNE-SSW passando por Velosa, Corujeira, Famalicão, torcendo em Valhelhas para SW, e continuando por Verdelhos, Cortes do Meio, Ourondo e prolongando-se para SW.

A vertente ocidental da Serra está bem marcada por escadaria de falhas NNW-SSW que, a partir duma linha passando por Mangualde-Seia-Valhelhas torce para NE-SW (Fig. 3). A escadaria tem desníveis que chegam a atingir 500 a 1000 m (DAVEAU, 1969). Também na vertente SW da Serra os desníveis são imponentes.

A vertente oriental é francamente menos alcantilada (Fig. 3), desde a falha da ribeira de Massueime-Valhelhas, com os mais altos desníveis de 150 m, e os outros de uma a poucas dezenas de metros.

As falhas NNE-SSW a NE-SW têm grande importância morfológica na Serra da Estrela; mas também numerosas falhas NW-SE a WNW-ESE a recortam, sendo talvez em maior número as falhas E-W a ENE-WSW.

A Serra da Estrela, no seu rebordo SE, está intensamente recortada pelos vales do Alto Zêzere e seus afluentes; no rebordo SW pela bacia do rio Alva; e no rebordo NW pelo encaixe do rio Mondego na bacia de Celorico da Beira.

Os vales das bacias intramontanhas do Alto Mondego e do Alto Zêzere, em parte nos xistos e depois nos granitos, recortam a Serra da Estrela. Também os planaltos de Pinhel-Guarda-Sabugal, de altitude aproximadamente entre 680 e 950 m, marcando a Meseta, até à Serra da Malcata (FERREIRA, 1981), prolongam-se para Espanha e são recortados pelas bacias do Alto Côa e da ribeira de Tourões, esta afluente do Águeda.

A NW da Serra da Estrela situa-se o planalto da Nave, recortado também em granitos variscos e alguns retalhos de xistos do Câmbrico, compreendendo as Serras de St^a. Helena e da Lapa até o vale do Távora, indo dos 1000 aos 680 m, inclinando para SW (FERREIRA, 1978). É mordido pelas bacias do Alto Paiva e do Alto Vouga, próximo à extremidade E, e pela bacia do Alto Távora.

Também uma unidade morfológica importante na região é a plataforma do Mondego, superfície de aplanção poligénica inclinada para SW entre as altitudes de 600 m, próximo ao planalto da Nave, e 200 m em St^a. Comba Dão, depressão entre a Serra da Estrela e a Serra do Caramulo, que a bacia hidrográfica daquele rio entalhou até profundidades de 100-150 m (FERREIRA, 1978). Nela dominam os granitos variscos e alguns retalhos das rochas xistentas do Câmbrico.

A Serra do Caramulo, de constituição geológica similar à anteriormente referida, com o seu ponto culminante a 1074 m, é limitada do lado oriental por uma escarpa de falha, por vezes atingindo os 800 m de altura, de orientação N-S, praticamente coincidente com o vale encaixado da ribeira de Ribamar, afluente do rio Vouga, que, um pouco a S de Vasconha da Serra, toma orientação principal NNE-SSW, do desligamento Verin-Penacova, e, muito próximo e a SW do vale do rio Castelões, passa à direcção NE-SW.

Próximo às escarpas das Serras da Estrela e do Caramulo, há testemunhos de deformação da plataforma do Mondego, em que nas depressões tectónicas se encontram depósitos argilo-arcósicos do Eocénico-Oligocénico e depósitos de arenitos e argilas do Miocénico.

Entre a plataforma do Mondego e superfície de Viseu, há um desnível de 100 m. Na região de Viseu há uma plataforma de cerca de 500 m de altitude; acima, entre os 600-650 m de altitude, encontra-se os restos de uma superfície de aplanção.

4.1.2. LOCALIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS CONCENTRAÇÕES URANÍFERAS DAS BEIRAS E ALGUMAS REFERÊNCIAS A ASPECTOS GEOLÓGICOS E MORFOLÓGICOS

A 5,8 km a NE de S. Pedro do Sul (Fig. 3), na vertente direita do rio Vouga, numa plataforma à altitude de 450 m, aflora um filão de quartzo-jaspe e/ou calcedónia e a 3 km deste uma brecha filoniana granítica, quartzo-limonítica; são duas jazidas de minérios de urânio cortando o granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico.

A cerca de 7,5 km de Vouzela, na Serra do Caramulo, afloram brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas, com minerais uraníferos, atravessando granito médio de duas micas, duas localizadas a 850 m de altitude e a terceira não longe da escarpa oriental da Serra e margem esquerda do vale tectónico da ribeira de Ribamá, afluente do Vouga.

A SSW de Viseu, na plataforma morfológica do Mondego inclinada para SW desde 460 m a 230 m, no interior de um polígono de vértices nos locais de Faíl,

Santar, Nelas, 3 km a SSE de Nelas, Candosa, St^a. Comba Dão e Tondela (Fig. 3), em que domina granito porfiróide biotítico e biotítico-moscovítico, ocorrem jazidas minerais de urânio, predominando os filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia (52%) com orientação dominante N 39°-65°E, por vezes, N 15°-25°E e E-W, e as brechas filonianas graníticas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (30%), com atitudes bastante similares, aflorando, ainda, brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas (12%) e “stockworks” de quartzo e disseminações em granito (5%), e, próximo ao jazigo da Urgeiriça, um depósito lacustre cenozoico com minerais de U (1%).

A SSW da região referida, próximo ao rio Mondego, há, nas corneanas e micaxistos, muito dobrados do Câmbrio, com zona interna de metamorfismo de contacto granítico, quatro jazidas de “stockworks” e filões de quartzo e disseminações uraníferas nas rochas metassedimentares e uma jazida de impregnações em filões básicos (Fig. 3).

No interior do polígono que tem por vértices os pontos 8 km a ESE de Nelas, S. Martinho, Termas de Alvôco da Serra e St^a. Ovaia (Fig. 3), afloram granito porfiróide grosseiro biotítico e biotítico-moscovítico, com pequenas manchas de granito médio moscovítico-biotítico, que metamorfizam, por contacto, metassedimentos do Câmbrio, originando corneanas e micaxistos. Em região de altitudes entre 350 e 584 m, abrangendo até os 450 m a plataforma do Mondego e acima o degrau topográfico e respectivo patamar até a escarpa SW da Serra da Estrela, são mais frequentes as jazidas uraníferas em brechas filonianas graníticas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (33%), em brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas (17%) e em filões de quartzo (17%), que se dispõem predominantemente segundo N 25°-53°E, também em “stockworks” e disseminações em metassedimentos do Câmbrio em que os “stockworks” encaixam (17%), em filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia (8%) e em impregnações em filões alterados de rochas básicas (8%). As falhas que cortam o conjunto dispõem-se principalmente segundo N 40°-50°W, sendo menos frequentes as NE-SW e as E-W.

Subindo para norte, no polígono com vértices em Santar, Nelas, Gouveia, 3 km a WNW de Linhares e 4,5 km a WNW de Mangualde, a maior parte das jazidas uraníferas situa-se na plataforma do Mondego e a W da escarpa principal da Serra da Estrela (Fig. 3). Na região predomina o granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico, com algumas manchas de granitos monzoníticos e granitos moscovíticos-biotíticos e, por vezes, pequenos a grandes xenólitos de metassedimentos do Câmbrio. A mineralização uranífera predomina em filões de quartzo (52%), principalmente de orientação N 37°-45°E e N 50°-70°E, e raramente N 5°-20°E, e ocorre também em brechas filonianas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (15%), em filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia (11%), em algumas brechas filonianas quartzo-limoníticas (7%), de atitudes no geral semelhantes às referidas para os filões de quartzo, e, ainda, em “stockworks” e disseminações em

metassedimentos (7%), em vénulas de pecheblenda e fluorite (4%) num afloramento de episienito, e em impregnações em filões básicos alterados (4%), estes de direcção N 30°-43°E. As falhas que cortam o conjunto litológico dispõem-se principalmente segundo N 22°-36°W e N 51°-60°W e diversas segundo N 30°-35°E, N 80°-90°W e N 5°-10°W.

Um outro polígono, este a N de Fornos de Algodres, tendo por vértices Penalva do Castelo (Castendo), 5 km a WNW de Celorico da Beira, proximidades e E de Aldeia Nova e a 3,5 km a NE de Castendo (Fig. 3), abrange fundamentalmente a plataforma do Mondego a 650-550 m de altitude, com vales largos dos afluentes deste rio e, no seu prolongamento para NE, é atravessada pelo vale tectónico de Muxagata, não longe da bacia de Celorico, havendo em proeminência um nível de disposição NNE de altitude 770-740 m, devido à parte baixa do planalto da Nave para SW, e relevos residuais circunscritos de orientação ENE-WSW na porção central do polígono. No interior deste afloram granito porfiróide grosseiro a médio biotítico-moscovítico; a NW e no centro-norte, granito grosseiro a médio biotítico; próximo e W de Matança vêem-se quartzitos do Ordovícico, que sobressaem dos micaxistos do Câmbrico que se prolongam para E; a W e no centro-sul afloram micaxistos do Câmbrico que sofreram migmatização. As mineralizações uraníferas no interior deste polígono são principalmente em filões de quartzo (54%) de direcção N 30°-50°E e também N 50°-70°E, e, ainda, em brechas filonianas graníticas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (23%) e em brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas (15%), com atitudes muito semelhantes, e mais raramente em impregnações em filões alterados de rochas básicas (8%) orientados segundo N 30°-43°E. As falhas, que mais frequentemente cortam o conjunto, têm direcção geral N 30°-40°E.

Na região que tem Aguiar da Beira no seu interior, há um polígono de vértices em Ferreira de Aves, Carapito, Sebadelhe da Serra e Lourosa (Fig. 3), onde predominantemente aflora granito porfiróide grosseiro a médio biotítico-moscovítico, havendo por vezes, no seio deste granito, afloramentos de granito moscovítico-biotítico. As mineralizações uraníferas dominam em filões de quartzo (57%), no geral de direcções N 20°-46°E, ocorrendo também em brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas (24%), em impregnações em filões de rochas básicas mais ou menos alteradas (14%) e em brechas filonianas graníticas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (5%), em que as estruturas brechóides têm atitudes similares às dos filões de quartzo e, por vezes, N-S. O polígono referido abrange a parte SE do planalto da Nave, com altitudes de 950-840 m, recortado a sul pelas cabeceiras do rio Dão e afluente Carapito e a norte e centro por afluentes do Alto Távora; este rio corre, aqui, numa superfície bem definida abaixo do planalto, superfície que chega a atingir largura de 6,5 km a 0,9 km e comprimento de 11,5 km segundo SW-NE na região de Ponte do Abade, que sobe um pouco para montante na região de Venda do Cepo, muito próximo à nascente do rio Távora, onde são tectónicos os valeiros NNE-SSW afluentes.

A E da região de Aguiar da Beira, há uma outra cujo polígono triangular tem por vértices Sebadelhe da Serra, 2 km a WSW de Trancoso e 2,5 km a SSE de St^a. Comba (Fig. 3), onde dominam a W e S o granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico e no centro e NE o granito médio de duas micas. Neste polígono predominam francamente as impregnações de minerais uraníferos em filões de rochas básicas mais ou menos alteradas (86%), alguns ladeados por filões de quartzo, orientados segundo N 10°-26°E e alguns N 45°-61°W, e mineralizações em filões de quartzo (7%) e em brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas (7%). Falhas N 8°-18°E e menos frequentes NNW-SSE e NW-SE cortam o conjunto filoniano. Esta região localiza-se próximo e a NW da Serra da Marofa; desce do planalto central, prolongamento do da Nave, a altitude de 950-850 m entre Sernancelhe e Trancoso, passando, para NE, a um patamar intermédio com cerca de 650 m de altitude, bem visível em Rabaçal, ocupando depois, para NE, desde W de Coriscada até próximo de St^a. Comba, um planalto de 530-500 m de altitude que faz parte da Meseta e que, aqui, atinge o seu rebordo ocidental.

Muito próximo, mas para E do prolongamento para N da falha que margina do lado E o bloco mais elevado da Serra da Estrela, entre 8 a 11 km a W de Pinhel (Fig. 3), numa região localizada perto de Póvoa d'El Rei e Pala a S, e perto de Freixiela a N, e aqui situadas no prolongamento da vertente SSW da Serra da Marofa, a E de Cógula, há um conjunto de cinco jazidas de minérios de urânio numa área planáltica de 650 m de altitude, na superfície da Meseta, perto do rebordo W desta, e, ainda, numa superfície inferior. Dessas jazidas, duas são de "stock-works", com impregnações em metassedimentos, e outra em granito, uma brecha filoniana granítica quartzo-jaspóide e/ou calcedónica, e uma de impregnação em filão de rocha básica alterada, que atravessam metassedimentos intensamente dobrados do Câmbrico e o granito gnaissóide, que os metamorfiza.

Num grande polígono, um tanto irregular, que do lado E tem como limite a fronteira luso-espanhola e nos restantes lados tem vértices em Pinhel, Misarela, 4,5 km a WSW de João Antão, nesta povoação, 3,6 km a N de Sabugal e a fronteira a E de Aldeia da Ponte (Fig. 3), há afloramentos do Câmbrico, filádios alternando com metagrauvaques e, por vezes, metagrês e metaconglomerados, que foram intruídos por granitos variscos que hoje afloram em grande extensão. A maior área é ocupada por granito porfiróide grosseiro a médio biotítico-moscovítico e de manchas de granito grosseiro biotítico-moscovítico, a florando, ainda, granito médio de duas micas e, por vezes, granito fino moscovítico-biotítico. Aqueles metassedimentos do Câmbrico, por vezes extensos, em contacto com os granitos evoluíram para corneanas, micaxistos mosqueados e, não raramente, para migmatitos. As mineralizações uraníferas cortam no geral os granitos, principalmente os porfiróides, ocorrendo em jazidas dos tipos: brechas filonianas graníticas quartzo-

-limoníticas (69%); brechas filonianas graníticas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (14%); e filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia (5%); em que, no conjunto das estruturas, as direcções dominantes são N 22°-43°E, por vezes N 48°-56°E e N 10°-20°E e, raramente, E-W; e, ainda, filões de quartzo (3%) e “stockworks” e disseminações em metassedimentos (3%) e em granitos (2%) e impregnações em filões de rochas básicas alteradas (4%), por vezes, ladeadas por filões de quartzo leitoso, principalmente orientados segundo N 23°-52°W, com menor frequência segundo N 25°-31°E e, mais raramente, N 70°-80°E. As famílias de falhas que cortam o conjunto filoniano têm predominantemente direcção N 57°-80°W, diversas N 20°-35°E, e, com menor frequência, N 41°-50°W, N 23°W, N 66°-90°E e N 53°E. Este polígono corresponde a uma região onde domina a superfície fundamental da Meseta Ibérica, que vem desde a fronteira com a Espanha com altitudes de 900-930 m a Sul, no paralelo de Sabugal, passando por altitudes de 870-830 m no paralelo da Guarda, 790-780 m no paralelo de Verdugal, 750-680 m no paralelo de Almeida e 730-680 m no paralelo de Pinhel, acentuando-se a inclinação para NNW a partir do paralelo de Almeida. A superfície da Meseta é entalhada predominantemente pela bacia hidrográfica do Côa e, em bem menor proporção, pela bacia da ribeira de Tourães, afluente do Águeda. A ocidente do rio Côa, os retalhos da Meseta são mais estreitos por os vales confluentes neste rio serem largos.

A S há um outro polígono com vértices em João Antão, Belmonte, 2 km a SW de Pêra Boa, 3 km a SSW de Casteleiro e Águas Belas (Fig. 3), onde continua a dominar o granito porfiróide grosseiro a médio biotítico-moscovítico, aflorando a N uma mancha de granito de grão médio moscovítico-biotítico e a S ocorrem afloramentos bem mais pequenos deste granito. As mineralizações uraníferas predominam francamente em filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia (86%), ocorrendo, ainda, em brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas (12%) e raramente em brechas filonianas graníticas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas (2%), com direcções principalmente N 24°-46°E e N 55°-65°E e, mais raramente, N 78°E-S 80°E (CAMERON, 1959). Filões de rochas básicas, que afloram principalmente na metade N da região, têm orientações N 55°-72°E, N 22°-30°E, N 65°-80°W, N 13°-33°W e raramente E-W. Falhas cortam o conjunto, com domínio das direcções N 70°-88°W, havendo outras N 10°-20°W, N 25°-38°W, N 15°-25°E e, por vezes, ENE-WSW. O N e o NE da região abrangem o planalto de 900-850 m de altitude da Meseta Ibérica, recortado por afluentes do Alto-Côa, encontrando-se a N relevos residuais de tipo “inselberg”; a S e SE, ocupando mais de metade da região, fica a Cova da Beira, afundimento tectónico de cerca de 500-450 m; e no centro N e NE, desde o rebordo daquele planalto, a descida até a Cova da Beira, num desnível de cerca de 400 m, é recortada por vales íngremes NNE-SSW de afluentes do Zêzere, alguns de natureza tectónica.

4.1.3. ZONAMENTO DOS JAZIGOS DE MINÉRIOS DE URÂNIO DAS BEIRAS

A W e a NNW da Serra da Estrela dominam: a N do paralelo de Nelas, os filões de quartzo; a S deste paralelo, os filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia e as brechas filonianas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas; a SW, junto ao contacto granito-xisto, na zona de endometamorfismo, entre Ázere e Sinde, “stockworks” e disseminações nas rochas xistentas; a N do paralelo de Trancoso, e prolongando-se para NE, impregnações em filões de rochas básicas (doleritos e lamprófiros) alteradas.

A E e a NE da mesma Serra, mas de S para N predominam: entre Sabugal e Belmonte e também um pouco para N e S, os filões de quartzo-jaspe e/ou calcedónia; para N, até à fronteira luso-espanhola a E e a Serra da Marofa, as brechas filonianas quartzo-limoníticas, embora brechas quartzo-jaspóides e/ou calcedónicas ocorram em apreciável número desde um pouco a N do paralelo de Sabugal.

No bloco central da Serra da Estrela, o mais elevado e que terá subido e basculado para NNW, não se encontram, praticamente, jazigos minerais hipo, meso e epitermais. Mas a W e a NNW e a E e NE da Serra são frequentes os jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite, os mesotermiais de sulfuretos (blenda e galena) e os epitermais de minérios de urânio.

Pelo estudo das paragêneses desses jazigos, reconhece-se, como adiante se referirá, que a mineralização epitermal uranífera se sobrepõe principalmente à mineralização mesotermal de sulfuretos e menos frequentemente à mineralização hipotermal de cassiterite e volframite. Há, naturalmente, armadilhas estruturais com mineralizações uraníferas epitermais não sobrepostas a outras jazidas de minérios.

4.2 REGIÃO DO NNE DO ALENTEJO

4.2.1 NOTAS GEOMORFOLÓGICAS E GEOLÓGICAS

É na peneplanície do Alto Alentejo que se situa esta região uranífera. É uma superfície ondulada, entre cerca dos 400 m e os 250 m de altitude, inclinada para W e N, desde a base da Serra de Marvão-S. Mamede. Essa superfície inclina um pouco mais bruscamente a N e NW até o rio Tejo e a N e E até o rio Sever.

Desde o Tejo até Monte Claro, Nisa, Póvoa e Meadas, Valência de Alcântara e ainda para E, limite do contacto com o granito, afloram formações do Complexo Xisto-Metagrauváquico, do Câmbrico, intensamente dobradas e de orientação WNW-ESE, com isoclinais verticais a subverticais. São cortadas a N e NW pelo rio Tejo e a E pelo rio Sever. As ribeiras afluentes destes rios, que correm nas formações xistentas, têm numerosos meandros, por vezes apertados.

Acima destas formações, sobressai, desde SW de Vila Velha de Ródão-Castelo até S. Miguel, onde atinge 435 m de altitude, uma barra quartzítica, acompanhada de metapelitos xistentos, NW-SE, do Ordovícico; corresponde à parte SE da Serra do Perdigão. Esta crista, no final do Carbónico-princípio do Pérmico, prolongar-se-ia até ao Ordovícico a N de Portalegre, como a crista a W daquela, a N do Tejo, se prolongaria até a crista a S de Portalegre.

As formações daquele Complexo Xisto-Metagrauváquico contactam a S com granito a monzogranito porfiróide grosseiro, biotítico-moscovítico, seguindo a linha atrás referida, e são por este metamorfizadas. Este granito domina num plutão zonado cujo núcleo, alongado SW-WE, é de granito médio, moscovítico-biotítico, com alguns corpos monzoníticos de grão médio, cinzento-escuros, biotítico-moscovíticos, corpos esses que também ocorrem como xenólitos em três porções SSW do batólito (MENENDEZ, 1998). São todos granitos variscos, que a sul contactam ortognaisses e granitos, alcalinos, estes também gnaissicos, que necessitam de ser estudados em pormenor e devidamente interpretados.

A SE, aqueles granitos variscos contactam, e metamorfizam, desde Cabeço de Vide e Marvão e para SE, formações dobradas NW-SE, que se estendem para S e SE, constituídas por estratos do Precâmbrico ao Devónico, e sobressaem no relevo (com picos no Facho 762 m, Urra 782 m, Lobo 832 m), constituindo a Serra de Marvão-S. Mamede.

4.2.2 AS JAZIDAS E OS JAZIGOS DE MINÉRIOS URANÍFEROS

As jazidas são no geral subverticais, filonianas, e inclinadas 70°-90°.

Na região mineralizada, na mais ocidental dominam as brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas. Dispõem-se segundo falhas NNW-SSE, embora algumas se encontrem em falhas NNE-SSW e mais raramente N-S. Nesta região afloram também filões de quartzo, no geral extensos, principalmente NNW-SSE, e, mais a sul, segundo NNE-SSW, alinhando-se em falhas (Fig. 4). A mineralização uranífera, no geral de minerais secundários de U, sobrepõe-se a uma mineralização mesotermal de sulfuretos.

Na região central dominam os filões extensos de quartzo, embora se encontrem brechas filonianas graníticas quartzo-limoníticas, de orientação NNW-SSE, passando lentamente para E a atitude N-S. A mineralização secundária uranífera sobrepõe-se à mineralização de cassiterite e volframite, mas também ocorre em filões de quartzo e apatite, de estrutura bandada, e se encontram principalmente desde 4 km a W de Castelo de Vide até à fronteira luso-espanhola (NEIVA *et al.*, 1952).

Na região oriental, para E de Tapada da Represa e Melriça, predominam francamente os filões de quartzo, embora se encontrem algumas brechas graníticas quartzo-limoníticas. Têm no geral orientação NNE-SSW e, raramente, NE-SW, ao

longo de falhas. E a mineralização secundária uranífera sobrepõe-se à mineralização mesotermal de sulfuretos em filões de quartzo, barite e apatite.

A norte, na zona metassedimentar do endocontacto, com corneanas, micaxistos e filitos mosqueados, há jazidas uraníferas segundo cisalhamentos WNW-ESE, paralelos ao contacto. Vestígios de mineralização uranífera primária ocorrem abaixo dos -17 m de profundidade, atingida por algumas sondagens rotativas com extracção de amostras até -60 m de profundidade; são estreitas vénulas de quartzo, jaspe e/ou calcedónia, pecheblenda, sulfuretos (blenda, calcopirite, galena e marcassite) e carbonatos, segundo a xistosidade, as fissuras das rochas metamórficas e as brechas de falhas e cisalhamento (conf. pp. 69-71 de PILAR, 1966, descrição que tem todos os ingredientes dum “stockwork”). Os minerais secundários de U, formados por alteração da pecheblenda, principalmente autunite e fosfuranilite, ocorrem nos enchimentos argilo-limoníticos das caixas das falhas e cisalhamentos (estes WNW-ESE), entre os planos de xistosidade e de diaclases, principalmente entre Nisa e Monte Claro, e ocupam a zona de oxidação e a zona de oscilação do nível hidrostático até -20 m de profundidade. Só por si, a mineralização supergénica pode ter interesse económico (reservas certas de jazigo de 2000 ton de U_3O_8 , PILAR, 1966), numa exploração a céu aberto até profundidade de -30 m, com possibilidade de produção de grande tonelagem de minério com teor de corte teórico de 0,05 % de U_3O_8 (VICENTE, C., 1966). A partir de -20 m de profundidade, a mineralização primária uranífera vai enriquecendo.

4.2.3 A ZONALIDADE DAS JAZIDAS URANÍFERAS

A ocidente, nos granitos, dominam as brechas filonianas graníticas; e, nas rochas metassedimentares do endocontacto, além de alguns filões de quartzo, um muito provável “stockwork” extenso (5 km x 1 km), em que a pecheblenda está quase totalmente alterada, para minerais secundários de U, até profundidade de, aproximadamente, -20 m.

Para oriente dominam largamente os filões de quartzo com minerais uraníferos secundários, cortando principalmente os granitos e, a norte, as rochas metassedimentares do endocontacto.

5. PARAGÉNESES MINERAIS

Após estudo macro e microscópico (em luz transmitida e em luz reflectida) de muitas amostras de associações mineralógicas colhidas em numerosas jazidas e jazigos de minérios de urânio, reconhece-se que, na maior parte destas concentrações minerais, há sobreposição da mineralização primária uranífera a mineralizações primárias mais antigas. Assim, por exemplo, nos jazigos de Reboleiro

(Trancoso), Cunha Baixa (Mangualde), Urgeiriça (Nelas), Valinhos (Nelas), Bica (Sabugal), Carrasca (Sabugal), Rosmaneira (Sabugal), Tarabau (Nisa), Palheiros de Tolosa (Nisa), Póvoa e Meadas (Nisa), a mineralização primária uranífera, epitermal, sobrepôs-se à mineralização mesotermal, esta nitidamente anterior e semelhante à dos jazigos de sulfuretos das Beiras. Em casos talvez menos frequentes, a mineralização uranífera primária, epitermal, sobrepôs-se à mineralização hipotermal de cassiterite e volframite, sendo esta anterior à mineralização mesotermal de sulfuretos das Beiras, como, por exemplo, nos jazigos filonianos de Fundegos (Vouzela), Senhora das Fontes (Pinhel), Arrifana (Guarda), Medronheira (Belmonte), Borrega (Belmonte), Coitos (Sabugal) e nos “stockworks” de Ázere-Sinde (Tábua) e Bejanca-Carvalho (Vouzela). Isso leva, para comparação final das paragéneses, a caracterizar primeiro a paragénese epitermal e comparar as paragéneses meso e hipotermiais anteriores destes jazigos com as de outros jazigos de sulfuretos e de cassiterite e volframite, respectivamente, das Beiras.

5.1. PARAGÉNESE EPITERMAL DOS JAZIGOS DE MINÉRIOS DE URÂNIO

Em primeiro lugar apresenta-se um quadro-síntese da mineralização primária epitermal dos jazigos uraníferos das Beiras e NNE do Alentejo, fundamentalmente baseado nos estudos de campo e principalmente laboratoriais a que procedi (Fig. 5). Contudo, não se deixaram de consultar trabalhos de interesse para este assunto e citados por FERREIRA *et al.* (1971) e PAGEL (1981).

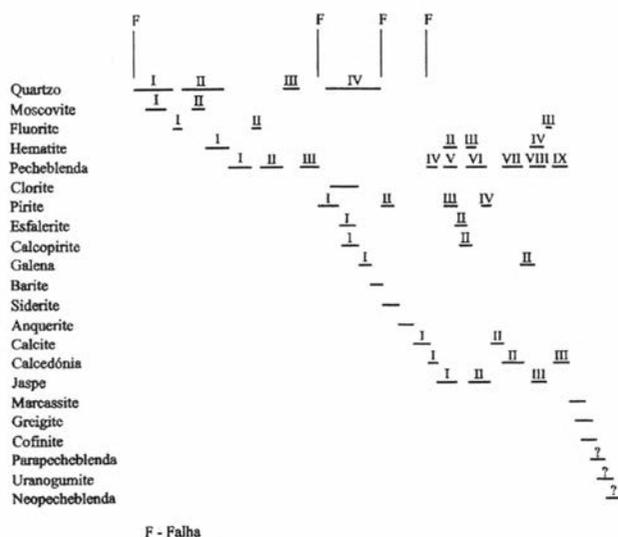


Fig. 5 – Quadro-síntese paragenético dos minerais primários de jazigos uraníferos epitermais de Portugal.

Quartzo, SiO₂ – São variadas e de extensões diferentes as gerações de quartzo, mas é possível discernir as seguintes:

Quartzo I – maciço, cristalino, grosseiro, leitoso, hipidiomorfo, que foi crescendo e ocupando a caixa da fractura do maciço rochoso desde as paredes, e envolvendo total ou parcialmente alguns fragmentos deste, e deixando vazios onde se formaram drusas e geodes com cristais prismáticos de terminais romboédricos e mais raramente de escalenoedros. Fica a grande dúvida se este quartzo não era o característico dos jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite e, até, de alguns dos jazigos mesotermiais de sulfuretos.

Quartzo II – de cristalinidade mais perfeita, idio a hipidiomorfos de crescimento zonado nítido, com bandas alternantes de quartzo leitoso, hialino, fumado (estas mais estreitas), róseo, ametista, e, por vezes, estreitíssimas películas de localização restrita de hematite preenchendo vazios e envolvendo fragmentos das rochas das paredes; todo o conjunto cristalino de aspecto radiado ou semirradiado (cocárdico), ficando drusas e geodes. Frequentemente, nestas drusas e geodes, há estreita zona de hematite e, às vezes, mais do que uma zona alternando com estreitas zonas de quartzo. Acima há pecheblenda maciça, em grinaldas, contemporânea da pecheblenda dos vazios do quartzo I, como exemplo em Bica, Carrasca e Urgeiriça.

Quartzo III – alotriomorfo, englobando esferulítios de pecheblenda II e moldando a pecheblenda maciça I e as grinaldas de pecheblenda sobre o quartzo das drusas e geodes, como, por exemplo, em Carrasca e Urgeiriça.

Quartzo IV – é idiomorfo, leitoso, por vezes hialino, contemporâneo da clorite e dos sulfuretos (pirite I, esfalerite I, calcopirite I e galena I), formando a parte interna do filão, ou das bandas quartzosas que diversos apresentam, deixando alguns vazios entre as paredes simétricas de crescimento das duas bandas. Contudo, este quartzo corroeu, nalguns jazigos, como em Carrasca, Urgeiriça, Bica, alguns cristais de pirite I.

Moscovite KAl₂[AlSi₃O₁₀](OH,F)₂ – Finas e pequenas palhetas hipidiomorfas disseminadas na ganga quartzosa; também, por vezes, em fendas e cavidades entre cristais de quartzo. Trata-se de moscovite hidrotermal, pela sua composição química; na geração I mostra estruturas contemporâneas de quartzo I, e a da geração II penetra fracturas de quartzo I e, por vezes, mostra estruturas de intercrescimento com quartzo II e, também, forma massas com aspecto de feltro.

Fluorite, CaF₂ – Em quantidade relativamente pequena, tem cristais cúbicos azuis, outros violetas claros que, junto da pecheblenda, passam a violetas escuros ou negros. Admitem-se três gerações de fluorite: a fluorite I, em cristais transparentes claros sobre o quartzo I; a fluorite II, com cristais transparentes claros a violetas sobre o quartzo II (cocárdico) e violetas escuros a negros sobre a pecheblenda I (maciça); a fluorite III, de cristais violetas escuros a negros sobre a pecheblenda colofórmica e, também, mas com cores claras, sobre outros minerais da jazida uranífera.

Hematite, Fe₂O₃ – Ocorre em pequenas massas moldando cristais de quartzo e em filonetes cortando estes. Também em pigmento, em zonas de cristais de quartzo; no jaspe, ocorrendo com este em diversas gerações, alternando no geral com gerações de pecheblenda coloidal, embora, por vezes, mais ou menos concomitante.

Pecheblenda, UO₂ – No geral parcialmente oxidada, aproximando-se de U₃O₈. É o principal minério dos jazigos uraníferos portugueses e ocorre de aspecto maciço e, mais frequentemente, de aspecto colofórmico. A pecheblenda de aspecto maciço (pecheblenda I) é compacta, muito densa, mas de estrutura colofórmica ao microscópio. Em luz reflectida, é cinzenta clara.

A pecheblenda tem muitas vezes aspecto bandado estreito, devido a alternância de estreitas bandas de pecheblenda colofórmica com bandas estreitas de jaspe e/ou calcedónia; e essas bandas de pecheblenda têm estrutura esferulítica, em que os esferulitos se associam em agregados densos de massas concrecionadas e com físsuras de retracção, umas radiadas e outras concêntricas, às vezes ocupadas por sulfuretos de Fe, Cu, Zn, Pb.

Outras vezes, as associações dos esferulitos no seio das massas de sílica coloidal (calcedónia ou jaspe) dispõem-se de formas variadas, como em “atoll”, ninho de abelhas, esquelectiforme, em cacho de uvas, poligonais, que se observam, por exemplo, no jazigo da Carrasca (PILAR, 1969).

Os teores de UO₂ são muito variáveis nas pecheblendas das Beiras por as relações U⁴⁺/U⁶⁺ serem também muito variáveis devido à variação de oxidação da pecheblenda. Também PbO é variável num esferulito de pecheblenda, com empobrecimento na sua periferia (PAGEL, 1961). Nas pecheblendas há, no geral, vestígios de Th. As dimensões da malha de pecheblenda em duas amostras da Urgeiriça (Nelas) e uma de Cunha Baixa (Mangualde) mostram (a₀) variando entre 5,404 e 5,425 Å, caindo nas pecheblendas consideradas como variscas (5,384 Å < a₀ < 5,44 Å), embora o parâmetro a₀ não possa ter carácter geocronológico (CATHELINÉAU *et al.*, 1982). Contudo, a sua geoquímica é semelhante à dos jazigos uraníferos franceses, embora, por vezes, com teores um tanto elevados de MnO (PAGEL, 1981).

São numerosas as fases paragenéticas da pecheblenda e, a partir da pecheblenda III, são difíceis de discernir umas das outras. Assim, considerou-se: a pecheblenda I em massas maciças e em guirlandas, ao microscópio com estrutura colofórmica, sobre e preenchendo fracturas do quartzo I e II e sobrepondo-se directamente às massas de hematite I; a partir, inclusivo, da pecheblenda II, as sequências da pecheblenda são macroscopicamente de estrutura colofórmica; a pecheblenda II envolveu parcialmente pecheblenda I, noutros casos sobrepôs-se-lhe; a pecheblenda III sobrepôs-se às anteriores, penetrou fracturas de quartzo III e, nalgumas geodes, sobrepôs-se a este. Depois terá havido uma apreciável lacuna paragenética da pecheblenda, cuja floculação, gelificação e exsicação é posterior a uma fase de

precipitação de sulfuretos, uma de barite e outra de carbonatos. Passou, então, a existir uma alternância de soluções coloidais, que acabaram por coagular, com formação alternada de bandas de pecheblenda IV com calcedónia I, pecheblenda V com jaspe I, pecheblenda VI com jaspe II, pecheblenda VII com calcedónia II; pecheblenda VIII com jaspe III, pecheblenda IX com calcedónia III, embora fiquem sempre dúvidas se não haveria mais fases similares com alternâncias e que foram cobrindo minerais anteriores e penetrando as fendas e fissuras desses e fracturas das rochas encaixantes. Encontram-se, às vezes, vénulas de pecheblenda que substituíram parcialmente calcite.

Clorite, $(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_{16}$ – alotriomorfa e hipidiomorfa, esta, no geral, com faces de clivagem. Verde, de aspecto micáceo, pleocróico. Ocorre como ripidolite e brunsvigite, que ocuparam fracturas dos cristais de quartzo, e também como palhetas dispersas no interior de quartzo IV, e, por vezes, penetrando ou inter crescendo com pirite, esfalerite e calcopirite I.

No jazigo de Ázere-Sinde, nos filões e vénulas de quartzo com minérios uraníferos, a ripidolite tem fórmula $(Mg_{4.76} Fe_{4.20}^{2+} Al_{2.82} Mn_{0.05} Ti_{0.01} Ca_{0.10} Na_{0.01} P_{0.01})_{\Sigma 11.87} [(Si_{5.34} Al_{2.66})_8 O_{20}] (OH)_{15.95} F_{0.05})_{\Sigma 16}$ e a brunsvigite fórmula $(Mg_{6.93} Al_{2.46} Fe_{2.42}^{2+} Na_{0.10} Ca_{0.03} Mn_{0.01} Ti_{0.01})_{\Sigma 11.96} [(Si_{5.62} Al_{2.38}) O_{20}] (OH)_{15.92} F_{0.08})_{\Sigma 16}$, a partir das composições de PINTO (2001), calculadas como em FOSTER (1962).

São estas duas clorites que ocorrem como minerais primários e também se encontram noutros tipos de jazidas de minérios primários uraníferos portugueses.

Pirite, FeS_2 – Ocorre, pelo menos, em quatro gerações: a pirite I, em idiomorfos cúbicos de faces estriadas e massas de grãos poligonais, sobre o quartzo e penetrando em vénulas fracturas deste mineral, da pecheblenda e, por vezes, das massas feltradas de moscovite e, não raro, apresenta aspectos de cataclastismo; a pirite II, alotriomorfa, em vénulas cortando a esfalerite I e penetrando fracturas do quartzo IV, e entre o quartzo e a esfalerite e entre esta e a galena I, substituindo-as parcialmente, e, também, penetrou pecheblenda das guirlandas e esferulítica; a pirite III, também alotriomorfa, algumas vezes, em vénulas muito finas, penetrou pecheblenda IV e agregados de esferulitos desta em matriz de jaspe, moldando-os e, por vezes substituindo-os parcialmente, como em Vale de Arca e outros; a pirite IV, também alotriomorfa, acompanhou parcialmente a formação de pecheblenda VI e, por vezes, penetrou onde já existiam vénulas de calcopirite II em fracturas de retracção concêntricas e radiais de esferulitos de pecheblenda, observando-se, também, algumas estruturas de substituição, como em Vale de Arca, Carrasca, Tapada dos Mercados e Urgeiriça.

Esfalerite, $(Zn,Fe)S$ – No geral em massas alotriomorfas; por vezes, em alguns cristais hipidiomorfos, outras vezes em grânulos, de cor alaranjada, amarela clara e acaramelada. Isotrópica, com reflexos internos (acaramelada e alaranjada, se contém algum Fe, e esbranquiçada com muito pouco Fe), ocorre em duas gerações.

Calcopirite, CuFeS₂ – Encontra-se, pelo menos, em duas gerações: a primeira e a segunda são, na maior parte, contemporâneas da esfalerite, em estruturas “*désalliage*” (em pontuações e vermículas na esfalerite); a segunda geração, em vénulas, penetrou fracturas da pecheblenda maciça, posteriormente à pirite, substituindo parcialmente os dois minerais, como em Vale de Cerca e outras jazidas; e, na Urgeiriça, penetrou a pirite III, e no contacto de esferulitos de pecheblenda com o jaspe e substituiu parcialmente a pirite; também em diversos jazigos, como na Urgeiriça e em Vale de Arcas, a calcopirite penetrou fracturas radiais e outras concêntricas de esferulitos de pecheblenda.

Galena, PbS – Encontra-se, em quase todos os jazigos, em duas gerações: a) a galena I, em massas cliváveis, com diversos cristais idiomorfos, penetrou fracturas, substituindo parcialmente pirite I, esfalerite I e calcopirite I, de que, por vezes, contém inclusões, e também penetrou fracturas do quartzo e da moscovite; b) a galena II, alotriomorfa, mostra, por vezes, relações estruturais de parcial contemporaneidade com pecheblenda VII e VIII e jaspe III; também esta galena moldou, penetrou e substituiu parcialmente esfalerite II e calcopirite II e, por vezes, vêem-se veios da galena II penetrando fracturas da pecheblenda colofórmica e, mais raramente, massas de barite, siderite, anquerite e calcite. Ao microscópio a galena tem brilho metálico e cor branca, é isotrópica e mostra cavidades triangulares típicas produzidas, no polimento, pelas clivagens.

Barite, BaSO₄ – Menos frequente que os carbonatos. Ocorre em massas e vénulas constituídas por cristais alotriomorfos, nacarados, leitosos, translúcidos, cliváveis, às vezes com fragmentos de quartzo e não raro com inclusões idiomorfas de pirite e galena, mas também encontra-se em vénulas penetrando fracturas do quartzo, de pecheblenda I a III, e de sulfuretos I. Mais raramente a barite encontra-se em cristais idiomorfos, com clivagens bem marcadas. Observa-se nalgumas jazidas, por exemplo em Nisa-Monte Claro e Urgeiriça.

Siderite, FeCO₃ – Pouco frequente, idiomorfa, em cristais romboédricos, castanho-acinzentados a castanho avermelhados, forrando cavidades entre cristais de quartzo e sobrepondo-se a faces destes; e em vénulas de alotriomorfos penetrando fracturas do quartzo, da pecheblenda (I a III) e, por vezes, com inclusões dos sulfuretos de primeira geração.

46 *Anquerite, Ca(Fe²⁺, Mg, Mn²⁺)(CO₃)₂* – Encontra-se em pequena quantidade, em capas cliváveis, cinzentas a brancas ou castanhas claras, sobre cristais de sulfuretos e de quartzo e em vénulas penetrando fracturas desses minerais e da pecheblenda. Vê-se, por exemplo, em Nisa-Monte Claro e Urgeiriça.

Calcite, CaCO₃ – Em massas brancas, cristalizadas, de clivagem romboédrica, de granulidade média a fina, preenchendo pequenas cavidades entre cristais de quartzo. Às vezes, sobrepe-se ao jaspe ou à calcedónia nessas cavidades, permitindo admitir uma segunda geração para a calcite. Em vénulas estreitas penetrou esfalerite II.

Calcedónia, variedade criptocristalina de quartzo (SiO₂); jaspe, variedade criptocristalina de quartzo (SiO₂+Fe₂O₃) – Massas esbranquiçadas, compactas a translúcidas de calcedónia são contemporâneas de alguns esferulitos de pecheblenda. Mas também massas avermelhadas de jaspe são contemporâneas de estreitas camadas de hematite, que por vezes, alternam com os conjuntos anteriores. Qualquer destas massas, forma vénulas, penetrando diversas fracturas de esferulitos de pecheblenda e substituindo-os parcialmente, como em Carrasca. Mas essas massas, posteriores aos carbonatos, são ulteriores ao quartzo IV e penetraram e moldaram parcialmente filões de quartzo; penetraram falhas rejogadas e cimentaram porções desses filões de quartzo. A calcedónia e o jaspe, em muitas e diversas jazidas uraníferas, deram origem, por recristalização, a quartzo microcristalino; este com numerosas inclusões pontuais ou aciculares de hematite, e aquele esbranquiçado, ceroso e translúcido. Observáveis, por exemplo, em Urgeiriça, Mocho, Valinhos, Picoto, Bica, Carrasca, Vale de Arca, Rosmaneira e tantos outros.

Até perto do final da paragénese epitermal, continuou alternadamente a floculação, gelificação e exsicação do jaspe e da calcedónia.

Sem ocorrência de minerais uraníferos, há, no Norte e Centro de Portugal, numerosas brechas filonianas, graníticas ou xistentas, quartzo-limoníticas, com poucos sulfuretos, e massas microcristalinas de calcedónia e jaspe.

Marcassite, FeS₂ – Encontra-se no geral em agregados de cristais tabulares maclados e em finas crostas sobre minerais preexistentes; por vezes em nódulos, e, sobre estes, cristais em crista de galo. É ulterior ao jaspe, à calcedónia e às pecheblendas colofórmicas, cujas fracturas por vezes penetrou. Ao microscópio é amarela esbranquiçada, por vezes tendendo a esverdeada clara, e anisotrópica em nicóis cruzados e com efeitos de cor. Ocorre em muitos jazigos, como, por exemplo, em Bica, Carrasca, Urgeiriça, João Antão, Cunha Baixa, Vale de Arca, Reboleiro, Tarabau, Ázere-Sinde, Nisa-Monte Claro.

Greigite, FeFe₂S₄ – Em nódulos, em crostas pulverulentas e pequenas massas sobre os minerais anteriores. Ao microscópio tem cor bronzeada a amarela clara e a acastanhada, colofórmica, no geral em esferulitos. Penetrou fracturas de esferulitos de pecheblenda, que parcialmente substituiu. Ulterior à pecheblenda colofórmica, por vezes acompanhada de cofinite e pequenos cristais de marcassite. Observou-se em diversas jazidas uraníferas, mas principalmente em Tapada dos Mercados, Vale de Arca, Ázere-Sinde.

Cofinite, U[SiO₄]_{1-x}(OH)_{4x} – Colofórmica, fibro-radiada, ocorre em vénulas e em indutos mais ou menos concrecionados. Tem cor castanha pálida a castanha-escura e é moderadamente pleocróica. Por vezes preenche fracturas do quartzo, do jaspe, ou da calcedónia, ou rodeia fragmentos destes minerais, com aspectos de ter havido substituições parciais deles pela cofinite. Bandas ou capas de cofinite alternam, por vezes, com bandas ou capas de greigite.

Parapecheblenda – A pecheblenda oxida-se e hidrata-se, transformando-se em parapecheblenda, isotrópica, com dureza e poder reflector menores do que os daquela. A epigenização dá-se a partir da periferia das massas, das fracturas e dos contactos da pecheblenda com outros minerais, conservando o aspecto concrecionado daquela, mas, aqui, com fissuras de retracção. Nos esferulitos, a epigenização dá-se desde a periferia das fissuras de retracção e das fendas tectónicas, o que se verifica, por exemplo, na Urgeiriça, no Reboleiro, na Senhora das Fontes. É possível, por vezes, diferenciar, na superfície polida, a parapecheblenda de epigénese das pecheblendas I e II, por a formada a partir da pecheblenda I ter maiores graus de oxidação e hidratação do que a epigénica da pecheblenda II. O ponto de interrogação (?) no quadro paragenético é para chamar a atenção que este mineral poderá ser já parcialmente secundário.

Uranogumite, $UO_3.nH_2O$ – Corresponde a termo genérico de óxidos de urânio, com Pb, Th, por vezes Fe^{3+} , Al, Mn^{4+} , Cu, Bi, P_2O_5 , CO_2 e SiO_2 , e de identificação mineralógica duvidosa por não ter composição definida. Com características colofórmicas, de cor negra a acastanhada, castanha avermelhada, vermelha alaranjada, amarela avermelhada, tem baixo poder reflector. Forma-se por modificação metassomática de pecheblenda, em que U^{4+} passa a U^{6+} por oxidação, havendo contemporaneamente hidratação, o que leva à formação de óxidos hidratados de U e, em parte, talvez contemporâneos de cofinite. Encontra-se em todos os jazigos uraníferos portugueses. O ponto de interrogação (?) no quadro paragenético é para chamar a atenção de que, em parte, este mineral pode ser secundário.

Neopecheblenda – Nos variados jazigos de minérios de urânio portugueses ocorrem finos esferulitos de pecheblenda, formando um conjunto pulverulento e constituindo estreitos indutos sobre minerais e rochas, preenchendo fracturas e estreitas cavidades. Estes esferulitos ocorrem muitas vezes disseminados entre os microgrãos de calcedónia e/ou jaspé e, por vezes, em associações de microesferulitos. Como esses microgrãos da calcedónia e/ou jaspé se terão formado quando da exsicação dos geles de sílica e/ou sílica jaspóide, a aglutinação dos microesferulitos de pecheblenda pode, então, ter-se efectuado. Em porções brechóides de caixas de falhas que atravessaram filões de quartzo e jaspé, como por exemplo na Urgeiriça, é essa massa de sílica jaspóide e pecheblenda que cimenta os fragmentos de quartzo.

A neopecheblenda será uma pecheblenda pulverulenta de ultimas gerações, ou já um mineral secundário da paragénese formada a partir de soluções coloidais, resultantes solubilização de pecheblenda e parapecheblenda, que depois gelificaram, exsicaram e evoluíram para os microesferulitos dispersos. Daí, também o ponto de interrogação (?) para a neopecheblenda.

5.2. A PARAGÊNESE MESOTERMAL PRIMÁRIA DE JAZIGOS DE SULFURETOS DAS BEIRAS

Para se aquilatar convenientemente de sobreposição da mineralização epitermal uranífera primária à mineralização mesotermal primária de sulfuretos, estudaram-se as associações minerais dos jazigos de Ceiroco (Pampilhosa da Serra), Forninho do Bispo (Castelo Branco), Ceife (Penamacor), Pinheiro (Penamacor), afastados dos jazigos de U. Síntese deste estudo está na Fig. 6.

As amostras foram por nós colhidas em 1947, 1953 e 1962 em locais das galerias das minas onde o acesso era possível e em escomboreiras. Foram-se fazendo os estudos macro e microscópicos, estes em luz transmitida e em luz reflectida, e arquivados, e, quando necessário, por difractometria de raios X.

Ultimamente os apontamentos foram concatenados e confrontados com o estudo do jazigo da Facuca da Serra do Marão (NEIVA, 1951).

Da bibliografia portuguesa, tem interesse consultar o trabalho de THADEU, 1951.

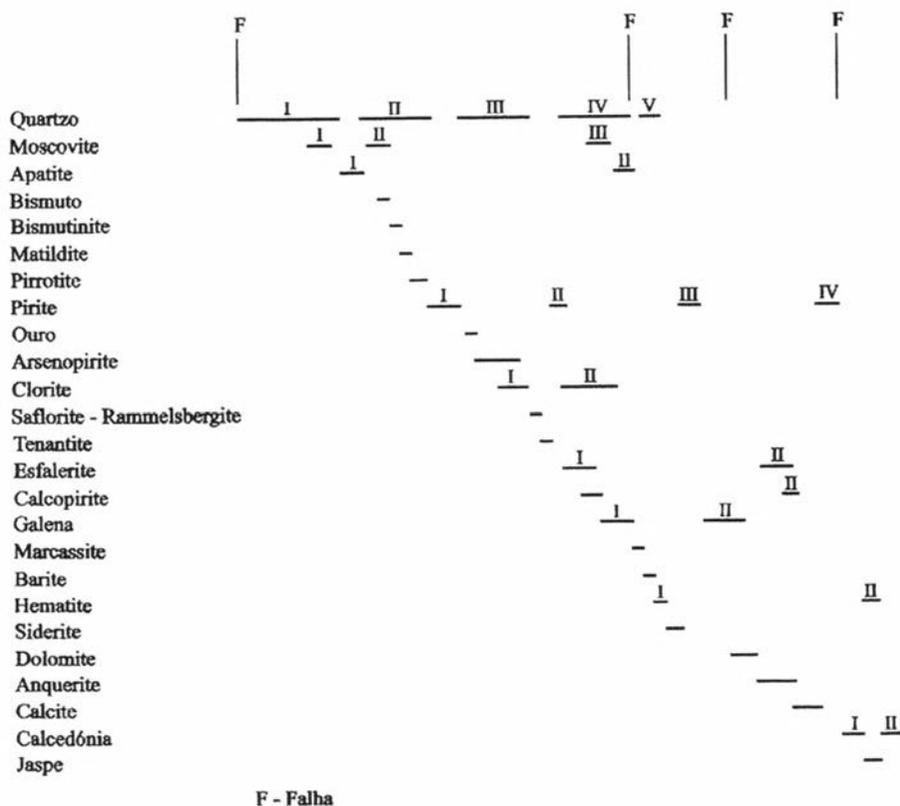


Fig. 6 - Quadro-síntese paragenético dos minerais primários de jazigos de sulfuretos mesotermais das Beiras.

Quartzo, SiO_2 – Este mineral ocorre, pelo menos, em quatro gerações: Quartzo I é no geral leitoso, alotriomorfo, de extinção ondulante, estrutura suturada, com inclusões fluidas alinhadas, que não ocorrem nos locais onde houve substituição parcial do quartzo por sulfuretos, e cimenta blocos de xisto ou de granito idênticos às rochas dos hasteais dos filões e, por vezes, com pequenas drusas e geodes; Quartzo II ocupa fracturas do quartzo I coincidentes com a direcção do filão, conferindo-lhe zonamento, por vezes com zonas de crescimento de cristais das paredes quartzosas para o centro das fracturas e com inclusões de moscovite sobre os quais se precipitaram alguns sulfuretos; Quartzo III encontra-se em cristais radiados ou semi-radiados de quartzo com crescimento zonado de quartzo leitoso e hialino, de estrutura cocárdica penetrando fracturas de quartzo, pirite e, por vezes, inter crescendo com arsenopirite; Quartzo IV é alotriomorfo, em massas de aspecto sacaróide, imediatamente anterior à marcassite e contemporâneo da fase sulfurada de esfalerite I, calcopirite I e galena I e associando-se, por vezes, às fâculas de moscovite hidrotermal; Quartzo V é hialino a leitoso, de tendência euédrica, forma vénulas que cortam as gerações de quartzo anteriores, a marcassite, os sulfuretos de primeira geração, a clorite e a moscovite hidrotermal. Também vénulas de quartzo dispõem-se parcialmente nos hasteais do filão, formando veios em que os cristais crescem dos hasteais de rochas e do filão quartzoso.

Moscovite, $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ – Ocorre em três gerações: Moscovite I - em cristais com faces de clivagem (001), no geral inter crescendo nos seus bordos com quartzo I; Moscovite II - em cristais alongados, finos, sobrepostos ao quartzo I nas pequenas geodes ou em filonetes penetrando fracturas deste quartzo, vendo-se por vezes inter crescimentos entre quartzo II e moscovite II; Moscovite III - contemporânea do quartzo IV, encontrando-se, por vezes, inter crescendo com este, tomando, às vezes, aspecto de feltro.

Apatite, $Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$ – Em idiomorfos e ocorrendo em duas gerações: Apatite I, cobrindo faces de pequenos cristais de quartzo I em drusas e geodes; Apatite II sobre cristais de pirite II e cristais de outros sulfuretos de primeira geração e quartzo III e IV.

Bismuto, Bi – Raro, granular, arredondado, branco de prata com matiz avermelhada. Ao microscópio, com brilho metálico, branco creme, anisotrópico. Observado em muito raras inclusões na pirrotite e na esfalerite.

50

Bismutinite, Bi_2S_3 – Raro, em alotriomorfos, branco metálico, fortemente anisotrópico. Observado em inclusões em zonas de crescimento do quartzo II.

Matildite, $AgBiS_2$ – Rara, em pequenas inclusões brancas, alotriomorfas, metálicas, na arsenopirite.

Pirrotite, $Fe_{1-x}S(x=0-0,2)$ – Em agregados, pouco frequentes, de cristais alotriomorfos, com maclas imperfeitas. Ligeiramente pleocróica entre creme pálido e cinzento muito claro, fortemente anisotrópica, e acompanhada, por vezes, de quartzo II.

Pirite, FeS₂ – Observa-se em diversas gerações: Pirite I – cúbica, de faces estriadas, metassomatizando um pouco os fragmentos de granito ou de xisto da caixa do filão; também em vénulas, preenchendo fracturas de quartzo I e II; Pirite II – em cristais sobre idiomorfos de quartzo II e III e também em crustificações sobre esses cristais das drusas e geodes; Pirite III – em finos cristais e em vénulas preenchendo fracturas dos sulfuretos de primeira geração, substituindo-os parcialmente, e em vénulas penetrando clorite; Pirite IV – também em finos cristais, revestindo algumas massas e cristais de carbonatos, e penetrando fracturas de quartzo V e de sulfuretos de segunda geração.

Ouro, Au – Raro, e também como electrum, em alotriomorfos no geral finos, inclusos na arsenopirite e, mais raramente, na esfalerite.

Arsenopirite, FeAsS – Ocorre em pequena quantidade, em massas de cristais idio a hipidiomorfos, mas, por vezes, de textura cataclástica se atravessada por falha.

Clorite, (Mg,Al,Fe)₁₂[(Si,Al)₈O₂₀](OH)₁₆ – Hipidiomorfa, pleocróica ($\gamma = \beta$ = verde, α = amarelo palha, ocorrendo em duas gerações: Clorite I – envolvendo alguns cristais de pirite I e penetrando algumas fracturas deles, e inter crescendo com alguns cristais de arsenopirite; Clorite II – molda algumas massas de cristais de arsenopirite I e penetrou algumas fracturas deste, e mostra algumas estruturas de inter crescimento com esfalerite, calcopirite e rara galena I.

Saflorite, (Co,Fe)As₂ – Rammelsbergite, NiAs₂ – Muito rara, ocorre na mina do Pinheiro em pequenas inclusões e vénulas de brilho branco metálico, tornando-se acinzentado quando inclusa na esfalerite ferrífera.

Tenantite, (CuFe)₁₂As₄S₁₃ – Muito rara, granular, alotriomorfa, negra, de brilho metálico, em inclusões na esfalerite ferrífera.

Esfalerite, (Zn,Fe)S – Ocorre em duas gerações: Esfalerite I – em massas cliváveis, escuras, alongadas segundo a direcção do filão, por vezes em pequenas geodes e drusas com alguns idiomorfos cobertos, parcialmente por anquerite enédrica, e não raro em pequenas lenticulas, tratando-se de esfalerite ferrífera, de maclas polissintéticas, com “désalliajes” de calcopirite, e em pequenas vénulas penetrando fracturas do quartzo, da pirite e da arsenopirite; Esfalerite II – em massas de grão mais fino, também com “désalliajes” de calcopirite, de cor castanha avermelhada a amarela cerosa, envolvendo massas de galena nodulares e algumas bem menores, e em vénulas cortou sulfuretos de primeira geração e o quartzo e, por vezes, penetrou no contacto de vénulas de galena, que substituiu parcialmente.

Calcopirite, CuFeS₂ – Alotriomorfa. Referiram-se as “désalliajes” na esfalerite. Forma veios estreitos e ocorre em duas gerações: Calcopirite I – vénulas penetram fracturas do quartzo, da clorite e dos sulfuretos já formados; Calcopirite II – vénulas cortaram a galena II, penetraram entre o quartzo e a pirite e substituíram parcialmente a esfalerite II e I.

Galena, PbS – Ocorre, pelo menos, em duas gerações: Galena I – em massas e nódulos cliváveis, encimados por idiomorfos cúbicos e octaédricos, com frequência

dispostos, segundo o alongamento do filão, em fracturas do quartzo. Com frequência essas massas mostram-se onduladas e de clivagens um pouco torcidas. Vénulas estreitas de galena cortam esfalerite I, arsenopirite, pirite e clorite; Galena II – massas de grão mais fino que as de galena I ocorrem em vénulas penetrando os sulfuretos de primeira geração e impregnando fragmentos xistentos ou graníticos da brecha filoniana e, também, sobrepondo-se à galena I, a outros sulfuretos e ao quartzo.

Marcassite, FeS_2 – Amarela esbranquiçada, tendendo a esverdeada clara, anisotrópica, em agregados de cristais tabulares. Formou-se por metassomatismo parcial da pirrotite e da pirite, sendo ulterior à galena I, por haver penetrado algumas clivagens e fracturas desta, e anterior à barite por, embora raramente, nela se encontrar em inclusões.

Barite, $BaSO_4$ – Branca, leitosa, nacarada, translúcida, em massas granulares, cliváveis, por vezes envolvendo nódulos de galena I e em vénulas penetrando fracturas de galena I, esfalerite I, pirite I e II, clorite e quartzo, contendo, também, inclusões destes minerais.

Hematite, Fe_2O_3 – Em pequenas massas, substituindo parcialmente pirite I e II; na segunda geração foi contemporânea do jaspe e talvez se tenha formado a partir da pirite ou da siderite.

Siderite, $FeCO_3$ – Castanha acinzentada, encontrando-se em algumas cavidades entre cristais de quartzo e forrando-as com cristais romboedrais. Algumas fracturas dos sulfuretos e do quartzo foram penetradas por este mineral.

Dolomite, $CaMg(CO_3)_2$ – Em cristais romboédricos grosseiros a finos, dominando estes em associações lembrando ninhos. Em vénulas penetrou fracturas de esfalerite I e, por vezes, revestiu nódulos deste mineral, que, por sua vez, foram revestidos por finos cristais de pirite IV.

Anquerite, $Ca(Fe^{2+}, Mg, Mn^{2+})(CO_3)_2$ – Cinzenta esbranquiçada a castanha clara e mais raramente amarela cerosa. Forma massas cliváveis depositadas sobre sulfuretos e quartzo, e também ocorre em vénulas que preencheram algumas fracturas destes minerais. Dos carbonatos, parece ser o que ocorre em maior quantitativo.

Calcite, $CaCO_3$ – Encontra-se em massas de cristais pequenos, por vezes ocupando vazios entre associações de outros minerais do filão, lembrando ninhos. Em vénulas penetrou fracturas dos sulfuretos, excepto da pirite IV que a recobre de pequenos cristais.

Calcedónia (variedade criptocristalina de quartzo, SiO_2) e *jaspe (variedade criptocristalina de quartzo, $SiO_2 + Fe_2O_3$)* – Movimento de falha ao longo dos filões brechóides quartzosos deu fracturas alongadas segundo estes, que foram preenchidas por calcedónia, compacta, esbranquiçada, de duas gerações: calcedónia I, anterior ao jaspe, e calcedónia II, subsequente ao jaspe, visto que vénulas desta calcedónia o atravessam. O jaspe é contemporâneo de hematite II, que ocorre em pequena quantidade, e vénulas de jaspe cortam calcedónia I. Tanto a calcedónia como o jaspe têm estrutura colofórmica, e formaram-se a partir de soluções coloidais, por floculação, gelificação e exsicação.

5.3. A PARAGÊNESE HIPOTERMAL PRIMÁRIA DE JAZIGOS DE CASSITERITE E VOLFRAMITE DAS BEIRAS

Entre 1940 e 1943 estudei jazigos deste tipo do norte e centro de Portugal (NEIVA, 1944), mas muitos apontamentos e amostras foram guardados. Agora foram revistos os apontamentos e estudos das amostras de Bejanca-Carvalho, reestudados os apontamentos de campo, e estudadas as amostras e suas lâminas delgadas e superfícies polidas de Regoufe (Arouca), Peroviseu (Fundão), Queirã (Vouzela) e Panasqueira (Covilhã), e elaborado um quadro-síntese da para-gênese primária dos jazigos de cassiterite e volframite referenciados (Fig. 7).

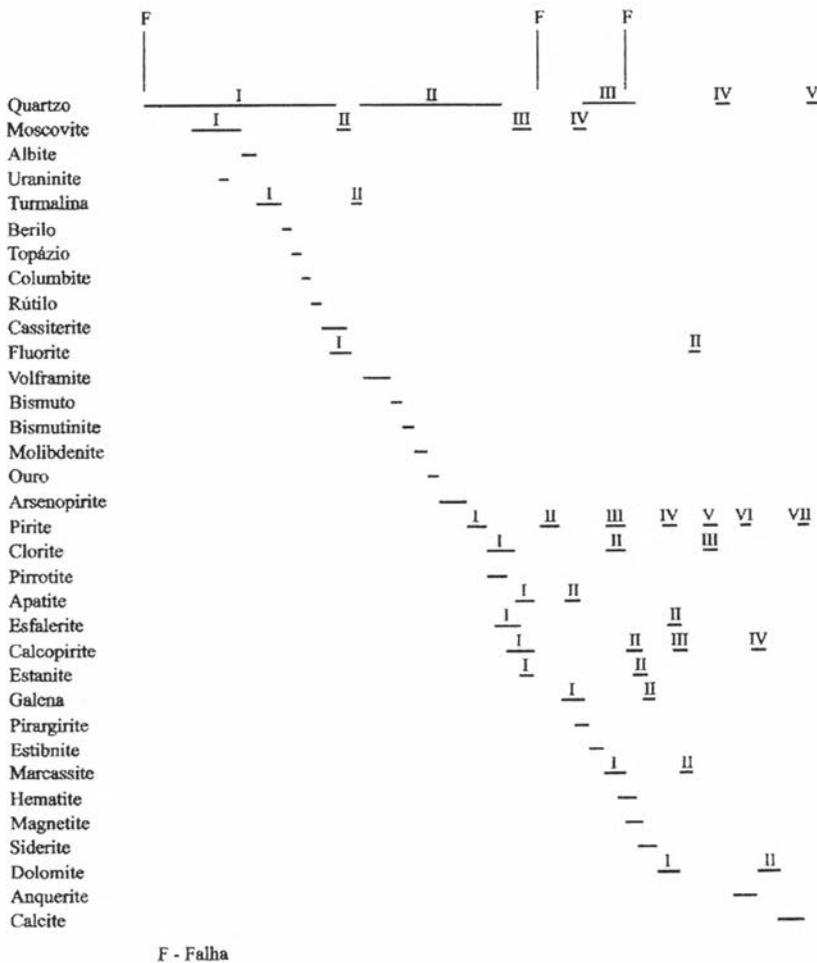


Fig. 7 - Quadro-síntese paragenético dos minerais primários de jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite das Beiras.

Da bibliografia portuguesa e para esta finalidade, têm interesse trabalhos de BEBIANO (1940), NEIVA (1944), THADEU (1951, 1973), KELLY & RYE (1979).

Quartzo, SiO_2 – No geral leitoso a ligeiramente acinzentado, com algumas drusas e geodes com idiomorfos prismáticos encimados por dois romboedros complementares, e raramente um escalenoedro, correspondendo, no geral, ao quartzo I. Vénulas de quartzo II atravessam cristais de turmalina, rútilo, cassiterite, volframite e os sulfuretos de maior temperatura até à pirrotite, moldando, por vezes, massas e cristais dos minerais referidos. Vénulas de quartzo III cortam massas, cristais e vénulas de clorite I e II e sulfuretos I até marcassite. Quartzo IV, leitoso a hialino, corta pequenas massas e vénulas de pirite, marcassite, hematite, clorite, siderite e dolomite. A pequena geração de quartzo V, leitosa e hialina, em vénulas, corta massas de carbonatos e fecha a paragénese mineral primária.

Moscovite, $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH,F)_2$ – Hipidiomorfa, com faces de clivagem. Há algumas estruturas de intercrescimento de moscovite I e quartzo I e de moscovite II e cassiterite; esta moscovite, por vezes, incrustou albite e penetrou fracturas de quartzo, turmalina, berilo, topázio e cassiterite. Moscovite III e IV penetraram fracturas de volframite e sulfuretos até a galena I.

Albite, $NaAlSi_3O_8$ – Em pequena quantidade, idiomorfa, incrusta alguns cristais de quartzo e de moscovite I.

Uraninite, UO_2 – Raríssima, em inclusões idiomorfas na columbite.

Turmalina – Deste mineral, o vulgar é a *escorlite*, $NaFe_3^{2+}Al_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_3(OH)$, e raramente a *foitite*, $Fe_2^{2+}AlAl_6Si_6O_{18}(BO_3)_3(OH)_3(OH)$. São idiomorfos, de pleocroísmo ω = castanho escuro, por vezes azulado na foitite, ϵ = castanho muito claro. As duas turmalinas distinguem-se quimicamente (HAWTHORNE *et al.*, 1999). A segunda geração é imediatamente superior à da fluorite I.

Berilo, $Be_3Al_2Si_6O_{18}$ – Pouco frequente, idiomorfo, de hábito colunar, esverdeado claro, sobreposto a quartzo I e, por vezes, substituindo-o parcialmente.

Topázio, $Al_2SiO_4(F,OH)_2$ – Raro, branco a hialino, idiomorfo, substituindo parcialmente quartzo I.

Columbite, $(Mn,Fe)(Nb,Ta)_2O_6$ – Rara. Encontra-se, por vezes, como inclusão idiomorfa e outras vezes como exsolução na cassiterite.

Rútilo, TiO_2 – Pouco frequente. Em pequenos idiomorfos, de hábito colunar, por vezes aciculares.

54

Cassiterite, SnO_2 – Idiomorfa, por vezes em cristais maclados. Com bandas coloridas, castanho-amareladas a castanho-avermelhadas, pleocróicas. Por vezes substituiu o quartzo I, não raro acompanhada de moscovite II.

Fluorite, CaF_2 – Idiomorfa, cúbica, encontra-se em duas gerações: uma em parte contemporânea e subsequente à de cassiterite, e a outra imediatamente superior à esfalerite II.

Volframite, $(Mn,Fe)WO_4$ – Idiomorfa a, por vezes, hipidiomorfa. Penetrou e parcialmente substituiu quartzo I e, por vezes, envolveu parcialmente a cassiterite.

Bismuto, Bi – Raro. Em cristais idio a hipidiomorfos e inclusos em arsenopirite e no quartzo.

Bismutinite, Bi₂S₃ – Raro, com raríssimas inclusões de bismuto, substituindo parcialmente o quartzo.

Molibdenite, MoS₂ – Pouco frequente. Maciça, foliada, cinzenta azulada, metálica, com poder reflector inferior ao da galena e de elevada anisotropia. Raramente envolvendo bismutinite.

Ouro, Au – Em raros cristais e em alotriomorfos, incluso na arsenopirite e em pirite I.

Arsenopirite, FeAsS – Ocorre em massas de cristais idiomorfos. Vénulas de arsenopirite penetraram fracturas da volframite.

Pirite, FeS₂ – No geral idiomorfa, dominando os cristais de reduzidas dimensões. Ocorre em variadas gerações: a primeira foi imediatamente anterior à pirrotite; a segunda envolveu parcialmente a estanita e vénulas penetraram fracturas dos sulfuretos de geração I; a terceira foi contemporânea e intercrescida com marcassite I e a clorite II, e envolveu parcialmente e penetrou fracturas da estibnite; a quarta foi contemporânea da dolomite I; a quinta foi contemporânea da clorite III; a sexta da anquerite; vénulas da sétima foram cortadas por vénulas de quartzo V.

Clorite, (Mg,Al,Fe)₁₂[(Si,Al)₈O₂₀](OH)₁₆ – Hipídio a alotriomorfa, verde, pleocróica. Encontra-se como ripidolite e brunsvigite. Ocorre em três gerações: a primeira de ripidolite, em grande parte contemporânea de pirrotite e da esfalerite I; a segunda contemporânea de pirite III e da marcassite I; a terceira, de brunsvigite, semirradial e vermicular, contemporânea da pirite V.

Pirrotite, Fe_{1-x}S (x = 0-0,2) – Não ocorre em apreciável quantidade, pois alterou-se hipogenicamente para marcassite. Encontram-se aspectos de intercrescimento de pirrotite, esfalerite I e calcopirite I, mas há vénulas destes dois sulfuretos que a penetraram, raramente acompanhados de estanita I.

Apatite, Ca₅(PO₄)₃(OH,F,Cl) – Idiomorfa, prismática. Encontra-se em duas gerações: a primeira penetrou pirrotite e a clorite I; a segunda, contemporânea da galena I, sobrepôs-se à esfalerite I, calcopirite I e estanita I.

Esfalerite, (Zn,Fe)S – Encontra-se em duas gerações: Esfalerite I, no geral em massas cliváveis, negras, a castanhas escuras, por vezes de tendência avermelhada, não raro encimadas por alguns idiomorfos tetraédricos, contemporâneas de clorite I, e vénulas desta esfalerite penetraram quartzo I e II, pirite I e arsenopirite; Esfalerite II, em que aquelas massas têm cor acastanhada mais clara, embora com as “desalliages” de calcopirite semelhantes à da geração da esfalerite I, e vénulas de esfalerite II cortam cristais e veios da segunda e primeira gerações de calcopirite, estanita e galena.

Calcopirite, CuFeS₂ – Alotriomorfa, tendo sido possível discernir quatro gerações: a primeira e a terceira são em grande parte contemporâneas, respectivamente, de esfalerite I e II, nestas ocorrendo em “desalliages” e em vénulas que as atravessam; na segunda geração, em vénulas que cortam sulfuretos de primeira

geração; a da terceira geração tem vénulas que cortam a dolomite; e a da quarta geração com vénulas que atravessam a anquerite.

Estanite, Cu_2FeSnS_4 – Em pequena quantidade, no geral alotriomorfa, ocorrendo em duas gerações: a primeira sobrepondo-se em grande parte à calcopirite I e esfalerite I e com elas intercrescendo; e a segunda, em raras e estreitas vénulas, cortando esfalerite, calcopirite e galena da primeira geração.

Galena, PbS – Principalmente em massas cliváveis, por vezes encimadas por idiomorfos cúbico-octaédricos. Encontram-se duas gerações: a primeira é imediatamente posterior à da pirite II, pois vénulas de galena I cortam esta pirite e os sulfuretos da primeira geração; a segunda, em vénulas e pequenas massas, corta vénulas da calcopirite II e estibnite.

Pirargirite, Ag_3SbS_3 – Pouco frequente, em alotriomorfos. Em luz reflectida é de cor branca metálica, com poder reflector elevado, mas mais baixo que o da galena. Encontra-se em inclusões na galena I ou como exsoluções e, por isso, se considerou em grande parte contemporânea deste mineral.

Estibnite, Sb_2S_3 – Pouco frequente, em massas alotriomorfas grosseiras. Em luz reflectida é metálica, branca, de brilho semelhante ao da galena ligeiramente mais sombrio, com pleocroísmo de reflexão. Em dúvida, colocámo-la como subsequente à pirargirite e antecedendo a marcassite.

Marcassite, FeS_2 – Formou-se, em grande parte, por alteração hipogénica da pirrotite e ocorre raramente intercrescida com pirite III e alguma clorite II.

Hematite, Fe_2O_3 – Rara. Talvez formada por alteração hipogénica da pirrotite, ocorrendo sob forma de especularite, em pequenas placas e acúlos. Daí a posição em que foi colocada na paragénese.

Magnetite, $Fe^{2+} Fe^{3+}_2 O_4$ – Encontra-se em alguns cristais intercrescidos com os de marcassite I e pirite III e, muito provavelmente, resultantes também da alteração hidrotermal da pirrotite. Contudo, pode-se ter formado por oxidação da hematite quando dos movimentos da 3ª falha que afectou os jazigos.

Siderite, $FeCO_3$ – Em massas cristalinas e em idiomorfos romboédricos, ligeiramente acastanhados, recobrimdo porções de alguns cristais de quartzo, volframite e sulfuretos de primeira geração. Mas há aspectos estruturais em que a siderite é contemporânea da galena II, estanite II e, em parte, da calcopirite II.

Dolomite, $CaMg(CO_3)_2$ – Em cristais esbranquiçados, rombo-discóides, e em massas finamente cristalinas recobrimdo algumas faces de cristais de quartzo, cassiterite, volframite e sulfuretos. A dolomite I é contemporânea da pirite IV e parcialmente da esfalerite II e da calcopirite III. A dolomite II é contemporânea da calcopirite IV e subsequente da anquerite, pois vénulas desta dolomite preencheram algumas fracturas deste carbonato.

Anquerite, $Ca(Fe^{2+}, Mg, Mn^{2+})(CO_3)_2$ – Ocorre, talvez, em menor quantidade que os outros carbonatos. É cinzenta esbranquiçada, formando massas cliváveis, recobrimdo alguns minerais anteriores. É contemporânea da pirite VI.

Calcite, $Ca(CO_3)$ – Será o último carbonato a ter cristalizado, de cor branca a ligeiramente acinzentada, havendo cristais romboédricos e finas massas cristalinas que, tal como os outros carbonatos, recobre parcialmente conjuntos cristalinos de minerais anteriores. Há ligeira sobreposição da pirite VII no final da cristalização da calcite.

6. O METAMORFISMO HIDROTHERMAL PRODUZIDO EM ROCHAS ENCAIXANTES DE MINERALIZAÇÕES EPITERMAL, MESOTERMAL E HIPOTERMAL

6.1. O METAMORFISMO PRODUZIDO NOS GRANITOS PELA MINERALIZAÇÃO EPITERMAL URANÍFERA

Este metamorfismo estudou-se primeiro na mina da Urgeiriça, no contacto com o filão de minérios uraníferos (NEIVA, 1953), e depois na Serra da Estrela, principalmente na região da Lagoa Comprida, no contacto com filões de quartzo e calcedónia (NEIVA *et al.*, 1987).

Na mina da Urgeiriça (Nelas)

Na região da mina da Urgeiriça (Nelas), o granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico (γ_{3b}^{II}) é semelhante ao da Lagoa Comprida, na Serra da Estrela. No contacto do filão principal de quartzo e jaspe com minérios uraníferos da Urgeiriça, as principais modificações hidrotermais que esse granito sofreu decrescem a partir do contacto até cerca de 10 m*. Até 2 m do contacto há intensa *moscovitização* da plagioclase, menor da microclina e bastante menor do quartzo; e alteração da ilmenite para hematite e *hematitização* da microclina vão até cerca de 10 m do contacto, embora nalguns locais até 5 m.

A microclina está parcialmente moscovitizada, o que se efectuou da periferia para o interior dos cristais. É a porção central dos cristais de microclina que ainda se mantém e está hematitizada por impregnação de pigmentos hematíticos aciculares. Também há aspectos de *silicificação*, em que finas vénulas de quartzo, lembrando arabescos, penetraram a microclina.

A plagioclase foi totalmente moscovitizada, cujas fâculas de moscovite, no seu conjunto, tomam aspecto de feltro, mas, por vezes, com arranjo semi-esferulítico.

A biotite sofreu *descoloração* e as inclusões de zircão perderam os halos pleocróicos; e também *cloritização*, para esferulitos e vermiculitos (arranjo semi-radiado e completamente direccionado) de brunsvigite, acompanhada de exsolução de rútilo.

A moscovite recristalizou, e por vezes encontra-se, nos bordos de alguns cristais, aspectos de moscovitização hidrotermal centrípeta.

* Análises químicas, modas, normas, perdas e ganhos estão referidas em NEIVA, 1953.

O quartzo tem as mesmas características que no granito inalterado, mas com *moscovitização* no bordo anédrico de alguns cristais, e, mais raramente, em plagas, é penetrado por pigmentos hematíticos.

Silicificação corresponde a aumento apreciável em SiO_2 , em parte resultante da moscovitização hidrotermal da plagioclase e parcial da microclina. Também se deu por neoformação hidrotermal em que a sílica penetrou fracturas da microclina e tomou carácter jaspóide em algumas fracturas da rocha alterada.

A perda em TiO_2 deu-se quando da *cloritização* da biotite e da alteração da ilmenite para hematite. Ti terá sido levado por solução hidrotermal.

A perda de Al_2O_3 resultou da moscovitização hidrotermal da plagioclase e parcial da microclina, e o Al migrou na solução hidrotermal.

Na *hematitização*, houve enriquecimento, relativamente pequeno, em Fe_2O_3 quando da descoloração e cloritização da biotite e que foi impregnar as clivagens e fracturas da microclina, avermelhando-a no seu conjunto, e impregnando algumas porções de moscovite hidrotermal. Mas houve apreciável perda em FeO, que, levado por solução hidrotermal, precipitou no filão da Urgeiriça primeiro como hematite, por oxidação, e depois, mobilizada em soluções ulteriores, floculou, gelificou e exsicou com o SiO_2 dando jaspe, que, mais tarde, tomou carácter microgranular. Isso foi contemporâneo ou ligeiramente alternante com floculação, gelificação e exsicação da pecheblenda no filão. No seu conjunto, a alteração do granito levou a perda apreciável do Fe total deste.

É natural que o aumento em Mn esteja correlacionado com a pigmentação hematítica da microclina; pode ocorrer por isomorfismo com Fe.

A perda ligeira de MgO pode correlacionar-se com a descoloração da biotite. Esse Mg foi levado pela solução hidrotermal.

A perda em CaO do granito explica-se pela *albitização* inicial da plagioclase, que se transformou em albite, como aconteceu nalguns locais da Serra da Estrela, e migrou na quase totalidade na solução hidrotermal. Contudo, uma pequena parte do Ca, com algum Al, Fe^{3+} e Si, deu origem a *epidotização*, com formação de poucos cristais de epidoto (pistacite) depois da cloritização da biotite.

O aumento em K_2O estará relacionado principalmente com a moscovitização hidrotermal da plagioclase e de algum quartzo.

58 A perda apreciável em Na_2O foi principalmente devida à moscovitização da plagioclase e o Na levado pela solução hidrotermal.

O aumento em P_2O_5 foi devido a possível neoformação de alguns cristais de apatite e mais recentemente à formação, nalgumas fracturas do granito alterado, de alguns cristais de torbernite, mineral que explica o aumento de UO_3 nesta rocha.

Na Lagoa Comprida (Serra da Estrela)

Também na Serra da Estrela domina o granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico que, no contacto com filões de quartzo e calcedónia, estéreis,

implantados em falhas e zonas de cisalhamento, se modificou para granito róseo e granito vermelho*. Estas modificações implicaram pequenas mudanças de volume, sendo os factores (f_v) de 0,89 e 1,08, respectivamente, para o granito róseo e o granito vermelho.

Na passagem ao granito róseo, a plagioclase sofreu *albitização*, de An_{30-6} passou a An_{5-2} , e na matriz de An_{16-4} a An_{3-2} , por perda da molécula anortítica, perdendo Ca e Sr e enriquecendo em Na; e o feldspato potássico (microclina-mecropertítica) sofreu pequena *ortosifização*, passando nos fenocristais de Or_{91-88} a Or_{94} e na matriz de Or_{95-91} a Or_{97} , com enriquecimento em K e perda em Na. E esse reequilíbrio dos feldspatos ter-se-á iniciado a uma temperatura estimada de cerca de 400° C.

A moscovite do granito terá recristalizado a cerca de 420° C no granito róseo, e contém menos Al^{IV} , Ti, Fe^{2+} , K, F, Li, Zn e mais Si, Fe^{3+} , Mg, Cr, Ni, Zr, Ba, Rb, Cs do que a moscovite do granito inalterado. Nesse granito róseo, o $\log(f_{H_2O}/f_{HF})$, de valores 4,4-4,6, da solução em equilíbrio com a moscovite recristalizada, é mais elevado que no granito inalterado (3,7). A primeira *moscovitização* hidrotermal, parcial, da plagioclase e menor da microclina, ter-se-á efectuado a temperatura estimada de 340°-310° C; e essa moscovite tem mais Si, Fe, Mg, K e menos Ti, Al^{IV} , Na e também menos conteúdo paragonítico do que a moscovite recristalizada.

A ilmenite sofreu *hematização*, alterando-se para hematite e libertando Ti.

A biotite do granito inalterado vai sofrendo descoloração, perdendo parte do Fe_t ; e, a certa altura, sofreu *cloritização*. No granito róseo forma-se clorite subédrica (ripidolite) e clorite esferulítica ou vermiforme (ripidolite e/ou brunsvigite), podendo estimar-se a formação destas clorites a cerca de 260°-240° C. Em relação à biotite do granito inalterado, a clorite subédrica tem mais Al, Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mn, Mg, Cr, V, Zn, Ni, menos Si, tendo Ti, Na, K, Cl, F, Nb, Sn, Li, Y, Sc, Ba, Rb, Cs, Ta, Sr, Cu passado praticamente a zero, e mantendo Zr. A clorite esferulítica em relação à clorite subedral tem mais Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mn, Mg, Ca, Na e menos Si, Al.

O ganho de $Fe_2O_3_t$ do granito róseo ficou praticamente neste como pigmento hematítico na microclina (*hematitização*).

Na passagem do granito róseo a vermelho, a plagioclase dos fenocristais sofreu outra *albitização*, de An_{5-2} passou a An_{2-0} , e os cristais da matriz de An_{3-2} a An_0 , acabando a molécula anortítica por quase desaparecer dos fenocristais e a plagioclase da matriz ser totalmente albite (enriquecimento em Na e perda em Ca). No feldspato potássico, os fenocristais aumentaram ligeiramente a ortosifização, passando de Or_{94} a Or_{95} , com leve aumento em K e perda em Na. E é muito provável que o reequilíbrio dos feldspatos se continuasse dos granitos róseos aos vermelhos, atingindo nestes a temperatura estimada de 350° C.

* Análises químicas, modas, normas, perdas e ganhos das rochas e geoquímica dos minerais estão indicados em NEIVA *et al.*, 1987.

A plagioclase sofreu intensa *moscovitização* hidrotermal, bem maior que o feldspato potássico, a temperatura estimada entre 310°-280° C, e com aspecto de feltro ao microscópio. Essa moscovite tem mais Fe, Mg, K e menos Si, Ti, Al^{VI}, Na do que a moscovite hidrotermal do granito róseo.

Biotite é inexistente; e a clorite ocorre em pequena quantidade, é do tipo brunsvigite, esferulítica ou vermiculítica, com mais Si, Fe³⁺, Mg e menos Al, Fe²⁺, Mn, sendo constante Na, que a ripidolite (só existente no granito róseo), e formada próximo dos 240°-230° C; é uma clorite oxidada. Essa brunsvigite esferulítica, em relação à clorite subedral (ripidolite) do granito róseo, tem mais Si, Fe³⁺, Mg, Na, H₂O+, Zr, Sc, Y, menos Fe²⁺, Mn, Cr, V, Zn, Li, é constante Al, e são praticamente nulos ou quase Ti, Ca, K, Nb, Sn, Cu, Ba, Cs, Ta.

E o pigmento hematítico (*hematitização*) aumentou na microclina e atingiu, por vezes, o quartzo.

Avaliando pela técnica de GRESEN (1956) as mudanças, na Lagoa Comprida da Serra da Estrela, a passagem do granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico a granito róseo vê-se que é acompanhada de ganho em SiO₂, Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, U e muito ligeiro em TiO₂, Al₂O₃, MgO e perda em CaO, F, Zn, Li, Sr, Pb, Ba, Rb, mantendo-se praticamente constante os teores (ppm) de Cr, Nb, Ni, Zr, Cu, Sc, Y, Ta, Th, Hf e quase nulos os de Sn, Cs. E da comparação dos teores das REE, depois de normalizados daqueles granitos com os condritos, vê-se que o granito róseo enriqueceu ligeiramente em Yb, o que pode ser explicado pela cloritização da biotite.

Também na região da Lagoa Comprida, a passagem do granito róseo a granito vermelho é acompanhada de ganho em Al₂O₃, Fe₂O₃ (embora haja perda em Fe), Na₂O, K₂O, perda em SiO₂, FeO, CaO, F, Zn, Li, Ba, Rb, U e ligeira em TiO₂, Ta, Th, mantendo-se praticamente os teores de MnO, MgO, P₂O₅, Cr, Ni, Zr, Cu, Sc, Y, Hf e quase nulos os de Sn, Cs. E nas REE normalizadas terá havido ligeiro ganho em La e ligeira perda em Y, Lu.

A razão Fe²⁺/ΣFe decresce durante a alteração hidrotermal do granito, atingindo o menor valor no granito vermelho. Isto mostra progressiva oxidação dos fluidos.

Como conclusões salienta-se:

- O granito porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico foi hidrotermalmente alterado para granito róseo e granito vermelho. As modificações mineralógicas foram albitização, ortosificação, moscovitização, cloritização, hematitização e, por vezes, silicificação, e principalmente acompanhadas de adição de Na₂O e K₂O e perda em SiO₂, CaO, F, Zn, Li, Ba e Rb. E essa alteração foi acompanhada de progressiva oxidação. As modificações mineralógicas ter-se-ão iniciado a cerca de 1-1,5 Kb, a 400°-350° C, e prosseguiram até 260°-230° C, e nelas estarão empenhados fluidos relacionados com as últimas fases da solidificação do granito misturados com água meteórica predominante, esta infiltrada ao longo de falhas e

cisalhamentos extensos e profundos (NEIVA *et al.*, 1987), o que é sugerido pelas perdas em Ca, F, Zn, Li, Ba e Rb.

- SiO₂ foi reprecipitado, no geral em falhas e cisalhamentos, como filões de quartzo, por vezes floculado, gelificado e exsicado como calcedónia e, outras vezes, juntamente com Fe₂O₃, floculado, gelificado e exsicado como jaspe (hoje, grande parte dessa calcedónia e desse jaspe estão transformados em quartzo microcristalino). Fe₂O₃ precipitou, nos filões de quartzo e jaspe, também como hematite. Isso ter-se-á efectuado em meio oxidante. Em meio redutor, com presença de H₂S, da solução transportadora de U (mobilizado principalmente de uraninite e de outros acessórios com U menores do granito), este terá oxidado, floculado, gelificado e exsicado como pecheblenda, alternando, por vezes, com aquela hematite e pirite.

6.2. METASSOMATISMO NAS ROCHAS DO CONTACTO PRODUZIDO POR JAZIGOS MESOTERMAIS DE SULFURETOS

Em Portugal, o estudo desse metassomatismo fez-se principalmente em jazigos de sulfuretos e ouro, como o jazigo de Jales (Vila Pouca de Aguiar) (NEIVA *et al.*, 1987, 1990, 1990a). E os fenómenos estudados são muito semelhantes aos que encontramos e estudamos microscopicamente nos jazigos de sulfuretos das Beiras.

No granito, a zona interna de contacto com o filão tem 0,5 m e a zona externa é de 0,5-1 m de espessura; no xisto, a zona interna de contacto tem 1 m e a zona externa 2 a 3 m de possança.

Os processos de metassomatismo que ocorreram foram:

Microclinização – Nota-se na plagioclase do granito, em que perde algum Na e aumenta K.

Albitização – A plagioclase do granito perde Ca e ganha Na, o que também se nota na plagioclase que é mineral acessório dos xistos.

Ortosifização – Encontra-se na microclina do granito, e por vezes no xisto quando é acessório, que perde Na e ganha K.

Moscovitização – Houve moscovitização importante, embora parcial, na plagioclase e na microclina do granito, mais naquela do que nesta, havendo, ainda, uma moscovite ulterior, radial. A moscovite secundária tem menos Ti ou, mesmo, não contém Ti, Mg, Na; as moscovites radiais têm geralmente mais Mg e menos Ti e Na que as moscovites subédricas, e mais Mg e menos Na que as moscovites secundárias. Nos xistos, quando já possuíam alguma moscovite, esta recristalizou e enriqueceu em F, Mg, Rb e perdeu Ti, Ba, Zr; mas houve moscovitização da andaluzite e da plagioclase (mineral acessório). Esta moscovite tem, no directo contacto do filão com o xisto, mais SiO₂, K e menos Al, Ti, Mg, Mn do que a moscovite da rocha inalterada; quando afastada 2 m desse contacto, a moscovite do xisto, em relação àquela, tem mais SiO₂, Ti, Fe, e menos Mg.

Descoloração da biotite – É acompanhada de perda de Fe, Mg e Ti, dando moscovite alotriomorfa que recristalizou, o que se reconhece bem no granito e se pode confirmar quimicamente. No xisto há também descoloração, mas menos intensa, passando a Fe²⁺-biotite a Mg-biotite por perda em Fe_i e enriquecimento em Si, Mg, Mn e F.

Cloritização – No granito há clorite hipidiomorfa, brunsvigite, e clorite esferulítica, vermicular, chamosite. A alteração da biotite para brunsvigite não implicou adição de Mg e Fe por a relação Mg/(Mg+Fe) desta clorite ser semelhante ou menor à da biotite do granito inalterado. Contudo, a clorite esferulítica ou vermicular tem um valor menor da relação, isto é, há um decréscimo em Mg e aumento em Fe_i²⁺ da clorite hipidiomorfa para esta. No xisto inalterado, a clorite é brunsvigite e mantém-se na zona de metassomatismo até os 2 m do contacto, mas, a 3 m desse contacto, é ripidolite, esta com menos Si, Fe²⁺ e mais Ti, Al e Mg.

Metalizações – São os sulfuretos e alguns sulfossais que vão impregnar o granito e o xisto do contacto com os filões, substituindo parcialmente alguns dos minerais das rochas. O sulfureto que mais se difunde é a pirite e o que menos se difunde é a arsenopirite, como também sulfossais.

Silicificação – No granito dá-se parcial substituição de alguns minerais por quartzo, o mesmo acontecendo no xisto. Por vezes há infiltrações de calcedónia e jaspe em fracturas das rochas.

Caulinização – No granito dá-se parcialmente na microclina e um tanto na plagioclase; no xisto encontra-se na plagioclase, que é mineral acessório.

6.3. METASSOMATISMO NAS ROCHAS DO CONTACTO PRODUZIDO POR JAZIGOS HIPOTERMAIS DE CASSITERITE E VOLFRAMITE

Em jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite estudaram-se aspectos do metassomatismo de contacto causados, quando da génese dos minerais primários desses jazigos, sobre as rochas encaixantes (NEIVA, 1944). Passam-se em revista rápida esses fenómenos, com a necessária actualização:

Microclinização – Reconhece-se parcialmente na plagioclase do granito, que perdeu algum Na e aumentou em K.

62

Albitização – Deu-se na plagioclase dos granitos por alcalinização desta, com enriquecimento em Na e perda em Ca, o que também se nota na plagioclase acessória dos xistos.

Ortosificação – Muito ligeira da microclina do granito, que perdeu Na e aumentou em K.

Greisenização – Os greisenes resultam de modificações profundas de granitos ou aplitos transformando-os em rochas granulares constituídas por quartzo e mica branca e/ou lepidolite, havendo variadas gradações dessas modificações.

A greisenização é acompanhada de aumento em SiO_2 , H_2O^+ , Sn, W, Nb, Ta, Zn, Pb, Rb e diminuição em MgO, Na_2O , Cr, V, Sc, Zr, Sr e Ba; mas há diminuição em K_2O e aumento em FeO, Li e Cs somente quando a greisenização é mais intensa. Se a mineralização em Sn do greisen domina, sob forma de cassiterite, a sua moscovite contém menos Sn, Ba e Cs, mas mais W e F que a moscovite do granito. Se domina a mineralização em W, a moscovite do granito greisenizado tem teor similar ou menor em W, menor em F (este encontra-se no topázio e fluorite), mas maior em Sn, Ba e Cs que a moscovite do granito. A greisenização deu-se a temperatura consideravelmente mais baixa que a cristalização do granito e produzida por solução hidrotermal ácida, em que Cl e F foram importantes (NEIVA, 1987).

Moscovitização – Deu-se em diferentes fases e, na maioria dos casos, acompanhada de precipitação de quartzo. Quanto mais recentes essas fases, menores são as dimensões dos cristais de neoformação da moscovite. Nos granitos atingiu principalmente os feldspatos. Nos metapelitos, a moscovite foi nuclear na biotite e nos feldspatos acessórios e, por vezes, na andaluzite e mais raramente na silimanite, turmalina e quartzo. Há contemporaneidade parcial entre a silicificação e a moscovitização. A moscovite hidrotermal do contacto pode distinguir-se da dos filões por alguns elementos maiores e menores, e também da moscovite das rochas metapelíticas de metamorfismo regional. Também aquela moscovite cristalizou a mais baixa temperatura e menor $\log (f_{\text{H}_2\text{O}} / f_{\text{HF}})$ do que a moscovite de metamorfismo regional e a mais baixa temperatura e maior $\log (f_{\text{H}_2\text{O}} / f_{\text{HF}})$ que a moscovite directamente encostada ao filão. Quando o metassomatismo do xisto é intenso, é acompanhado de enriquecimento do xisto em SiO_2 , K_2O , CaO, P_2O_5 , W, Nb, Ta, Sn, Rb, Cs e empobrecimento em TiO_2 , F_2O_3 , MgO, Na_2O , H_2O^+ , Cr, V, Zn, Li, Ni, Zr, Cu, Sc, Y, Nd, Ce, La, Sr e Ba. E a moscovite do xisto metassomatizado tem mais F, W, Nb, Ta, Zn, Sn, Li, Rb, Cs e menos Cr, V, Ni, Zr, Cu, Sc, Y, Nd, Ce, La, Sr e Ba que a moscovite do xisto regional (NEIVA 1987a).

Granatização – Nem sempre ocorre. Quando se efectuou, formou-se almandina-espessartite, que concentrou Nb e Ta (NEIVA, 1987).

Topazização – Efectuou-se com a presença de soluções ácidas, com HF, que, mobilizando SiO_2 , alumina e álcalis, das rochas encaixantes, permitiram a formação de topázio nos contactos com o granito, tendo nucleado nos feldspatos.

Turmalinização – Deu-se nas rochas xistentas no contacto com os filões. Trata-se de turmalinas hipidiomorfas de composições idênticas às desses filões. Encontra-se escorlite e dravidite*.

Metalizações – Enquanto a cassiterite predomina nos encostos dos filões com a rocha encaixante, sendo no geral mais intensa a tecto, a volframite ocorre principalmente no corpo quartzoso dos filões. Por vezes, nos xistos encaixantes formou-se scheelite, quando estes possuem calcite como mineral acessório.

* Informação dada pela Prof. Ana Neiva.

Os sulfuretos impregnaram disseminadamente, até determinada distância, a rocha encaixante; a pirite é o mais frequente, seguindo-se-lhe a esfalerite e a calcopirite, por vezes a arsenopirite, esta mais próxima ao contacto com o filão.

Fluoritização – Encontra-se por vezes no granito, nucleando no feldspato e no quartzo. A maior parte dessa fluorite será nuns casos contemporânea da greisenização e noutros subsequente à precipitação da cassiterite.

Descoloração da biotite – Nota-se bem no granito. Dá-se por acção de solução hidrotermal sobre parte da biotite, mobilizando Fe, Mg e Ti, dando moscovite hipidiomorfa que recristalizou. Mas também se observou no contacto do xisto com o filão, em que a biotite se transformou em grande parte em moscovite.

Cloritização – A alteração da biotite para clorite tanto se dá no contacto do granito como do xisto com filões hipotermais. Isso corresponde a adição de H₂O e a perda de K e Fe (NEIVA, 1944) e empobrecimento, em elementos menores, de F, Ge, W, Nb, Sn, Li, Th, Nd, La, Pb, Au, Ba, Rb e Cs (NEIVA, 1972).

Silicificação – É comum e representada por finos grânulos e finas vénulas de quartzo que impregnam tanto os granitos como os xistos em contacto com os filões.

Apatitização – Deu-se nalguns contactos dos filões com os xistos, com impregnação de finos cristais de apatite. E isso é mais nítido se no xisto houver alguns cristais de calcite, que, por vezes, evoluem para apatite. Contudo, outros fosfatos existem, além da apatite, em menor quantitativo.

Caulinização – No geral, no contacto do granito com os filões, houve caulinização parcial dos feldspatos dos granitos e dos feldspatos acessórios dos xistos. Ulteriormente sofreram caulinização supergénica.

7. A SOBREPOSIÇÃO DAS MINERALIZAÇÕES

Retoma-se o assunto iniciado no capítulo 5.

A sobreposição da mineralização primária epitermal uranífera à mineralização primária hipotermal de cassiterite e volframite é relativamente simples de discernir comparando as figs. 5 e 7. A uranífera é de baixa temperatura e a de cassiterite e volframite de temperatura bastante mais elevada.

Pode inicialmente haver alguma confusão quanto ao quartzo e à moscovite, mais desenvolvidos na hipotermal. Mas, na epitermal, a hematite é mais abundante e a sua alternância com a pecheblenda e concomitância com o jaspe e/ou calcedónia é característica; são menos abundantes as fases sulfurada e carbonatada e suas recorrências; e o número de espécies minerais reconhecidas é nitidamente menor. Além disso, as fases coloidais (pecheblenda, jaspe, calcedónica, greigite, cofinite) são desenvolvidas e inexistentes na mineralização hipotermal. Já berilo, topázio, columbite, rutilo, cassiterite, volframite, molibdenite são tipicamente hipotermais. A esfalerite epitermal é muito pouco ou não ferrífera, pouco colorida, ao passo que a esfalerite hipotermal é negra, ferrífera (marmatite).

Também no metamorfismo de contacto hidrotermal entre os filões de minérios uraníferos e as rochas encaixantes (ver 6.1) e os filões de cassiterite e volframite e as respectivas rochas encaixantes (ver 6.3), estes provocaram auréolas mais desenvolvidas, com características greisenização, turmalinização, granatização, topazização, metalizações de cassiterite, volframite e sulfuretos, enquanto aqueles promoveram típicas hematitização, jasperização, calcedonização, greigitização e metalizações de pecheblenda e minerais secundários desta e ligeira de sulfuretos.

Os minerais epitermais preencheram vazios e fracturas dos e entre os minerais hipotermais e fendas, falhas e cisalhamentos existentes nestes jazigos.

São um pouco mais difíceis de separar as sobreposições da mineralização epitermal dos jazigos uraníferos da mineralização mesotermal dos jazigos de sulfuretos. Contudo, estes são jazigos de temperatura média e aqueles de temperatura nitidamente mais baixa.

Comparando as figs. 5 e 6 nota-se que o quartzo e a moscovite estão mais desenvolvidos nos mesotermais. Abstraindo as espécies minerais duvidosas na paragénes mineral epitermal, o número de espécies é nitidamente menor que na paragénes mesotermal; também os sulfuretos e carbonatos são menores, principalmente em volume.

Na mineralização mesotermal não se encontram os colofórmicos pecheblenda, greigite, cofinite, nem os duvidosos parapecheblenda, uranogumite e neopecheblenda, típicos da paragénes epitermal.

O fecho da mineralização mesotermal é de sílica coloidal (calcedónia I e II e jaspe) e de hematite II concomitante deste e talvez mobilizada de hematite I. Mas o quantitativo destes colofórmicos é muito menor que na mineralização epitermal. Nesta, a pecheblenda e as suas numerosas recorrências e as de jaspe e calcedónia são notórias e típicas, tanto nos jazigos como nas rochas encaixantes.

No metamorfismo hidrotermal produzido pelos dois tipos de jazigos nas rochas encaixantes, a microclinização da plagioclase do granito não ocorre no contacto com a mineralização epitermal, mas encontram-se intensas moscovitização, hematitização, jasperização e calcedonização e disseminação de pecheblenda. Estas cinco metassomatoses são muito menores tanto no granito como no xisto no contacto com a mineralização mesotermal.

8. CONSIDERAÇÕES SOBRE A GÉNESE DOS JAZIGOS URANÍFEROS

São variadas as ideias quanto à génese dos jazigos primários de minérios de urânio aflorantes em Portugal. Para NEIVA (1944), seria hidrotermal de diferenciação granítica, mas, mais tarde, (NEIVA 1995) relaciona essa génese com o metassomatismo hidrotermal do granito no contacto com filões uraníferos, resultante da actuação da mistura de fluidos de granitos variscos e de água infiltrada ao longo

de falhas e cisalhamentos profundos; CERVEIRA (1958) filia-a em fluidos magmáticos de filões básicos (lamprófiro e doleritos); CAMERON (1960) considera-a resultante da infiltração de água meteórica em estruturas alpidicas, lixiviação do granito em profundidade e mineralização das soluções em função do campo geotérmico, e ascensão destas por correntes de convecção; THADEU (1965) e PILAR (1969) admitem-na como hidrotermal; FARIA (1966) baseia-se na lixiviação dos granitos por águas meteóricas, em condições climáticas e geológicas especiais, e infiltração dessas soluções em armadilhas estruturais e litológicas; DIAS *et al.* (1970) imaginam um esquema um tanto semelhante a este, mais burilado e pormenorizado; PAGEL (1981) relaciona a gênese com circulação de soluções hidrotermais quentes no granito, possivelmente meteóricas, infiltradas e aquecidas no campo geotérmico criado pelos filões de lamprófiro e de doleritos, e reactivadas quando dos movimentos alpidicos. E em todas estas ideias é natural que exista um fundo de verdade.

Após os resultados obtidos nos estudos de campo e de laboratório, indicados nos capítulos antecedentes, passam-se a referir variados argumentos para explicação da gênese dos jazigos portugueses de minérios de urânio.

- Vimos que há duas regiões uraníferas no País: as Beiras e o NNE do Alentejo.

O "horst" da Serra da Estrela tem um bloco central que culmina a SW, a 1993 m (Torre), basculado para NNE, e à altitude de 616 m nas proximidades de Celorico da Beira. Este bloco está limitado por duas falhas NNE-SSW, um pouco divergentes para SW, que curvam para NE-SW a partir duma linha passando por Mangualde-Seia-Valhelhas. A vertente ocidental é bem marcada por escadaria de falhas paralelas com desníveis imponentes e se prolongam para o planalto da Nave.

Na vertente oriental, há outra escadaria de falhas muito menos alcantilada do que aquela, que se prolonga até à Serra da Marofa e algumas a cortam. Mas naquela Serra e regiões circunvizinhas (região das Beiras), tanto para W como para E, têm também grande importância morfológica as falhas NW-SE a WNW-ESE e as E-W a ENE-WSW.

Nesta região dominam os granitos uraníferos γ_{2b}^{II} e γ_{3b}^{II} , principalmente estes; e, na sub-região de Vouzela, os granitos, também uraníferos, γ_3^I . Contudo, na região das Beiras há extensos afloramentos xistentos do Câmbrico e cristas quartzítico-xistentas do Ordovícico.

No bloco central do "horst" da Serra da Estrela não se encontram jazidas epitermais de minérios de urânio, nem hipotermiais de cassiterite e volframite, nem mesotermiais de sulfuretos. Como se trata dum bloco ascensional (RIBEIRO, 1949, 1954; DAVEAU, 1969), a erosão meteórica fê-los desaparecer, mas encontram-se nos patamares limitados pelas falhas NNE-SSW e NE-SW nos flancos ocidental e oriental da Serra da Estrela

e ocorrem até próximo de Vila Nova de Paiva, S. Pedro do Sul, contrafortes da Serra do Caramulo, S de Sta. Comba Dão, S da Covilhã, Sabugal, até à fronteira espanhola, contraforte sul da Serra da Marofa e a N e NE de Aguiar da Beira e NE e NW de Trancoso.

Na região NNE do Alentejo, domina a peneplanície ondulada inclinada para W e N desde a base da Serra do Marvão-S. Mamede. Desde o Tejo até o contacto com o granito γ_{3b}^{II} afloram rochas xistentas do Câmbrio em isoclinais verticais. E acima destas formações há uma crista quartzítica, acompanhada de metapelitos xistentos, NW-SE, do Ordovício, que, no final do Carbónico-princípio do Pérmico se prolongava até o Ordovício a N de Portalegre, e uma outra crista, a N do Tejo e a W daquela, que se prolongaria até a crista a S de Portalegre. Falhas e cisalhamentos NW-SE, extensas e profundas, que marginam essas cristas e por vezes passam a WNW-ESE, são variscas, e cortam a SE os granitos, como também o serão as falhas e cisalhamentos NNW-SSE, N-S e NNE-SSW a NE-SW que cortam os granitos e os xistos do NNE do Alentejo e onde se encontram jazidas filonianas de cassiterite e volframite e jazidas de sulfuretos, a que se sobrepuseram mineralizações uraníferas.

- Na bordadura SW da Serra da Estrela, afloram granitos a monzonitos porfiróides grosseiros biotíticos ou biotítico-moscovíticos, γ_{2b}^{II} , de idade 319 a 297 Ma, considerados granitos híbridos de mistura dum magma anatético granítico, de refusão do complexo xisto-metagrauváquico Ante-Ordovício, e dum magma tonalítico do manto. Por diferenciação desse magma cristalizaram granitos porfiróides médios a grosseiros biotítico-moscovíticos, por vezes de duas micas, γ_{3b}^{II} , de idade 308 a 280 Ma. Estes granitos dominam na Serra e estendem-se para N. No bloco central da Serra, foi um magma anatético granodiorítico, de tipo S, que intruiu provavelmente a 720° C, e os granitos ter-se-iam gerado a 690° C e estariam completamente cristalizados a 520°-400° C, à pressão estimada de 3,5-3 Kb. Os granitos serão o produto da cristalização fraccionada, *in situ*, desse magma granodiorítico, controlada por separação da plagioclase, do quartzo e da biotite principalmente por pressão filtrante. Aqui encontram-se, além do granodiorito, os granitos, γ_{2b}^{II} , γ_{3b}^{II} , γ_{3d}^{II} , todos em sequência de diferenciação magmática por cristalização fraccionada como na bordadura SW da Serra. O granito moscovítico γ_{3c}^{II} não se encontra na sequência da diferenciação, correspondendo a uma pulsação dum magma granítico anatético distinto.
- Após estudos de campo e gabinete e de macro e microscopia de associações minerais de variados jazigos de minérios de urânio, reconheceu-se ser

possível organizar um quadro síntese da mineralização primária desses jazigos (Fig. 5) e um resumo dos fenómenos de metamorfismo hidrotermal de contacto nas rochas encaixantes.

A mineralização epitermal dos jazigos uraníferos deu-se, no geral, em fracturas, falhas e cisalhamentos. O quartzo maciço, por vezes zonado, é acompanhado em parte de moscovite, e o quartzo zonado, de estrutura cocárdica e subsequente, também acompanhado de moscovite, iniciam a génese dos jazigos, seguindo-se a ocorrência de hematite e de pecheblenda. Esta (pecheblenda I) é maciça, mas ao microscópio de estrutura colofórmica bandada com alguns vestígios de estruturas esferulíticas muito pouco desenvolvidas; nas recorrências, as estruturas esferulíticas são crescentes nas massas colofórmicas. Há uma intercalação de quartzo III entre as pecheblendas II e III.

Após a pecheblenda III, houve fracturação ou falhamento, seguindo-se uma fase sulfurada (com pirite I, esfalerite clara I, calcopirite I, galena I), em parte acompanhada de clorite, e siliciosa (quartzo IV), e que, na parte final, fecha com pequena fase de barite. Segue-se a fase carbonatada (siderite, anquerite, calcite), entre duas épocas de fracturação ou falhamento, mas, na maior parte dos casos, a encerrar com a primeira fase siliciosa coloidal (calcedónia I). Seguem-se várias fases alternantes coloidais de jaspe e calcedónia concomitantes com fases coloidais de pecheblenda, com algumas intercalações de hematite coincidentes com jaspe e uma em concomitância com pirite e uma intercalação desta, outra de esfalerite e calcopirite, estas em parte contemporâneas, e uma de galena e, raramente, uma de calcite II. Segue-se a fase hidrotermal de alteração da pirite para marcassite, acompanhada em grande parte por greigite (melnicovite) colofórmica, e por cofinite (silicato uranífero) também colofórmica. A parapecheblenda e a uranogumite, colofórmicas, formadas por oxidação e hidratação da peche-blenda, e a neopecheblenda, terrosa, pulverulenta, esferulítica, de últimas gerações e derivada da pecheblenda e da parapecheblenda, farão a transição para os minerais supergénicos ou poderão mesmo ser supergénicos.

- Ao fazer-se este estudo da paragénese epitermal, reconheceu-se, em variados jazigos, que esta mineralização se sobrepôs à mineralização mesotermal filoniana de sulfuretos, como, por exemplo, em Reboleiro (Trancoso), Cunha Baixa (Mangualde), Urgeiriça (Nelas), Valinhos (Nelas), Bica (Sabugal), Carrasca (Sabugal), Rosmaneira (Sabugal), Tarabau (Nisa), Palheiros de Tolosa (Nisa), Póvoa e Meadas (Nisa). E, para que não houvesse dúvidas, estudou-se a paragénese de alguns jazigos mesotermiais de sulfuretos da Beira-Baixa, como Ceiroco (Pampilhosa da Serra),

Forninho do Bispo (Castelo Branco), Ceife (Penamacor) e Pinheiro (Penamacor) e reviu-se o estudo do jazigo de Facuca, na Serra do Marão (nº. 5.2). Isso levou ao quadro síntese paragenético da Figura 6.

Comparando as Figuras 6 e 5 reconhece-se que as fases quartzosa, moscovítica, sulfurada (bismutinite, matildite, pirrotite, pirite, arsenopirite, esfalerite, mais escura que na epitermal, calcopirite, galena e marcassite) são nitidamente mais desenvolvidas, em volume e espécies minerais, na paragénese mesotermal que na epitermal, e que a fase final siliciosa, colofórmica, com calcedónia e jaspe, esta concomitante com recorrência de hematite, é muito menos desenvolvida que na paragénese epitermal. Na mesotermal não há pecheblenda nem as suas numerosas recorrências; é somente existente na mineralização epitermal. Nesta, os minerais formados a partir de soluções coloidais, como pecheblenda, greigite, cofinite, são dela exclusivos; e em volume, o jaspe e a calcedónia, também gerados a partir de soluções coloidais, são muito superiores na mineralização epitermal. Mas também na epitermal não ocorrem bismuto, ouro, sulfossais, barite e, provavelmente, dolomite.

Na sobreposição da mineralização epitermal à mesotermal, os minerais daquela foram ocupar fracturas, fendas e vazios existentes nos e entre os minerais desta e também os recobrem parcialmente.

É difícil de discernir nas rochas encaixantes as sobreposições dos metassomatismos produzidos pelos filões epitermais e mesotermais, a não ser quanto às impregnações por soluções coloidais de pecheblenda e de greigite, exclusivas das epitermais, como os maiores volumes da hematitização, jasperização e calcedonização produzidos por estas.

- Talvez mais raramente, a mineralização epitermal uranífera sobrepôs-se a uma mineralização hipotermal de cassiterite e volframite, como, por exemplo, nos jazigos filonianos de Fundegos (Vouzela), Senhora das Fontes (Pinhel), Arrifana (Gouveia), Medronheira (Belmonte), Borrega (Belmonte), Coitos (Sabugal) e nos “stockworks” de Ázere-Sinde, Bejanca-Carvalho (Vouzela) e, provavelmente, Nisa-Monte Claro (Nisa).

Comparando as Figuras 5 e 7, nota-se que as características paragenéticas da mineralização epitermal dos jazigos de minérios de urânio, de baixa temperatura, são muito diferentes das da mineralização hipotermal dos jazigos de cassiterite e volframite, de temperatura elevada. Nestes não há fases colofórmicas, coloidais, de pecheblenda, calcedónia, jaspe e suas recorrências, e de greigite e cofinite, como, também, de recorrências de hematite, típicas da mineralização epitermal. Mas, na mineralização hipotermal, as ocorrências de turmalina, berilo, topázio, columbite, rútilo, cassiterite, volframite, molibdenite, esfalerite ferrífera (marmatite) são características.

A fase sulfurada é bastante mais desenvolvida nos jazigos hipotermiais, com mais espécies minerais e muito maior número de recorrências que nos epitermais, o mesmo acontecendo à fase carbonatada, embora em menor escala. Também o quartzo e a moscovite ocorrem em maior quantitativo e recorrência, no espaço e no tempo, que nos jazigos epitermais.

A sobreposição da mineralização epitermal de minérios uraníferos e minerais associados à mineralização hipotermal de cassiterite e volframite e também minerais associados, nota-se bem por aqueles minerais ocuparem fendas, fracturas, falhas e vazios entre os minerais hipotermiais, bem como fracturas, fendas e clivagens destes, e recobrando-os com frequência como indutos.

O metamorfismo de contacto hidrotermal produzido nas rochas encaixantes pelos jazigos hipotermiais de cassiterite e volframite e pelos jazigos epitermais de minérios de urânio são em parte diferentes e noutros similares. Nos diferentes, nas rochas encaixantes dos hipotermiais há greisenização, topazização, turmalinização e as metalizações de cassiterite e volframite; nas rochas encaixantes dos epitermais há a presença importante de soluções coloidais que originaram a pecheblenda, a calcedónia, o jaspe e suas recorrências e, ainda, a greigite, além da típica metalização em pecheblenda. Isso vem confirmar que a mineralização epitermal uranífera não está propriamente na sequência da diferenciação hidrotermal do magma granítico regional.

- Foram as falhas e cisalhamentos variscos, extensos e profundos, das regiões das Beiras e do NNE do Alentejo que facilitaram a mistura dos fluidos da solidificação do granito com a água meteórica infiltrada ao longo dessas falhas e cisalhamentos. Mistura essa que mobilizou o U da uraninite (+ monzanite) e outros elementos do granito e de rochas metassedimentares da cobertura deste, ganhando mineralização. O calor do plutão contribuiu para o desenvolvimento de correntes convectivas dos fluidos e ascensão daquela mistura. Em fracturas penetradas por essa solução-mistura precipitaram diversos minerais e flocularam, gelificaram e exsicaram outros que deram origem à mineralização epitermal uranífera e seus minerais acessórios. Como em grande parte dos jazigos e jazidas uraníferas esta mineralização epitermal se sobrepôs à das jazidas mesotermiais de sulfuretos e à de jazidas hipotermiais de cassiterite e volframite, induz-se que estas jazidas hipotermiais e mesotermiais, relacionadas com a diferenciação hidrotermal do granito varisco regional, já estavam formadas.
- O metassomatismo hidrotermal produzido nos granitos e relacionado com os jazigos epitermais de minérios de urânio foi estudado em pormenor. A passagem do granito inalterado a granito róseo é acompanhada de ganho

em SiO_2 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O e U e muito ligeiro em TiO_2 , Al_2O_3 , MgO e Y e perda em CaO, F, Zn, Li, Sr, Pb e Ba, mantendo-se praticamente constantes os teores de Cr, Nb, Ni, Zr, Cu, Sc, Y, Ta, Th e Hf, quase nulos os de Sn e Cs e as terras raras exceptuando o Yb.

E a passagem do granito róseo a granito vermelho, este encaixante de filões de quartzo e principalmente de quartzo e jaspe e/ou calcedónia é acompanhada em ganho de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O e K_2O , perda em SiO_2 , FeO, CaO, F, Zn, Li, Sr, Pb, Ba, Rb e U, e ligeira em TiO_2 , Ta, Th, mantendo-se praticamente os teores de MnO, MgO, P_2O_5 , Cr, Ni, Zr, Cu, Sc, Y e Hf e quase nulos os de Sn e Cs. E nas REE normalizadas houve ligeiro ganho em La e perda em Yb e Lu (NEIVA *et al.*, 1987). O extremo de perda em SiO_2 , levando a episienito, é pouco comum em Portugal e encontra-se, por exemplo em Aljão (FERREIRA *et al.*, 1982), com vénulas de pecheblenda e fluorite.

A razão $\text{Fe}^{2+}/\Sigma\text{Fe}$ decresce com a alteração hidrotermal do granito, atingindo menor valor no granito vermelho e, naturalmente, no episienito.

- O granito inalterado intruiu a 3,5-3 Kb e a 690°C , e ficou completamente cristalizado aproximadamente a 520°C . As temperaturas de equilíbrio da microclina e da plagioclase coexistentes foram atingidas entre os 520° e 400°C .

Fluidos dos últimos estádios de solidificação do granito e, principalmente, água meteórica, pobre em Ca, F, Zn, Li, Ba e Rb, que se infiltrou em falhas e cisalhamentos extensos e profundos, como os NNE-SSW e NE-SW da Serra da Estrela e NW-SE do NNE do Alentejo misturaram-se. O calor do plutão granítico permitiu o estabelecimento da circulação hidrotermal da mistura dos fluidos, que se envolveram no metassomatismo do granito encaixante e, contemporaneamente, geraram a paragénese epitermal referida na Figura 5. Esses metassomatismos foram: a) moscovite do granito recristalizou a 420°C ; b) a albitização da plagioclase e a ortosificação da microclina e respectivas recristalizações ter-se-ão efectuado no intervalo 400° - 350°C ; c) a primeira hematitização, principalmente da microclina, deu-se pelos 400 - 350°C , e o Fe, em solução, em parte transportado por água meteórica oxidante; d) a moscovitização, principalmente da plagioclase, fez-se pelos 340 - 280°C , e a descoloração de alguma biotite e transformação em moscovite também corresponderá a este intervalo; e) a segunda fase de hematitização, ainda da microclina, alguma moscovite e algum quartzo, será contemporânea da fase de descoloração da biotite com mobilização do Fe e Ti, pelos 340 - 280°C , e alteração da ilmenite, tendo os fluidos enriquecido em Fe; f) a cloritização da biotite efectuou-se cerca dos 260° - 230°C .

Foi no intervalo de temperaturas entre os 400° C e os 300° C que o U da uranite (+ monazite) terá sido mobilizado pela solução hidrotermal. A impregnação de pequenas fendas do granito encaixante por pecheblenda terá sido contemporânea da formação desta no filão, a partir de soluções coloidais, que flocularam, gelificaram e exsiccaram, iniciando-se essa actividade pelos 230°-200° C.

- Em diversas regiões do País, como na Serra do Gerez, na Serra da Cabreira, nas margens alcantiladas do Douro Internacional, por exemplo em Picote, e noutras regiões do País, há granitos que sofreram os mesmos tipos de metassomatismos que os granitos da Serra da Estrela e regiões circunvizinhas. Também ocorrem os filões de quartzo e os de quartzo e calcedónia e, por vezes, jaspe, mas não há mineralizações de minérios uraníferos. Nessas regiões há falhas variscas extensas como na Serra da Estrela, mas naturalmente menos profundas; e também a água meteórica que se misturou com os fluidos de solidificação do granito não transportaria tanto Fe, nem o conjunto dos fluidos conseguiu mobilizar o U como na Serra da Estrela e NNE do Alentejo.
- As águas continuaram a infiltrar-se ao longo de extensas e profundas falhas e cisalhamentos variscos e a acumularem-se em numerosas fendas de alguns centímetros a dezenas de metros em locais de maciços rochosos muito tectonizados, potenciais reservatórios de águas subterrâneas, que a pouco e pouco, por solubilização parcial dos minerais dessas rochas e filões, foram ganhando mineralização.
Após apreciável intervalo em que o aquecimento das águas subterrâneas de infiltração em função do campo geotérmico varisco, criado pela última intrusão granítica, se degradou, essas águas arrefeceram. Mas houve um reaquecimento devido às intrusões filonianas de doleritos e lamprófiros por volta dos 224 ± 11 Ma (FERREIRA *et al.*, 1979). Alguns destes filões intruíram ao lado de jazidas filonianas uraníferas na região das Beiras. Daí, a possibilidade de renovação, por correntes de convecção, da mineralização epitermal uranífera, principalmente nas regiões das Beiras e NNE do Alentejo e, provavelmente, noutros locais.
- A tectónica alpidica reactivou as extensas e profundas falhas e cisalhamentos variscos (PEREIRA *et al.*, 1993), que continuaram como colectores e canais adutores de águas meteóricas superficiais. As próprias diaclases das rochas podem ultrapassar até cerca de 1,5-2 km o maciço eruptivo e estabelecer ligação hidráulica entre este e o maciço metamórfico. Zonas de fragmentação mecânica nos contactos entre rochas eruptivas e

metamórficas e zonas de metassomatose nesses contactos são locais potenciais de reservatórios de águas subterrâneas. E, assim, a água meteórica desceu até apreciável profundidade, aqueceu em função do grau geotérmico e estagiou em zonas de esmagamento do granito uranífero ou até dos jazigos de minérios uraníferos já formados e não aflorantes, dissolvendo o U e outros elementos. Tais soluções, ascendendo em função da pressão hidrostática das colunas de infiltração e de correntes de convecção, como acontece actualmente em relação às fontes termais, terão dado origem, em armadilhas litológicas (filões de aplitos, pegmatitos, quartzitos e rochas básicas) e em armadilhas estruturais (poros, diaclases, falhas, plurifissuras e cisalhamentos), a jazidas uraníferas mais recentes. Dos minerais das novas jazidas, uns precipitaram de soluções iónicas e, principalmente minerais secundários de urânio de cores vivas, como fosfatos, silicatos, sulfatos, arseniantos e carbonatos, e outros flocularam, gelificaram e exsicaram a partir de soluções coloidais, como pecheblenda, greigite, jaspe e calcedónia. Isso poderia explicar a ocorrência de pecheblendas de variadas idades.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO, M.R.M. de Almeida (1996) – “Hercynian Granitoides from Fornos de Algodres Area (Northern Central Portugal)”. Tese de doutoramento na Universidade de Londres, pp. 1-440.
- BASHAM, J.R. and DIAS, J.M. de Matos (1965) – “Uranium vein deposits in Portugal”. Proc. Symp. on Vein Type Uranium Deposits, IAEA, Vienna, pp. 183-193.
- BEETSMA, J.J. (1995) – “The Late Proterozoic/Paleozoic and Hercynian Crustal Evolution of the Iberian Massif, N Portugal”. Tese de doutoramento na Universidade de Vrije, Amsterdam, pp. 1-223.
- CATHELINEAU, M.; CUNNEY, M.; LEROY, J.; LHOTE, F.; TRUNG, C.N.; PAGEL, M.; POTY, B. (1982) – “Caractères minéralogiques des pechblendes de la province hercynienne d’Europe. Comparaison avec les oxydes d’uranium du Protérozoïque de différents gisements d’Amérique du Nord, d’Afrique e d’Australie”. Vein-type and Similar Uranium Deposits in Rocks Younger than Proterozoic, IAEA, Vienne, pp. 159-177.
- CERVEIRA, A. de Morais (1950) – “Sobre a metalogenia do urânio em Portugal”. Bol. Soc. Geol. Portugal, vol. 8, fasc. 3, pp. 141-179.
- DARNLEY, A.G. (1961) – “Pitchblende from Carrasca, Portugal”. Geol. Serv. Great Britain, Atom. Energ. Divis. Ag. Determ. Rep. n.º. 17.
- DAVEAU, Suzanne (1969) – “Structure et relief de la Serra da Estrela”. Finisterra, vol. IV, pp. 31-65.
- DIAS, J.M. de Matos (1982) – “Perspectivas geoconómicas dos jazigos uraníferos portugueses”. Geonovas, vol. 1, n.º. 3, pp. 33-39.
- DIAS, J.M. de Matos (1983) – “Realidades e perspectivas da indústria mineira do urânio em Portugal”. Geonovas, vol. 1, n.º. 5, pp. 17-22.

- DIAS, J.M. de Matos and ANDRADE, A.A. Soares de (1970) – “Portuguese uranium deposits”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, pp. 1-22.
- FARIA, F.L. de (1966) – “Gites d’uranium portugais dans des formations metasédimentaires”. Com. Serv. Geol. Portugal, t. L, pp. 9-50.
- FERREIRA, A. Bernardo e NEIVA, J.M. Coteló (1945) – “Jazigos uraníferos de Souto de Aguiar da Beira”. Est. Not. Trab. Serv. Form. Mineiro, vol. I, fasc. 3-4, pp. 177-189.
- FERREIRA, A. de Brum (1978) – “Planaltos e montanhas do Norte da Beira”. Estudo de Geomorfologia, Lisboa, pp. 1-374.
- FERREIRA, D. de Brum (1981) – “Carte geomorphologique du Portugal”. Mem. Centro Est. Geográficos, Lisboa, nº 6, pp. 1-55.
- FERREIRA, M.R. Portugal and DIAS, J.M. de Matos (1982) – “Uranium mineralization and episyenites. A case study in Portugal”. Vein-type and Similar Uranium Deposits in Rocks Younger than Proterozoic, IAEA, Vienne, pp. 311-321.
- FERREIRA, M.R. Portugal; GASPAR, O. da Cruz; DIAS, J.M. Matos; FERNANDES, A. Peinador; ANDRADE, R. Santarém (1971) – “Jazigos uraníferos portugueses. Jazigos de Au-Ag-sulfuretos do norte de Portugal”. I Cong. Hisp.-Luso-Amer. de Geologia, Lisboa, Livro-Guia Exc. nº 5, pp. 1-81.
- FOSTER, M.D. (1962) – “Interpretation of the composition and classification of the chlorites”. U.S. Geol. Surv. Profess. Paper, 414, pp. 1-33.
- GAINES, R.V.; SKINNER, H.C.W.; FOORD, E.E.; MASON, B.; ROSENZVEIG, A. (1997) – “Dana’s New Mineralogy”. 8th Ed. John Wiley & Sons, INC., New York, pp. I-XXXVII, 1-1819.
- GOMES, M.E.P. and NEIVA, A.M.R. (2002) – “Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, Northern Portugal: The importance of magmatic processes”. Chemie der Erde, 62, pp. 47-72.
- HAWTHORNE, F.C. and HENRY, D.J. (1999) – “Classification of the minerals of the tourmaline group”. European Journ. of Mineralogy, 11, pp. 201-215.
- HELAL, B. (1992) – “Granitoides, granites à métaux rares et hydrothermalisme associé: géologie, minéralogie et géochimie de plusieurs suites tardi-hercyniennes (Nord du Portugal)”. Tese de doutoramento apresentada à L’École Nationale Supérieure des Mines de Paris, pp. 1-507.
- HORNE, J.E.T. (1960) – “Age of pitchblende from Lenteiros, Reboleira-Portugal”. J.E.N. Tech. Pap. nº. 27, pp. 7-10.
- J.E.N.-Junta de Energia Nuclear (1968) – “A província uranífera do centro de Portugal (suas características estruturais, tectónicas e metalogenéticas)”. Lisboa, pp. 1-132.
- MARTINS, H.C.B. (1998) – “Geoquímica e petrogénese de granitoides biotíticos, tarditectónicos e pós-tectónicos. Implicações metalogenéticas”. Tese de doutoramento na Universidade de Aveiro, pp. 1-288.
- MARTINS, H.C.B.; ALMEIDA, A.; NORONHA, F. e LETERRIER, J. (2001) – “Novos dados geocronológicos de granitos da região do Porto: granito do Porto e granito de Lavadores”. VI Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa / XII Semana de Geoquímica, Faro, pp. 146-148.
- MENENDEZ, L.G. (1998) – “Petrologia e Geoquímica do batólito granítico de Nisa-Albuquerque (Alto-Alentejo, Portugal; Extremadura, Espanha)”. Tese de doutoramento na Universidade de Granada, pp. 1-223.
- NEIVA, A.M.R. (1972) – “Some trace elements of chlorite as alteration of biotite”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº. 73, pp. 3-6.
- NEIVA, A.M.R. (1973) – “Geochemistry of the granites and their minerals from the central area of northern Portugal”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº. 76, pp. 1-43.

- NEIVA, A.M.R. (1986) – “Geochemistry of greisenized granites and metasomatic schist of tungsten-tin deposits in Portugal”. Proc. NATO Advanced Study Institute on Chemical Transport in Metasomatic Processes, Greece, 1985, Ed. D. Reidel Publishing Company Holland, pp. 681-699.
- NEIVA, A.M.R. (1987) – “Geochemistry of white micas from portuguese tin and tungsten deposits”. Chem. Geology, 63, pp. 299-317.
- NEIVA, A.M.R. (1992) – “Geochemistry and evolution of Jales granitic system, northern Portugal”. Chem. Erde, 52, pp. 225-241.
- NEIVA, A.M.R. (1993) – “Geochemistry of granites and their minerals from Gerez mountain, northern Portugal”. Chem. Erde, 53, pp. 227-258.
- NEIVA, A.M.R. (1998) – “Geochemistry of highly peraluminous granites and their minerals between Douro and Tamega valleys, northern Portugal”. Chemie der Erde, 58, pp.161-184.
- NEIVA, A.M.R. and CAMPOS, T.F.C. (1992) – “Genesis of the zoned granitic pluton of Penamacor-Monsanto, central Portugal”. Mem. Not. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, 114, pp. 51-68.
- NEIVA, A.M.R. and CAMPOS, T.F.C. (1993) – “The zoned granitic pluton of Penamacor-Monsanto, central Portugal: hydrothermal alteration”. Mem. Not. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, 116, pp. 21-47.
- NEIVA, A.M.R. and GOMES, M.E.P. (1991) – “Geochemistry of the granitoid rocks and their minerals from Lixa do Alvão – Alfarela de Jales – Tourencinho (Vila Pouca de Aguiar, northern Portugal)”. Chem. Geol., 89, pp. 305-327.
- NEIVA, A.M.R.; NEIVA, J.M. Coteló and PARRY, S.J. (1987) “Geochemistry of the granitic rocks and their minerals from Serra da Estrela, central Portugal”. Geochim. Cosmochim. Acta, 51, pp. 439-454.
- NEIVA, A.M.R. and SILVA, M.M.V.G. (1987) – “Metasomatic alterations of country schist at Jales gold-silver quartz vein wall (Portugal)”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, 103, pp. 33-47.
- NEIVA, A.M.R.; NEIVA, J.M. Coteló and SILVA, M.M.V.G. (1990) – “Geochemistry of gold quartz vein walls from Jales (northern Portugal)”. Chem. Geol., 82, pp. 217-251.
- NEIVA, J.M. Coteló (1944) – “Jazigos portugueses de cassiterite e volframite”. Com. Serviços Geológicos de Portugal, vol. XXV, pp. 1-258.
- NEIVA, J.M. Coteló (1944) – “Épocas de metalogenia de diferenciação magmática em Portugal”. Publ. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências, Porto, XXXIX, 2ª. ser. pp. 1-13.
- NEIVA, J.M. Coteló (1952) – “Nova ocorrência de minerais uraníferos no norte de Portugal”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº 32, pp. 63-64.
- NEIVA, J.M. Coteló (1953) – “A alteração do granito no contacto com o filão de minérios uraníferos da Urgeiriça”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº 34, pp. 47-53.
- NEIVA, J.M. Coteló (1954) – “Pegmatitos com cassiterite e tantalite-columbite da Cabração (Ponte de Lima, Serra de Arga)”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº 36, pp. 1-61.
- NEIVA, J.M. Coteló (1979) – “Alterações metassomáticas nas rochas encaixantes de jazigos minerais de diferenciação granítica”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº 88, pp. 45-59.
- NEIVA, J.M. Coteló (1995) – “Jazigos portugueses de minérios de urânio”. IV Cong. Nac. de Geologia, Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Porto, Memória nº 4, pp. 575-580.
- NEIVA, J.M. Coteló e CHOROT, J.L.P. (1945) – “Alguns jazigos de ouro do Alto Minho”. Est. Not. Trab. Serv. Fom. Mineiro, vol. I, fasc. 3-4, pp. 19-255.
- NEIVA, J.M. Coteló e FARIA, F. Limpo de (1952) – “Rochas eruptivas das Chãs (Vila Nova de Foz Côa) e seu interesse para a prospecção de minerais das Terras Raras”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº 32, pp. 1-7.

- NEIVA, J.M. Cotelto; QUEIROZ, N. Múrias de et FARIA, F. Limpo de (1952) – “Géologie et genèse des gisements portugais d’apatite”. Est. Not. Trab. Serv. Fom. Mineiro, vol. VIII, pp. 265-278.
- NEIVA, J.M. Cotelto and NEIVA, A.M.R. (1990) – “The gold area of Jales (Northern Portugal)”. Terra Nova, 2, pp. 243-254.
- PAGEL, Maurice (1981) – “Facteurs de distribution et de concentration de L’Uranium e du Thorium dans quelques granites de la Chaîne Hercynienne d’Europe”. These de Docteur es Sciences, dans l’École Nat. Sup. de Geologie Appliquée et de Prospection Minière (Inst. Nat. Polyt. de Lorraine), pp. 1-566.
- PEREIRA, E.; RIBEIRO, A.; MEIRELES, C. (1993) – “Cisalhamentos hercínicos e controlo das mineralizações de Sn-W, Au e U na zona Centro-Ibérica, em Portugal”. Cuaderno Lab. Xeológico de Laxe, Coruña, vol. 18, pp. 89-119.
- PILAR, L. (1966) – “Condições de formação do jazigo de Nisa”. Com. Serv. Geol. Portugal, t. L, pp. 51-83.
- PILAR, L. (1969) – “Contribuição para o conhecimento dos minerais de urânio de Portugal Metropolitano”. J.E.N., Lisboa, pp. 1-50.
- PINTO, M.M.S. (2001) – “Mineralizações uraníferas no Vale de Abrutiga e estudo do impacte ambiental”. Tese de Mestrado, Univ. Coimbra, pp. 1-312.
- REIS, B. e PEREIRA, E. (1983) – “O plano energético nacional na perspectiva dos geólogos”. Geonovas, vol. 1, pp. 3-8.
- RIBEIRO, Orlando (1949) – “Le Portugal Central, Livre-guide d’Excursion C”. XVI Cong. Int. de Géographie, Lisbonne, pp. 1-180.
- RIBEIRO, Orlando (1954) – “Estrutura e relevo da Serra da Estrela”. Bol. R. Soc. Esp. Hist. Natural, Madrid, pp. 549-566.
- SERAFINO, J.F.C. (1961) – “Minério de urânio numa formação sedimentar lacustre da Urgeiriça”. Mem. Not. Mus. Lab. Min. Geol. Univ. Coimbra, nº 5, pp. 45-66.
- SILVA, A.F. da; REBELO, J.A.; RIBEIRO, M.L. (1989) – “Carta Geológica de Portugal (escala de 1/150000). Notícia explicativa da folha 11-C Torre de Moncorvo”. Serv. Geol. de Portugal, pp. 1-65.
- SILVA, M.M.V.G. da (1987) – “Geoquímica das rochas graníticas e seus minerais da região de Paredes da Beira-Penedono e considerações sobre as mineralizações associadas”. Tese de Mestrado na Universidade de Coimbra, pp. 1-112.
- SILVA, M.M.V.G. da (1995) – “Mineralogia, Petrologia e Geoquímica de encaves de rochas graníticas de algumas regiões portuguesas”. Tese de Doutoramento na Universidade de Coimbra, pp. 1-288.
- SILVA, M.M.V.G. and NEIVA, A.M.R. (1990) – “Geochemistry of the granites and their minerals from Paredes da Beira-Penedono, northern Portugal”. Chem. Geology, 85, pp. 147-170.
- SILVA, M.M.V.G. and NEIVA, A.M.R. (1999) – “Geochemistry of Hercynian peraluminous granites and their minerals from Carregal do Sal-Nelas-Lagares da Beira area, central Portugal”. Chem. Erde, 59, 329-349.
- STIEFF, L.R. and STERN, W. (1960) – “Age study of uraninites from the Urgeiriça and Lenteiros mines, Portugal”. Junta Energia Nuclear, Paper nº 27, pp. 11-17.
- TAYLOR, S.R. (1964) – “Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table”. Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 28, pp. 1273-1285.
- THADEU, D. (1951) – “Geologia e Jazigos de Chumbo e Zinco da Beira Baixa”. Bol. Soc. Geol. de Portugal, vol. IX, fasc. I-II, pp. 1-144.
- THADEU, D. (1965) – “Carta Mineira de Portugal na escala 1/500000. Notícia Explicativa”. Serv. Geol. de Portugal, pp. 1-45.

TRABALHOS
DE
GEOLOGIA DE ENGENHARIA

MULTI-SCALE GEOMETRICAL ANALYSIS OF FRACTURE NETWORKS IN GRANITE MASSIFS AND ITS APPLICATION TO LANDFILL SITE SELECTION

ANTÓNIO MATEUS¹, MÁRIO ABEL GONÇALVES¹,
FERNANDO O. MARQUES², FERNANDO MONTEIRO SANTOS³

KEY WORDS: fracture networks, multi-scale analysis, fractal geometry, granite massifs, waste disposal, landfill.

PALAVRAS CHAVE: redes de fracturas, análise multi-escala, geometria fractal, maciços graníticos, deposição de resíduos, aterros sanitários.

ABSTRACT

In the present work some numerical approaches are tested in order to comprehensively characterise the multi-scale geometry of the fracture network showed by a Variscan granite massif where a recent landfill is operating. The obtained results strongly suggest that the spatial distribution of fractures at different scales, particularly those sets that are strongly connected, must be considered in any technical solution concerning the minimisation and control of leachate leaking and dispersion via systematic and detailed monitoring. It is also shown that proper scaling of many of the geometric features displayed by natural fracture networks can be assessed by means of fractal methods, thus providing insights for predicting the character of fractures in unexposed domains of the rock mass, and supplying significant information to be used in fluid flow modelling. All these tasks are critical for a careful selection of acceptable sites for landfills construction on top of granite massifs as well as to design solutions to many problems concerning eventual leachate leaking and dispersion around dump cells.

¹ Dep. Geologia & CREMINER, Fac. Ciências da Univ. Lisboa, Ed. C2, Piso 5, 1749-016 Lisboa

² Dep. Geologia & LATTEX, Fac. Ciências da Univ. Lisboa, Ed. C2, Piso 5, 1749-016 Lisboa

³ Dep. Física & C. Geofísica, Fac. Ciências da Univ. Lisboa, Ed. C8, Piso 3, 1749-016 Lisboa

RESUMO: Análise geométrica multi-escala de redes de fracturas em maciços graníticos e sua aplicação à selecção de locais para aterros sanitários

Neste trabalho testam-se algumas abordagens numéricas com vista à caracterização geométrica multi-escala da rede de fracturas apresentada por um maciço granítico varisco onde se localiza um aterro sanitário recente. Os resultados obtidos indicam que qualquer solução técnica visando a minimização e controlo de fluxos de lixiviados e respectiva dispersão via monitorização sistemática do local intervencionado, deverá considerar a distribuição espacial de fracturas a diferentes escalas, especialmente as que constituem famílias de estruturas fortemente conectadas. Mais revelam que as extrapolações de escala poderão ser realizadas com base em métodos de análise fractal de diversos parâmetros geométricos, cujos resultados se afiguram determinantes na predição das características da rede de fracturas em domínios não aflorantes do maciço rochoso, fornecendo igualmente informações importantes ao desenvolvimento de modelos de escoamento de fluidos. Estes dados revelam-se críticos na selecção criteriosa de locais aceitáveis para a construção de aterros sanitários em maciços graníticos, assim como na pesquisa de soluções para muitos problemas relacionados com a eventual libertação e dispersão de lixiviados em torno das células de deposição de resíduos.

1. INTRODUCTION

Large inland areas of Portugal are dominated by strongly fractured Variscan granites and these rocks can hardly be circumvented when the future search for new disposal sites occurs as a response to the continuously increase of waste production (more than 30% in the last decade). The need of an accurate evaluation of these granite massifs for landfill engineering is obvious but, in practice, this apparently simple task may put some serious problems. In general, such evaluation is routinely based on factors that significantly reduce the dispersion of dissolved substances in ground and surface waters, where its effectiveness is a function of the ability to limit the volume of water that can penetrate the covered granite surface. This approach aims at minimise and retard the release and dispersion of pollutants to the environment. Accordingly, the multi-scale characterisation of the fracture network showed by granites is essential, regardless of the approach to evaluate and model the flow and transport pathways in such rocks.

The characterisation of natural fracture networks may involve different procedures, the most common are based on: 1) structural criteria, allowing the identification of different families existing within a fracture set through data inspection on the stereographic net; 2) spatial statistics, through the spatial analysis

of geometrical characteristics of fracture networks (DEUTSCH & JOURNEL, 1998); and 3) the characterisation of non-uniform fracture distributions by means of fractal geometry, once proven the scale invariance of fracture statistics (FALCONER, 1997, ZHANG *et al.*, 1996; MARGOLIN *et al.*, 1996; SAKELLARIOU *et al.*, 1991, BARTON, 1995; PAREDES & ELORZA, 1996; TURCOTTE, 1997).

The present work evaluates the fractal nature of the fracture network displayed by a Variscan granite massif located near Braga (N Portugal), where a recent landfill is operating. The spatial distribution and the major geometrical characteristics shown both by the lineament patterns and the mapped fracture networks at different scales were analysed by means of box counting and box density procedures. Additionally, the fracture spacing and density distributions are examined for several fractured granite outcrops. Models of fractal fragmentation are also briefly re-visited and tested using the obtained data. Finally, the procedures used in the multi-scale geometrical analysis are discussed, concerning their relevance in any scientific-technical approach designed for the selection of waste disposal sites on top of granite massifs and for the resolution of problems related to leachate leaking and dispersion.

2. GEOLOGICAL SETTING

The Braga region (N Portugal) is largely dominated by porphyroid granites dated at *ca.* 318 Ma by U/Pb method (DIAS *et al.*, 1998). A distinct fracture network can be easily recognised in this region, regardless of the observation scale, strongly controlling the major geomorphic features. The lineament pattern identified by means of satellite image interpretation at 1:50000 scale (fig. 1) displays good geometrical agreement with that obtained for the study area through vertical aerial photograph analysis at 1:23000 scale (fig. 2). Mapping of the fracture network at 1:25000 scale (fig. 3) shows that many of the interpreted lineaments indeed correspond to fault zones, or to strongly fractured rock domains, although their recognition and follow-up in the field may be severely compromised both in areas of intensive agricultural activity and of furzy covering. The majority of the mapped fractures are sub-vertical and the analysis of their direction using contoured projections reveals that four main families are present: $N70^{\circ}\pm 15^{\circ}$, $N0^{\circ}\pm 5^{\circ}$, $N20^{\circ}\pm 10^{\circ}$ and $N160^{\circ}\pm 10^{\circ}$ (see MARQUES *et al.*, 2001 for details).

The landfill is located on a structurally controlled ridge, by the influence of sub-vertical fractures and faults with directions ranging between ENE-WSW and E-W. Locally, the NW-SE and N-S fractures and faults are common and form intricate intersection patterns with the prevailing ENE-WSW to E-W systems. Detailed geological mapping of this sector is, however, seriously constrained because of the works related to landfill operation and of the furzy areas distribution.

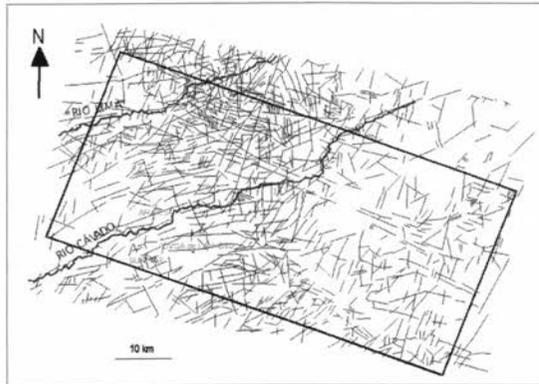


Fig. 1 – Satellite image interpretation of the lineament pattern shown by the region around the study area. The rectangle bounds the selected domain for fractal analysis.

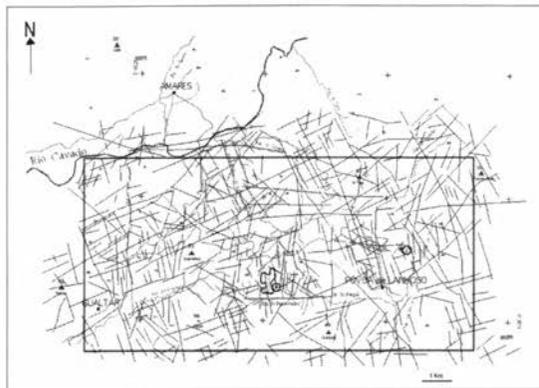


Fig. 2 – Vertical aerial photograph interpretation of the lineament pattern in the study area, which includes a recent landfill facility (**B**) and an old sealed dump (**C**); the rectangle bounds the selected domain for fractal analysis.

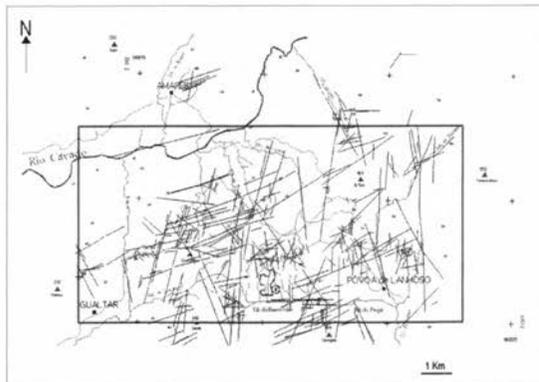


Fig. 3 – Fracture network of the study area; **B** and **C** as in fig. 2. The rectangle bounds the selected domain for fractal geometry analysis.

Figure 4 considers just the granite outcrops displaying more than one fracture family that can be marked at 1:10000 scale; in these sites, a systematic record of fault/fracture spacing were also performed along directions sub-perpendicular to the strike of the dominant family. During fieldwork strongly fractured rock domains were also identified and characterized in detail; one of them was mapped at 1:100 scale (fig. 5). These rock domains comprise usually many clusters of small length, mesoscopic fractures that often appears to be strongly connected.

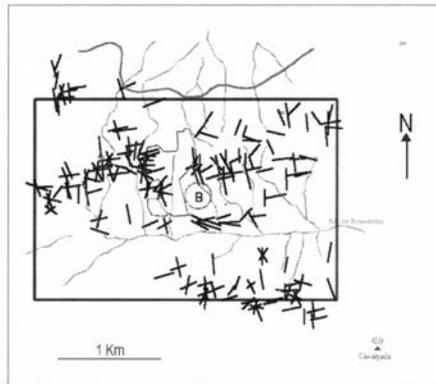


Fig. 4 – Distribution of the main mesoscopic fracture sets identified in granitic outcrops around the landfill facility (B). The rectangle bounds the selected domain for fractal geometry analysis.



Fig. 5 – Map of a representative, strongly fractured granitic outcrop located in the area adjoining landfill facility. The rectangle bounds the selected domain for fractal geometry analysis.

The available data for the site also comprise results from geo-electrical surveys and detailed geochemical analyses of water, soil and sediments; these are however beyond the scope of the present text but are fully reported in MATEUS *et al.* (2002), GONÇALVES *et al.* (2002a, b; *in press*), FIGUEIRAS *et al.* (2002; *sub.*) and MOTA *et al.* (*sub.*).

3. DATA COLLECTION AND CALCULATION PROCEDURES

The geometrical fractal analysis of the fracture network took into account data from different sources: lineament patterns from satellite image and aerial photograph interpretation and fracture field maps. The distribution of fracture spacing for each family was also examined with data from the 1:25000 and 1:100 maps along evenly spaced scan lines; these results were subsequently compared with the ones obtained in the field along selected sampling directions in well-exposed fractured rock domains. Additionally, the spatial distribution of fracture intersections on 1:25000, 1:10000 and 1:100 maps was analysed, in order to better characterise the geometry of fracture patterns. The analysis of fracture length distributions was not carried out given the problems usually faced during geological mapping. In fact: *i*) it is often difficult to interpret whether or not two fracture traces separated by a covered area represent the same discontinuity; *ii*) failures in the connectivity identification of distinct fracture trace exposures will result in underestimation of fractal dimensions; and *iii*) even in a completely exposed rock domain, fracture traces may be systematically biased if the map represents the loci of displacements greater than some threshold value. The systematic analysis of fracture apertures was also impracticable because of the great difficulty faced in measuring accurately this parameter *in situ*, and of the large variation that it typically shows along a given fracture.

3.1. COMPUTATION OF FRACTAL DIMENSION

84 The fractal dimension of a set of fracture traces distributed in a plane can be determined by different ways. In this work, box dimension (D_B) measures were computed by using box sizes δ that follow the geometric progression 0.5, 1, 2 and 4 cm. The number of boxes with side length δ necessary to cover the fracture network – $N(\delta)$ – for the entire range of δ values provides a mean to estimate how much space is filled by the whole network, given the proportionality between $\log N(\delta)$ and $\log \delta$ (*e.g.* BARTON, 1995). The slope of the fitting linear regression between $\log \delta$ and $\log N(\delta)$ estimated by the least-squares method is D_B , and the error in its determination can be as great as 0.05 (BARTON, 1995).

The box density dimension (D_{BD}) was also calculated for each case following the method proposed by LA POINTE (1988) and preserving the same range of linear box sizes; details on the algorithm used can be found in LA POINTE (1988). A similar procedure was applied to the analysis of the fracture intersections distribution, keeping in mind that, in this case, D_{BD} will measure the variation on the spatial clustering of mesoscopic fracture connectivity that, essentially, represents the main input or output rock domains of water flow (regarding their geological and/or geomorphic setting).

Fracture spacing is the average distance between adjacent pairs of discontinuities belonging to the same family, as measured between points along a given scan line that intersects the fracture traces. Scan lines were selected such that all set of fractures of different directional families have high angles relative to the scan line. Since distance between fractures is the shortest distance as measured perpendicular to each fracture, all data needed to be post-processed, apart from determining fracture strike and position. Therefore, all fractures were grouped into classes of different directions, having such directions been chosen according to field data. The classes ranged within $\pm 20^\circ$ from the chosen direction, and were allowed to overlap 5° over those next-positioned; in this way, some fractures counted equally to two classes of fractures. After such grouping, the average strike was determined and the spacing was averaged taking all values between each adjacent fracture as measured perpendicular to that average strike; the fracture density results as the reciprocal of the average spacing thus obtained.

3.2. FRAGMENTATION MODELS

Assuming that fragmentation probability is scale invariant, ALLÈGRE *et al.* (1982) and TURCOTTE (1986) developed models of fractal fragmentation using the Renormalization Group (RG) method. The latter author also demonstrated that the fractal dimension (D) of fragments distribution is independent of the volume ratio chosen in the RG approach, being, consequently, a good scale measure of the critical probability of fragmentation. Proceeding to a successive cell division until the n^{th} -order, the probability that an n -order cell have to generate fragments of $(n+1)$ -order, P_n , is given by $D = \log 8P_n / \log 2$ (TURCOTTE, 1986). Defining the topological conditions for which the elements of an n -order cell are fragile, one may subsequently calculate the probability of the event, setting P_n as a function of $P_{(n+1)}$ and, subsequently, determine the critical probability of fragmentation (P_C). Assuming a fragmentation model where a cell is considered fragile whenever: *i*) a "pillar" of sound elements (not permeated with micro-fractures) does not join two faces of an n -order cell (ALLÈGRE *et al.*, 1982), or *ii*) a set of fragile cells is present and materialise a weakness plane in the lower order cell (TURCOTTE, 1986), two

different polynomial expressions result for P_n as a function of $P_{(n+1)}$ and, consequently, two different P_C values can be calculated. A simple inspection of fracture networks in natural systems reveals, however, that not all of the weakness surfaces existing in a rock volume play equivalent roles in the fracturing processes. In fact, just those conveniently oriented to a given stress configuration are consequential, regardless the scale of brittle yielding and discarding the important effects of fluid pressure. From this, a different fragile criterion can be stated – an n -order cell will be fragmented only if the fragile elements materialises a weakness plane with a certain direction (MATEUS & GONÇALVES, 1993) – thus resulting in a new topological configuration and a variation of the fragmentation model reported by TURCOTTE (1986), described by a different polynomial expression

$$P_n = P_{(n+1)}^8 - 8P_{(n+1)}^7 + 24P_{(n+1)}^6 - 32P_{(n+1)}^5 + 16P_{(n+1)}^4 \quad (1)$$

for which P_C is 0.718. The derived D value, being equal to 2.52, agrees with the range of fractal dimensions reported in many studies that characterise fragmental distributions caused by natural and artificial fracturing processes ($2.5 \leq D \leq 2.6$; for details see, *e.g.*, TURCOTTE, 1997 and references therein).

In the present work, P_n calculation accepts D as equivalent to D_{BD} obtained for the 1:25000, 1:10000 and 1:100 fracture maps. The fragmentation model of MATEUS & GONÇALVES (1993) is considered for P_C definition. Therefore, if P_n values remain below 0.718, the rock mass will become more and more sound as n decreases, since P will tend quickly to 0. On the contrary, if P_n values are above 0.718, the rock mass will experience strong and self-similar fragmentation, because P will tend rapidly to 1 as n decreases.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The obtained values of D_B and D_{BD} are reported in Table I, considering the lineament and fracture distributions for different scales, as well as the respective fracture intersection distributions. For each case, the correlation coefficient (ρ) of the fitted least-square regression line between $\log N(\delta)$ and $\log \delta$ is shown.

Inspection of Table I reveal that all of the studied distributions display $\log N(\delta)$ - $\log \delta$ relationships very well described by straight lines with r values equal to -1.000 for lineament patterns, ranging from -1.000 and -0.991 for fracture networks, and scattered between -1.000 and -0.972 for fracture intersection arrangements.

Focusing our attention on D_B values, it is worth noting the large space occupied by lineament patterns (1.98 ± 0.01), whose self-similarity is convincing since the obtained difference (0.02) is within the estimation error of the used method.

Table I – D_B and D_{BD} values for the spatial distributions of lineaments, fractures and fracture intersections at different scales

	D_B	ρ	D_{BD}	ρ	P_n
A					
1:50000	1.99	-1.000	2.61	-1.000	
1:23000	1.97	-1.000	2.64	-1.000	
B					
1:25000	1.80	-0.999	2.40	-0.993	0.799
1:10000	1.61	-0.997	2.12	-0.991	0.708
1:100	1.92	-1.000	2.62	-0.998	0.875
C					
1:25000	1.30	-0.993	1.94	-1.000	
1:10000	1.10	-0.980	1.80	-0.972	
1:100	1.41	-0.985	1.95	-0.989	

A: Lineament patterns; B: Fracture networks; C: Fracture intersection distributions.

A different kind of problems can, however, be stated when D_B values of fracture networks are considered. In fact, although the dimension of the fracture network mapped at 1:100 scale is in acceptable agreement with those that characterise lineament patterns (being equal or slightly above the error involved in D_B estimation), thus supporting the self-similar nature of the study distributions, the significant differences found for the remaining cases should be properly explained. For the fracture network mapped at 1:25000 scale, the lower dimension is clearly a result of geological sampling, since it was not carried out any tentative to extrapolate data between outcrops separated by fuzzy fields or by areas subjected to anthropogenic activity; it will be shown hereafter that the consistency between D_{BD} values for the distribution of fracture intersections will support also this interpretation. Sampling problems intimately related to the constraints imposed by natural outcropping distribution may also be invoked to explain the dimension of the fracture network mapped at 1:10000 scale. It is, nevertheless, believed that this lowest D_B value (1.61) records preferentially the influence of the used mapping criteria: only setting down the mesoscopic fractures observed in scattered outcrops with more than one fracture set, whose spatial continuity was guaranteed at 1:10000 scale. The effects of deficient geological sampling and/or of the imposed mapping criteria, lead to an incomplete record of the fracture network and justify the obtained discrepancy between D_B values that characterise the distributions of fracture intersection at the three scales.

Box density dimensions for lineament patterns and fracture networks vary, as expected, between 2.00 and 3.00. The spatial distribution of lineaments is characterised by D_{BD} values of 2.61 and 2.64. The slightly higher dimension obtained for the photo-interpreted pattern at 1:23000 scale is in good agreement

with its tendency to have anisotropic blocks (due to the clear predominance of ENE-WSW to E-W lineaments), suggesting also that there are more blocks per unit area in this pattern, and so, a better connection between its elementary structural elements. Note that the pattern resulting from the satellite imaging interpretation shows a heterogeneous spatial distribution of lineaments, being also difficult to qualitatively identify which is the dominant set of directions.

It is particularly interesting to examine D_{BD} values concerning fracture networks at different scales, since they are lower than those calculated for lineaments distribution and vary significantly (from 2.12 to 2.62). The reasons for such difference and variation are diverse. The fracture network with the lowest dimension corresponds to that one mapped at 1:10000 scale, clearly having the fewest number of mesoscopic fractures and blocks; again, this is interpreted as an effect of the criteria used during mapping and of the outcrop distribution. Comparison between D_{BD} values concerning fracture distributions at 1:100 and 1:25000 scales (2.62 and 2.40, respectively) illustrates a difference that is mainly ascribable to sampling problems in the latter map, as a result of observation gaps that prevented the acquisition of geological data. The spatial distributions of fracture intersections at both scales are, however, characterised by identical D_{BD} values (1.95 and 1.94, following the order aforementioned), thus suggesting a self-similar nature for the examined fracture network. In this perspective, the lower dimension obtained for the spatial distribution of fracture intersections at 1:10000 scale (1.80, corresponding also to the worst least-squares fitting, *i.e.* -0.972) is explained as a direct consequence of the adopted mapping criteria.

Fracturing in several granite outcrops around the landfill facility is really more intense than in others located very close to the dump cells, leading to the formation of many blocks. This does not mean, however, that the selected area for waste disposal is totally appropriate. By the contrary, the suggested self-similar nature of the fracture network above can also be inferred from the strong agreement between D_{BD} values that characterise both the spatial fracture distributions mapped at 1:100 scale (2.62) and the lineament patterns at 1:23000 and 1:50000 scales (2.64 and 2.61, respectively). Therefore, the small range in D_{BD} values can be justified in terms of slightly differences on blocks development and orientation in the three scales used. Note again that the higher fractal dimension obtained for the lineament pattern at 1:23000 scale records quite well the coupled effect of block tendency towards anisotropy and of the great number of blocks defined at this scale.

In Table I, the calculated P_n values for the available fracture maps are also reported, making D in equation (1) equal to D_{BD} . According to the fragmentation model of MATEUS & GONÇALVES (1993), the critical probability ($P_C = 0.718$) stands below the obtained P_n for fracture networks mapped at 1:100 and 1:25000, and just slightly above (0.01) the value concerning the incompletely recorded fracture distribution at 1:10000 scale. From this, it is clear that successively lower volumes

of granite would behave predictably as brittle and comprise meso- and micro-fracture arrangements that preserve the geometry displayed by the mapped fracture networks.

The results of applying a Fourier transform spectral post-processor to the data collected at 1:10000 scale were rather noisy and non-interpretable; it was also virtually impossible to compute the covariance matrix. Data dispersion and scarcity may largely explain such results. Actually, data collection revealed a certain degree of clustering, which implied to have large non-sampled areas, and clusters of data points too close together. On average, distance between clusters is about half the mean cluster dimension. The tentative analysis of data points within each cluster also revealed to be insufficient because there were not enough points for the computation. Alternative methods will be essayed in the future, including conditional stochastic simulation (DEUTSCH & JOURNAL, 1998) and a more adequate form of fractal interpolation (BARNSELY, 1993; PUENTE *et al.*, 2001).

5. CONCLUSIONS

Granitic massifs usually display non-uniform fracture networks of variable complexity that comprise strongly connected structural discontinuities responsible for different pathways through the rock, allowing water flow and, thus, the development of many chemical processes intimately related to water-rock interaction (such as precipitation-dissolution reactions, surface sorption, complexation, and transformation of organic compounds). This is chiefly true for Variscan granites located in the Iberian Massif, invariably affected by a prominent fracture network whose main sets were successively reactivated since the end of Variscan Orogeny until the present (MARQUES *et al.*, 2002). In these geological settings, particular difficulties are expected in the determination of fracture geometry and flow physics, and so the identification and representation of the heterogeneous properties of the connected fracture network. These should be properly scaled in order to better constrain boundary conditions of numerical models of flow in fractured media.

In the present work, the fractal dimensions of lineament and fracture distributions show that satellite imaging and aerial photograph interpretation can be accurately used as a first approach to identify granite domains lesser fractured, hence more suitable for hosting landfill facilities. The available data reveal also that: 1) a detailed analysis of the fracture network can be carried out in well exposed granite outcrops, given the self-similar nature of the fracture network; 2) the development of a slightly block anisotropy is due to the predominance of the ENE-WSW — E-W fracture set; 3) the most relevant variation in spatial clustering of fracture intersections involves the ENE-WSW — E-W and N-S — NNE-SSW fracture sets, and records the presence of many rock domains with strongly

connected structures which can rule the major fluxes of water flow in granites; this is particularly important westwards and south-eastwards of the landfill; and 4) the granite comprise meso- and micro-fracture networks that preserve the geometry displayed by the mapped fracture networks.

ACKNOWLEDGMENTS

The financial support of FCT through the research project DIWASTE (PRAXIS/P/CTE/11028/1998) is appreciated.

REFERENCES

- ALLÈGRE C. J., LE MOUËLL J. J., PREVOST A. (1982). Scaling rules in rock fracture and possible implication for earthquake prediction. *Nature*, 287: 47-49.
- BARTON C.C. (1995). Fractal analysis of scaling and spatial clustering of fractures. In *Fractals in the Earth Sciences*, C.C. Barton P.R. La Pointe, eds., Plenum Press, New York, 141-178.
- BARNESLEY M.F. (1993). *Fractals Everywhere*. 2nd Ed., Academic Press.
- DEUTSCH, C, JOURNAL, A. G. (1998). GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, 2nd Ed., Oxford Univ. Press.
- DIAS G., LETERRIER J., FERREIRA N., LOPES NUNES J.E. (1998). U-Pb zircon and monazite geochronology of post-collisional Hercynian granitoids from the Central Iberian Zone (Northern Portugal). *Lithos*, 45: 349-369.
- FALCONER K. (1997). *Techniques in Fractal Geometry*. John Wiley & Sons, Chichester.
- FIGUEIRAS J., GONÇALVES M.A., MATEUS A., MARQUES F.O., MONTEIRO SANTOS F., MOTA R. (2002). Monitorization of the initial stages of dispersion of pollutants around municipal waste disposal facilities. *The Role and Fate of Trace Metals in Crustal Fluids*, ESF Conference, Austria: 69-70.
- FIGUEIRAS J., GONÇALVES M.A., MATEUS A., MARQUES F.O., MONTEIRO SANTOS F., MOTA R. – Initial stages of pollutant dispersion around municipal waste disposal facilities; a case study in northern Portugal. *Chemical Geology* (submitted).
- GONÇALVES M.A., CERQUEIRA L., FIGUEIRAS J., PUTNIS C.V. (2002b). Use of micro-PIXE and SEM to study metal adsorption and artificial solid phases in polluted environmental sediment samples. *The Role and Fate of Trace Metals in Crustal Fluids*, ESF Conference, Austria: 79-80.
- GONÇALVES M.A., NOGUEIRA J.M.F., PUTNIS C.V., FIGUEIRAS J. (2002a). Metal and micro-organic pollutant partitioning between sediments and waste waters from a landfill. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66(S1): A285.
- GONÇALVES M.A., NOGUEIRA J.M.F., FIGUEIRAS J., PUTNIS C.V., ALMEIDA C. – Base-metals and organic content in stream sediments in the vicinity of a landfill. *Applied Geochemistry* (in press).
- HOWARD J.H., NOLEN-HOEKSEMA R.C. (1990). Description of natural fracture systems for quantitative use in petroleum geology. *Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, 74: 151-162.
- LA POINTE P. R. (1988). A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25: 421-429.

- MARGOLIN G., BERKOWITZ B., SCHER H. (1998). Structure, flow, and generalized conductivity scaling in fracture networks. *Water Resources Research*, 34: 2103-2121.
- MARQUES F.O., MATEUS A., AMARAL H., GONÇALVES M.A., TASSINARI C., SILVA P., MIRANDA J.M. (2001). The Amares basin: an ENE-WSW graben formed by recent reactivation of the Late-Variscan fracture network? *Comun. Inst. Geol. e Min.*, 88: 33-50.
- MARQUES F.O., MATEUS A., TASSINARI C. (2002). The Late-Variscan fracture network in Central-Northern Portugal (NW Iberian): a re-evaluation. *Tectonophysics*, 359: 255-270.
- MATEUS A., GONÇALVES M.A. (1993). Caracterização geométrica e distribuição fractal da fracturação adjacente à Falha da Vilariça no sector da Quinta da Terrincha (NE de Portugal). *Gaia*, 6: 43-58.
- MATEUS, A., ALMEIDA, C., MONTEIRO SANTOS, F., MARQUES, F.O., MARQUES, F., AMARAL, H., FIGUEIRAS, J., MIRANDA, J., GONÇALVES, M.A., SILVA, P., MOTA, R. (2002) – Fluid flow in fractured rocks and its implications for waste disposal criteria. *Research Project PRAXIS XXI/P/CTE/11028/98. Unpublished Final Report*, Fundação para a Ciência e Tecnologia, Lisbon, 293 pp.
- MOTA R., MONTEIRO SANTOS F., MATEUS A., MARQUES F.O., GONÇALVES M.A., FIGUEIRAS J., AMARAL H. – Geoelectrical study of a recent landfill facility in a fractured crystalline basement. *J. Applied Geophysics* (submitted).
- PAREDES C., ELORZA F.J. (1999). Fractal and multifractal analysis of fractured geological media: surface-subsurface correlation. *Computers & Geosciences*, 25: 1081-1096.
- PUENTE, C. E., ROBAYO, O., DÍAZ, M. C. & SIVAKUMAR, B (2001). A fractal-multifractal approach to groundwater contamination. 1. Modelling conservative tracers at the Borden site. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 15: 357-371.
- SAKELLARIOU M., NAKOS B., MITSAKAKI C. (1991). On the fractal character of rock surfaces. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 28, 6: 527-533.
- TURCOTTE D. (1986). Fractals and fragmentation. *J. Geophys. Res.*, 91: 1921-1926.
- TURCOTTE D. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. 2th Ed., Cambridge Univ. Press.
- ZHANG X., SANDERSON D.J., HARKNESS R.M., LAST N.C. (1996). Evaluation of the 2D permeability tensor for fractured rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 33 (1): 17-37.

INCIDÊNCIAS AMBIENTAIS ASSOCIADAS À INSTALAÇÃO DE CEMITÉRIOS: ABORDAGEM HIDROGEOLÓGICA

A. LIMA¹, J. PAMPLONA¹, S. ANTUNES¹ e J. C. GONÇALVES¹

PALAVRAS-CHAVE: impacto ambiental, cemitério, contaminação, hidrogeologia, água subterrânea.

KEYWORDS: environmental impact, graveyard, contamination, hydrogeology, groundwater.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma abordagem hidrogeológica visando a previsão das incidências ambientais decorrentes da eventual instalação de um cemitério na freguesia de Cambeses, concelho de Barcelos. O local pretendido situa-se numa cumeada com drenagem preferencial para leste e assenta num granito porfíroide de grão grosseiro, essencialmente biotítico, o qual apresenta elevado grau de alteração (W_{4-5}). Este sector é atravessado por um desligamento dextrógiro com orientação N 70° E. A infiltração é estimada em cerca de 25% da precipitação e o escoamento subterrâneo processa-se, em termos gerais, de Oeste para Este, segundo circuitos corticais. A área em apreço apresenta uma densa rede de pontos de água, cuja composição química principal se enquadra predominantemente na fácies cloretada sódica. Globalmente pouco mineralizadas, algumas águas subterrâneas apresentam teores elevados de nitratos, cloretos, sódio, alumínio e zinco, indiciando contaminação antropogénica. As características hidrogeológicas identificadas mostram que se trata de um ambiente hidrogeológico bastante vulnerável, pelo que se conclui que a área estudada não apresenta características compatíveis com o fim pretendido.

¹ CIG-R, Dept. Ciências da Terra, Univ. do Minho, 4710-057 Braga, aslima@det.uminho.pt

ABSTRACT: Environmental hydrogeological impacts imposed by a graveyard

To evaluate the environmental impact of an intended graveyard, a hydrogeological study was carried out in Cambeses, Barcelos. The area proposed for the setting of this graveyard is located in a mountain ridge with eastward runoff. Geologically, the area comprises a biotite-rich, coarse grained, porphyritic granite with high weathering degree (W_{4-5}) and is crossed by a dextral strike-slip fault with N 70° E strike. Recharge is estimated to be 25% of rainfall and groundwater flow is preferentially eastward, following shallow pathways. The studied area has a high density of groundwater sampling points that mostly belongs to a chloride-sodium facies. Generally, these groundwaters have low mineralization but some samples have high contents of nitrate, chloride, sodium, aluminium and zinc, indicating anthropogenic contamination. Hydrogeological setting of proposed area shows its high vulnerability to contamination and, therefore, it is not favourable to the implantation of a graveyard.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, a selecção de locais para a inumação de cadáveres não levou em consideração aspectos ambientais, designadamente os relacionados com a contaminação das águas subterrâneas. Os cemitérios localizavam-se nas proximidades das igrejas de forma a facilitar os rituais religiosos. Dado que as igrejas (e os cemitérios) se situam, em muitos casos, em locais de cota elevada, a migração dos produtos resultantes da decomposição dos cadáveres é facilitada pela acção das águas de infiltração. Com efeito, a oxidação da matéria orgânica disponibiliza um conjunto de elementos e compostos que podem acabar por atingir a zona saturada das formações geológicas e contaminar as águas subterrâneas, exploradas, normalmente, a cotas inferiores.

Actualmente, a instalação deste tipo de infra-estruturas é geralmente precedida pela avaliação do seu potencial impacto ambiental, nomeadamente a nível das águas subterrâneas.

O presente trabalho é o produto de um estudo efectuado na região de Barcelos, num sector proposto para a instalação de um novo cemitério na freguesia de Cambeses (fig. 1), visando a sua caracterização hidrogeológica e a previsão das incidências ambientais decorrentes da sua eventual instalação.

Para o efeito, adoptou-se a abordagem hidrogeológica que se apresenta no ponto seguinte.

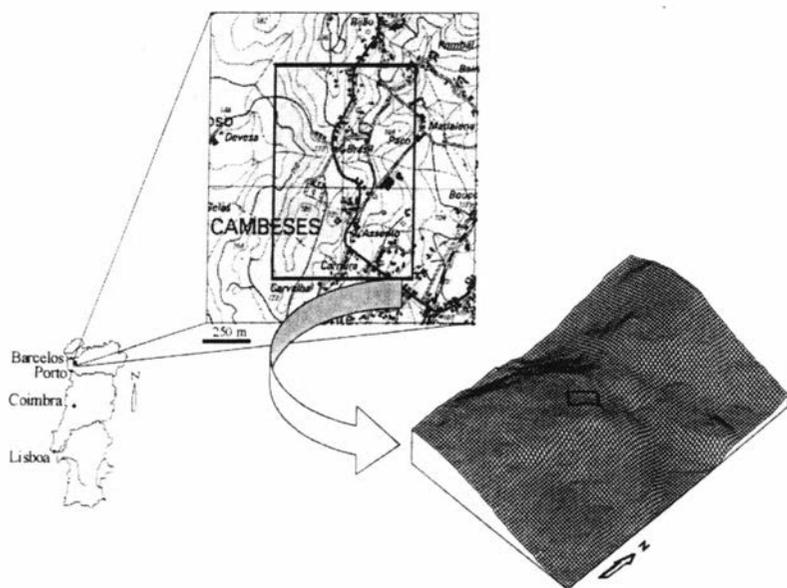


Fig. 1 – Localização do sector em estudo e representação tridimensional da morfologia dos terrenos adjacentes à área prevista para a instalação do novo cemitério de Cambeses (polígono).

2. METODOLOGIA

A abordagem hidrogeológica da área pretendida baseou-se numa metodologia que pode sintetizar-se da seguinte forma: *i*) levantamento geológico à escala 1/5 000 do sector, de modo a aferir da maior ou menor susceptibilidade do meio geológico à contaminação, partindo da avaliação, a uma escala de pormenor, das litologias presentes, assim como da compartimentação do maciço granítico; *ii*) inventário de pontos de água e medição da profundidade da captação, profundidade do nível freático, condutividade eléctrica da água, temperatura, pH e Eh; *iii*) colheita de amostras de água subterrânea em 18 pontos seleccionados e respectivas análises físico-químicas que incluíram elementos maiores, menores e vestigiais. A análise dos diferentes tipos de dados e a sua subsequente integração permitiram prever as incidências a nível hidrogeológico, decorrentes da eventual instalação do cemitério.

95

3. ENQUADRAMENTO

A área prevista para a instalação de um novo cemitério na freguesia de Cambeses corresponde a um quadrilátero com cerca de meio hectare (fig. 1).

Do ponto de vista morfológico, o local pretendido corresponde a uma portela situada numa linha de cumeeada com orientação média N-S. O escoamento superficial processa-se de modo divergente para Oeste e para Este. Atendendo a esta situação geomorfológica específica, admite-se que também o escoamento subterrâneo divirja para um e outro lado da cumeeada. No entanto, como se depreende da análise do relevo (fig. 1), a faixa oriental afigura-se mais favorável à drenagem das águas subterrâneas subjacentes ao local pretendido para instalação do cemitério.

Em termos de declividade (fig. 2), verifica-se que a vertente oriental apresenta valores superiores aos da vertente ocidental.

O declive máximo registado na vertente oriental (36°) é superior à média (22°) referida por LIMA (2001) para a região do Minho. Pelo contrário, o declive máximo da vertente ocidental não atinge aquele valor mediano. Este aspecto é de salientar, uma vez que o escoamento superficial se processa mais rapidamente para Leste.

No que respeita à geologia (fig. 3), a área em apreço caracteriza-se pela presença de granitóides biotíticos com plagioclase cálcica, subdividindo-se em duas litofácies: *i*) um granito porfíróide de grão grosseiro, essencialmente biotítico, sin a tardi-tectónico relativamente a F_3 e *ii*) um granodiorito biotítico tardi a pós-tectónico (PEREIRA, coord., 1989). Foi possível observar localmente contacto por falha entre estas duas litofácies (fig. 3).

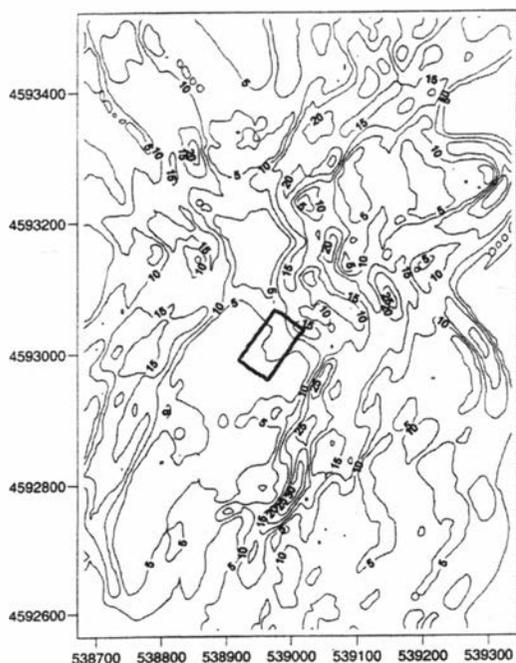


Fig. 2 – Declividade do sector em estudo (valores em graus). O rectângulo interior representa a área prevista para o cemitério. Referenciação quilométrica UTM, fuso 29.

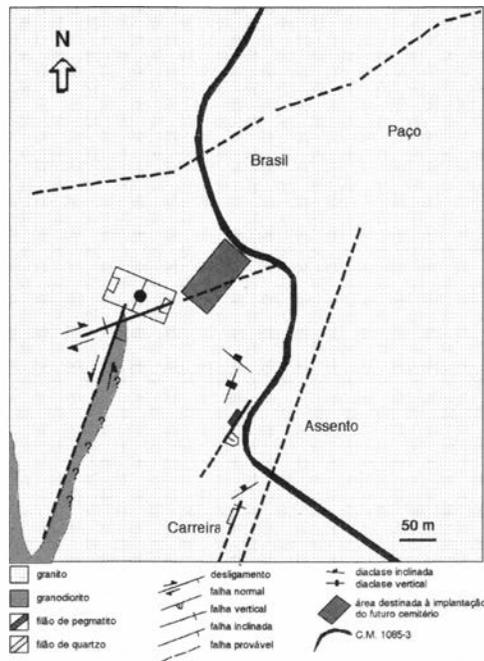


Fig. 3 – Esboço geológico da área estudada.

A fracturação observada obedece à tectónica tardi a pós-Varisca, enquadrando-se as principais fracturas nos azimutes $N20^{\circ}E$ (sinestróginas, pontualmente com ligeira componente normal) e $N70^{\circ}E$ (dextrógiros). Estas orientações estão bem marcadas na configuração do relevo, quer na orientação das linhas de cumeeada, quer na própria organização da rede hidrográfica. De notar que a área destinada à implantação do novo cemitério é provavelmente atravessada por uma daquelas rupturas (fig. 3), o que torna o terreno mais vulnerável à poluição. O substrato granítico encontra-se alterado a muito alterado – $W_{4.5}$ (I.S.R.M., 1981), dando origem a mantos descontínuos que podem ultrapassar uma dezena de metros de espessura vertical.

4. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

4.1 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico médio anual da região pode resumir-se da seguinte forma (LIMA, 2001): precipitação = 1650 mm; evapotranspiração efectiva = 745 mm; escoamento superficial = 492 mm; escoamento subterrâneo = 413 mm.

Com base nestes dados, verifica-se que o coeficiente de infiltração é da ordem de 25% da precipitação, correspondendo 34% ao escoamento superficial. Os restantes 41% são devolvidos à atmosfera por evapotranspiração. Atendendo à morfologia aplanada e ao elevado grau de alteração dos granitos (W_4 - W_5), admite-se que a infiltração possa ser superior ao valor apresentado. Além disso, a permeabilidade deste tipo de terrenos é relativamente elevada, como se depreende dos resultados obtidos noutros locais com características idênticas. Com efeito, na região de Guimarães, obtiveram-se valores de permeabilidade que variam entre 0,1 m/dia e 4,3 m/dia (LIMA *et al.* 2001), enquadráveis nos valores típicos das areias finas bem calibradas (FETTER, 1994) e nos de granitos alterados (DOMENICO e SCHWARTZ, 1990). Os granitos alterados da região apresentam uma baixa percentagem de minerais de argila (BRAGA, 1999).

4.2. ESCOAMENTO SUBTERRÂNEO

Na área estudada foram inventariados 50 pontos de água (fig. 4). A tipologia destes pontos tem a seguinte distribuição: 26 poços de grande diâmetro, 15 furos, 4 galerias (minas), 4 poços de limpeza de galerias e 1 reservatório.

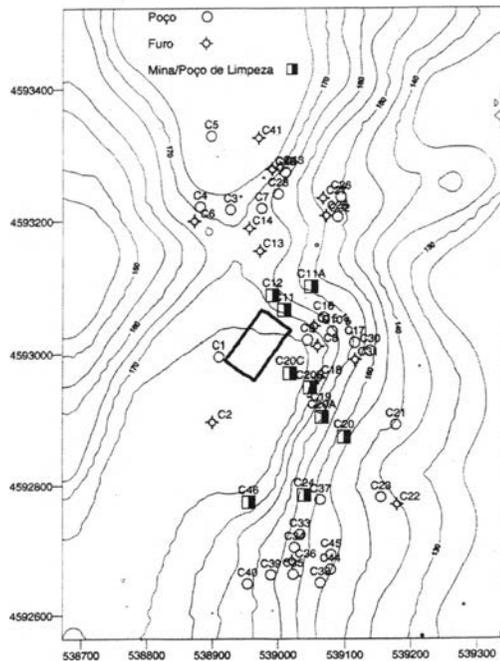


Fig. 4 – Localização e tipologia dos pontos de água inventariados. Referenciação quilométrica UTM, fuso 29.

O escoamento subterrâneo processa-se, de um modo geral, de Oeste para Este, a partir da linha de cumeeada (fig. 5). O gradiente hidráulico nas imediações da área pretendida para a instalação do cemitério é de 0,144.

Um dos aspectos relevantes a considerar neste estudo é a profundidade do nível freático. A profundidade mínima medida foi de 1,5 m no poço C23, enquanto a máxima (33,9 m) foi registada no furo C43. Nas imediações do local previsto para o cemitério, o nível freático situa-se a cerca de 9 metros de profundidade. A este propósito convém destacar dois aspectos: *i*) em primeiro lugar salienta-se que neste tipo de ambiente hidrogeológico o nível freático apresenta importantes flutuações sazonais, podendo atingir quase uma dezena de metros (LIMA, 2001); *ii*) em segundo lugar, os níveis medidos poderão não traduzir condições hidrostáticas. Por exemplo, é bastante provável que o furo C43 tenha sido sujeito a extracção antes de se ter medido o nível freático. Por isso, e referindo-nos ao local pretendido, é de colocar a possibilidade do nível freático se situar, em certos períodos do ano, a profundidades inferiores a 9 m.

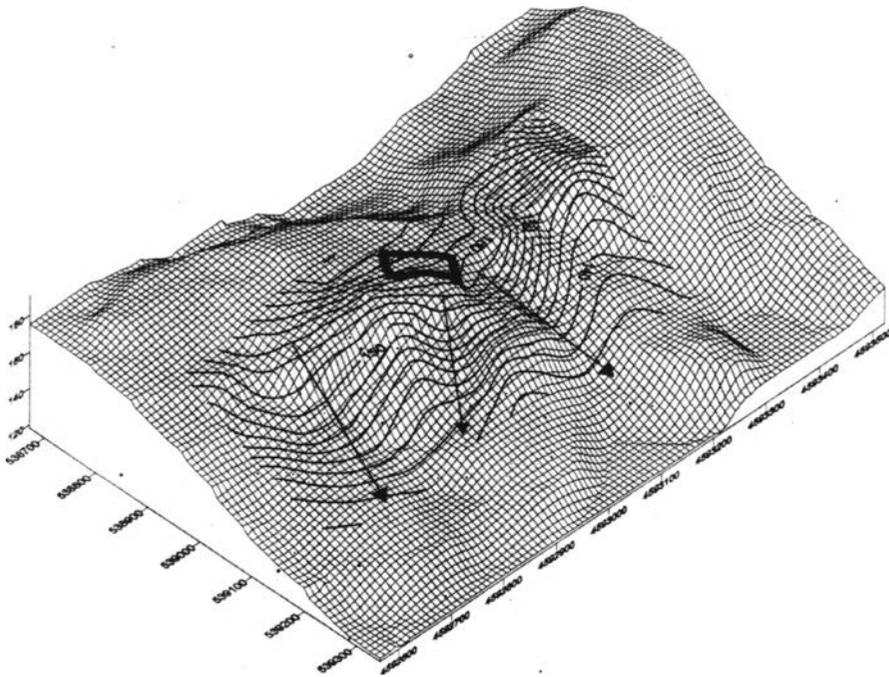


Fig. 5 – Piezometria e escoamento subterrâneo. Referência quilométrica UTM, fuso 29, altitude em metros.

4.3. HIDROGEOQUÍMICA

No Quadro I apresenta-se uma síntese estatística dos resultados analíticos das 18 amostras de água seleccionadas.

Quadro I – Estatística descritiva dos resultados analíticos (N = 18; condutividade em $\mu\text{S}/\text{cm}$; temperatura em $^{\circ}\text{C}$; Eh em mV; * teores em ppm; ** teores em ppb).

	Min	Max	Média	D. padrão	C. variação
Condutividade	82	662	211	145	69
Temperatura	13,5	15,9	14,8	0,7	5
pH	5,08	6,82	5,93	0,49	8
Eh	240	354	294	30	10
Ca*	1,70	24,20	8,99	6,55	73
Mg*	1,10	14,60	4,52	3,67	81
Na*	9,80	72,90	21,57	15,50	72
K*	0,80	9,70	3,04	2,18	72
HCO ₃ *	5,92	96,40	25,72	23,21	90
Cl*	8,99	74,90	23,04	16,77	73
SO ₄ *	0,30	13,08	3,48	3,64	105
NO ₃ *	0,01	194,77	39,32	51,36	131
SiO ₂ *	14,70	35,09	21,80	5,29	24
Li**	0,5	27,7	6,8	7,0	103
Be**	0,05	6,30	1,02	1,50	147
Al*	3	731	86	175	203
Sc*	4	11	7	1,8328876	26
Ti**	2,3	6,8	4,5	1,1	24
Mn**	0,5	259,0	32,8	65,9	201
Fe**	1	80	15	18	120
Co**	0,015	1,890	0,368	0,620	168
Cu**	0,3	76,5	18,9	25,0	132
Zn**	3,3	467	58,8	109,1	186
As**	0,15	4,12	1,22	1,11	91
Br**	66	235	120	45	38
Rb**	0,497	18,0	5,25	4,42	84
Sr**	11,6	255,0	61,7	57,7	94
Y**	0,042	6,56	1,36	2,06	151
Zr**	0,005	2,092	0,161	0,483	300
Cd**	0,01	0,28	0,07	0,07	100
Sb**	0,005	0,217	0,056	0,068	121
Cs**	0,005	0,406	0,096	0,115	120
Ba**	3,4	241	47	60	128
La**	0,002	2,48	0,25	0,62	248
Ce**	0,002	4,19	0,32	0,98	306
Eu**	0,001	0,17	0,029	0,046	159
Dy**	0,003	0,968	0,164	0,268	163
Er**	0,003	0,500	0,106	0,158	149
Yb**	0,002	0,434	0,103	0,149	145
Pb**	0,05	3,00	0,51	0,69	135
U**	0,05	2,81	0,51	0,67	131

Como se observa (Quadro I), trata-se, genericamente, de águas muito pouco mineralizadas (condutividade média = 211 mS/cm), embora se tenham identificado, pontualmente, mineralizações bastante elevadas em termos regionais.

A projecção da composição química principal daquelas amostras em diagrama de Piper (Figura 6), mostra que as águas se enquadram, de um modo geral, na fácies cloretada sódica, que é aliás a fácies dominante na região NW de Portugal (LIMA, 2001). Todavia, o sector SW da área em estudo apresenta um quimismo algo diferenciado da restante área, já que as águas tendem a ser bicarbonatadas sódicas ou mesmo bicarbonatadas cálcicas (amostras C1 e C39). A ausência ou baixa concentração de nitratos nestas amostras sugere que as rochas percoladas pela água poderão ser mais básicas (fig. 3).

Para a mineralização destas águas contribuem a totalidade ou apenas alguns dos seguintes processos: *i*) concentração por evaporação das águas de infiltração; *ii*) interacção água – rocha e *iii*) influência antrópica. Os dois primeiros estão presentes em todas as amostras recolhidas. Quanto à influência antrópica, ela é mais evidente nas águas com teores de nitratos relativamente elevados, como é o caso das amostras dos pontos C19, C43 e C17 com 195 mg/L, 98 mg/L e 93 mg/L, respectivamente (fig. 7).

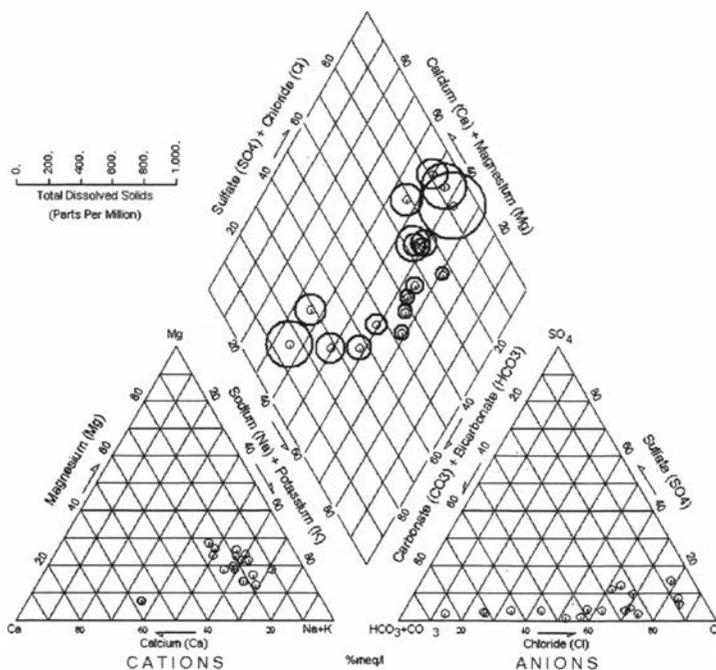


Fig. 6 – Projecção da composição química das amostras em diagrama de Piper.

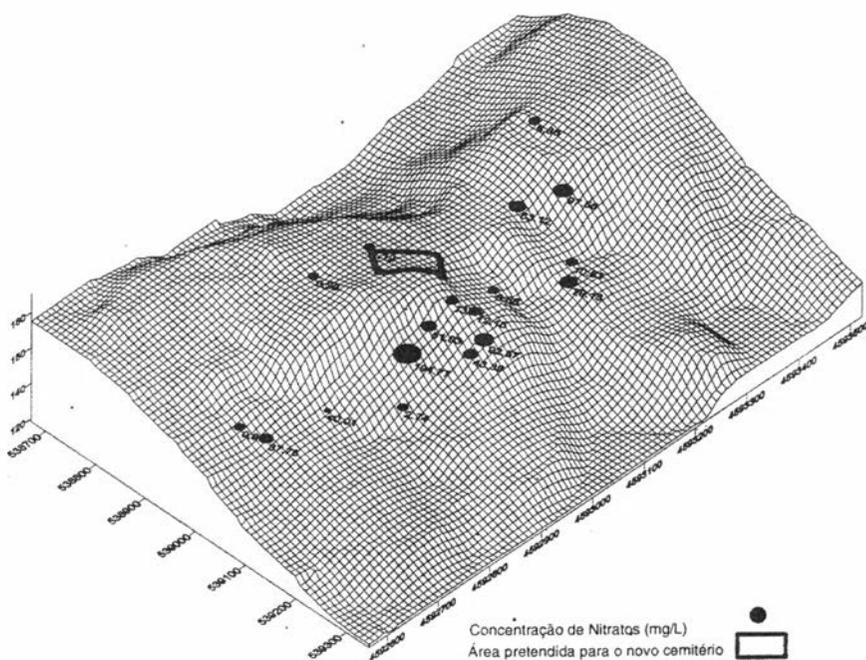


Fig. 7 – Teores de nitratos nas amostras analisadas. A dimensão do círculo é directamente proporcional à concentração (inscrita ao lado). Referenciação quilométrica UTM, fuso 29, altitude em metros.

A concentração por evaporação das águas de infiltração é realçada, por exemplo, pela boa correlação entre os teores de sódio e cloreto ($R=0,98$) ou entre os teores de cloreto e magnésio ($R=0,91$).

Relativamente à interacção água – rocha, obtém-se uma correlação aceitável ($R=0,77$) entre os teores de sílica e bicarbonato, indicando a importância deste processo na mineralização das amostras.

No que respeita à qualidade das águas analisadas, tomaram-se como referência as normas expressas no Anexo VI do Decreto-Lei n.º 236/98 de 1 de Agosto, relativas ao consumo humano. Da análise destes dados sobressaem, em termos de parâmetros, os teores de sódio, alumínio, zinco, nitrato, fosfato e cloreto, por ultrapassarem, em algumas amostras, os valores máximos recomendados (VMR) ou mesmo os admissíveis (VMA). Em termos de pontos de água, ressaltam as águas dos pontos C19 e C43, uma vez que apresentam teores de nitrato, manganês e alumínio superiores ao VMA, para além de possuírem teores de cloreto, sódio, zinco e a própria condutividade eléctrica superiores ao VMR. Estes dados sugerem que a contaminação neste sector é fundamentalmente de origem orgânica e estará provavelmente relacionada com a rejeição não controlada de efluentes domésticos no meio hídrico. Tal atitude explica-se pela inexistência de saneamento básico na região.

Apesar dos teores de nitratos em algumas amostras (33%) ultrapassarem o VMA, é de salientar que a maioria (56%) apresenta concentrações naquele parâmetro compatíveis com a sua utilização no consumo humano, existindo mesmo quatro amostras (C2, C24, C11A, C39) com teores inferiores a 1 mg/L.

Relativamente aos teores em sódio, verifica-se que o VMR é ultrapassado em sete amostras, as quais possuem também teores muito levados de nitratos.

No que respeita ao alumínio, existem três amostras com teores superiores ao VMR e duas amostras com teores superiores ao VMA. Os teores registados nestas duas amostras (C19 e C43) sugerem tratar-se de casos de contaminação, até porque patenteiam também teores elevados noutros parâmetros inequivocamente relacionados com a actividade antrópica (*e.g.*, o nitrato). A propósito deste parâmetro, e na tentativa de identificar se se trata de contaminação difusa ou pontual, elaborou-se um mapa com a distribuição dos respectivos teores (Figura 7), tendo-se verificado que a contaminação é de carácter local.

5. PREVISÃO DE INCIDÊNCIAS AMBIENTAIS

A eventual instalação do novo cemitério de Cambeses terá algumas incidências ambientais que detalhamos seguidamente:

1. Por se tratar de uma área de recarga, a situação geomorfológica do local pretendido é, do ponto de vista quantitativo, desfavorável à implantação do cemitério, uma vez que a instalação do mesmo fará diminuir a área de infiltração e, consequentemente, a recarga aquífera, traduzindo-se na redução dos recursos hídricos subterrâneos locais. Contudo, a área afectada é de cerca de 0,5 ha, o que, de acordo com o referido em 4.1., equivale a perdas directas de cerca de 2 000 m³/ano, o que não é significativo em termos regionais;
2. Ainda devido ao facto de se tratar de uma área de recarga e dado que o sentido do escoamento subterrâneo se faz para leste, é de admitir que qualquer situação de contaminação por parte do cemitério possa reflectir-se a nível da qualidade das águas captadas a jusante. Entre os vários pontos de água que poderão ser afectados, o mais sensível será o C11, pois a mina que drena a água situa-se nas imediações da futura localização do cemitério. Especial atenção merece, ainda, o ponto C20, uma vez que não está excluída a possibilidade da mina atingir o local previsto para o cemitério. Mesmo que tal não se verifique, esta galeria drena áreas muito próximas daquele local, o que a torna muito vulnerável. Os pontos C1 e C2 também podem ser afectados se o regime de exploração dos mesmos implicar grandes rebaixamentos;
3. O substrato geológico-estrutural é motivo também de alguma apreensão, sobretudo pelo facto do granito se encontrar bastante meteorizado e pela

presença de um desligamento direito com orientação ENE-WSW, identificado nas proximidades e aproveitado, em parte, pela linha de água que corre junto a C11A. Esta ruptura, constituindo um eixo preferencial de escoamento subterrâneo, aumenta a vulnerabilidade dos pontos situados nas suas imediações;

4. A profundidade do nível freático e a sua variação sazonal são aspectos muito importantes a considerar. Os dados obtidos sugerem que a superfície freática se situa acima dos 9 metros, portanto bastante próxima da superfície topográfica. O carácter cortical dos circuitos subterrâneos penaliza o local em termos de susceptibilidade à poluição;
5. A qualidade dos recursos hídricos subterrâneos constitui também factor a ponderar. Se é verdade que grande parte das águas existentes nas proximidades do local pretendido apresenta já índices de poluição consideráveis, não é menos verdade que o ponto mais vulnerável (C11) possui ainda uma água de boa qualidade (0,66 mg/L de nitratos).

6. CONCLUSÕES

As características hidrogeológicas da área pretendida para a instalação do novo cemitério de Cambeses revelam um ambiente hidrogeológico bastante vulnerável a qualquer tipo de perturbação. Tal sensibilidade advém:

- (i) Das características geomorfológicas do local, destacando-se o facto de se tratar de uma área de recarga, com implicações directas a nível da recarga aquífera, provocando uma diminuição dos recursos hídricos subterrâneos renováveis;
- (ii) Das suas características geológicas, designadamente o grau de alteração do substrato rochoso que tem fortes implicações a nível da permeabilidade, cujos valores sugerem que a progressão de possíveis plumas contaminantes se faça a uma taxa relativamente rápida, o que, juntamente com a fraca percentagem de minerais de argilas, fará com que os poluentes atinjam com facilidade as águas subterrâneas;
- (iii) Da pequena espessura da zona não saturada do solo;
- (iv) Da presença de circuitos subterrâneos corticais;
- (v) Da maioria das captações serem relativamente superficiais.

Além dos factores supra mencionados, a instalação do cemitério terá, provavelmente, de recorrer a obras de escavação e desaterro, o que coloca o nível freático ainda mais próximo da superfície topográfica, aumentando, assim, a vulnerabilidade do meio.

A abordagem hidrogeológica efectuada pôs em relevo os principais aspectos a considerar na instalação deste tipo de infra-estruturas sanitárias e permitiu concluir que as incidências ambientais associadas à instalação do cemitério de Cambeses serão significativas. Salienta-se, contudo, que o presente estudo teve em consideração apenas descritores hidrogeológicos, aspectos fundamentais mas não únicos a atender na selecção de locais para a instalação de infra-estruturas sanitárias como a que constituiu o objecto do actual trabalho.

7. BIBLIOGRAFIA

- BRAGA, M. A. S. (1999) – Arenização: Interesse Geológico e Geomorfológico. *Encontros de Geomorfologia. Conferências*, Coimbra, pp. 31-55.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, F. W. (1990) – *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley & Sons, 824 p.
- FETTER, C. W. (1994) – *Applied Hydrogeology*. Third edition, Prentice-Hall, New Jersey, 691 p.
- I.S.R.M. (1981) – Basic Geotechnical Description of Rock Masses. *Int. J. Rock Mech Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 18, pp. 85-110.
- LIMA, A. S.; PAMPLONA, J.; ANTUNES, A. S. (2001) – *Estudo de Impacto Hidrogeológico Associado à Instalação do Novo Cemitério de Briteiros – Guimarães*. Relatório inédito.
- LIMA, A. S. (2001) – *Hidrogeologia de Terrenos Graníticos. Minho-Portugal*. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Braga, 451p.
- PEREIRA, E. (coord.) (1989) – Carta Geológica de Portugal. Folha 1. Escala 1/200 000. Serv. Geol. Portugal.

MONITORIZAÇÃO DO ATERRO MULTIMUNICIPAL DO CENTRO, COIMBRA

F. P. O. FIGUEIREDO¹, N. E. V. RODRIGUES² e A. I. S. ANDRADE³

PALAVRAS CHAVE: aterro sanitário, monitorização, método eléctrico de resistividade e dispositivos tripotenciais.

KEYWORDS: landfill, monitorization, resistivity method and tripotencial array.

RESUMO

Este trabalho descreve a instalação de um sistema protótipo de monitorização da célula A do Aterro Multimunicipal do Centro, com utilização do método eléctrico de resistividade e apresentam-se os resultados obtidos com o sistema referido. Com este sistema pretendeu-se localizar e avaliar o avanço de plumas de contaminação, no caso de fuga de lixiviados, e detectar possíveis rupturas na tela de impermeabilização. O sistema instalado é o primeiro do género em Portugal, consistindo basicamente num conjunto de 72 eléctrodos dispostos segundo uma malha quadrada de $17.5 \times 17.5 \text{ m}^2$, colocados sob a tela de impermeabilização, na base do aterro, e ligados por cabos eléctricos a uma caixa central onde são efectuadas as medidas eléctricas. Após a instalação do sistema foram efectuadas as medidas iniciais para definir os valores de 'background' da resistividade do terreno onde o aterro está implantado. Os possíveis pontos de fuga de lixiviados são detectados pela delimitação de zonas de menor resistividade eléctrica, em relação aos valores de 'background'. A evolução dessas zonas permite planejar eficazmente soluções minimizadoras dos efeitos da contaminação induzida pelo aterro sanitário, no caso de ocorrerem rupturas na tela de impermeabilização.

¹ Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, fpedro@ci.uc.pt

² Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, nelsonr@ci.uc.pt

³ Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, aandrade@ci.uc.pt

ABSTRACT: Monitoring the inter-municipal landfill of the Centre, Coimbra

This work describes the installation of a prototype system for monitoring the "A" Cell of the multi-municipal landfill of the Centre (Coimbra, Portugal) by resistivity electrical methods. The results obtained with this system are presented and discussed. This system is intended to locate and evaluate the evolution of contaminant plumes which may occur as a result of leaks of lixiviates and to detect possible ruptures in the geomembrane. In the present case this system was also intended to follow probable contamination plumes from an old waste dump which is located next the longer side of the landfill. This monitoring system is the first of its kind in Portugal and it consists of a set of 72 electrodes each of them positioned in the nodes of a network of squares and below the geomembrane covering the base of the landfill. The electrodes are connected to a central box where the resistivity measurements are taken. After the initial installation of the system a set of measurements was made in order to define the background resistivity of the emplacement of the landfill (average measured value $\cong 7,5$ ohm.m). At later times zones of lower resistivity as compared to the initial values would be used to detect possible flow paths of lixiviates. In the present case it is observed a general increase, with time, of the resistivity which we attribute to the consolidation of soil (average value in 2003 $\cong 30$ ohm.m). It is observed that contamination from the old dump still flows below the geomembrane even though in a smaller scale.

1. INTRODUÇÃO

Com a selagem das lixeiras em Portugal, ocorrida na década de 90, a gestão dos resíduos sólidos deixou de ser da responsabilidade local e tornaram-se numa responsabilidade regional (PINTO e COUSENS, 1996), passando a gestão desses resíduos a ser feita por empresas especializadas. Sob o ponto de vista de ordenamento do território tornou-se também mais rentável construir e gerir um número menor de aterros sanitários, em relação às lixeiras existentes, mas de maior dimensão, situados em locais estratégicos que permitem a sua utilização por diversas autarquias. A diminuição de locais de deposição de resíduos urbanos permite a instalação de equipamentos diversos que vão minimizar a dispersão e a diluição dos lixiviados no meio ambiente, bem como a contratação de pessoal especializado (PINTO e COUSENS, 1996).

Esses aterros de grandes dimensões, e que podem estar a funcionar em condições deficientes, são uma preocupação para as populações, as autarquias, as empresas que gerem os aterros e os organismos governamentais. Os problemas surgidos nos aterros sanitários têm conduzido ao desenvolvimento de técnicas de monitorização, das quais destacamos os métodos eléctricos aplicados à delineação

das potenciais plumas de contaminação (MERLEVEDE, 1996; REYNOLDS e TAYLOR, 1996; FIGUEIREDO *et al.*, 1999).

É importante que estes sistemas tenham um tempo de vida superior ao período de funcionamento do aterro, de modo a permitir a sua monitorização após a sua selagem.

Um exemplo da aplicação desta técnica é o sistema de monitorização instalado num aterro construído perto da cidade de Birmingham, no Reino Unido. Este sistema foi instalado pelo Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Birmingham em 1996. O sistema baseado no método eléctrico da resistividade foi a primeira instalação deste tipo a ser instalado no Reino Unido (www.bham.ac.uk/EarthSciences/tests/environ2.html, 1997).

Este primeiro sistema de monitorização baseado na resistividade eléctrica foi testado com sucesso e demonstrou ser capaz de localizar rupturas na tela de impermeabilização, fugas de lixiviados que possam ocorrer, bem como quantificar a evolução das plumas de contaminação inerentes a essas fugas. Com estes sistemas de monitorização as medidas devem ser repetidas com uma certa periodicidade de modo a verificar possíveis rupturas e evolução da plumas de contaminação, considerando-se que a evolução no tempo vai provocar variações dos valores de resistividade (SENOS MATIAS, 2003).

Na figura 1 está representado um esquema simplificado do sistema instalado e do dispositivo de medida.

Em Maio de 1997 o Instituto de Investigação da Água da Universidade de Coimbra propôs à Câmara Municipal de Coimbra a instalação de um protótipo de um sistema de monitorização semelhante ao instalado no aterro de Birmingham (RODRIGUES *et al.*, 1997). O sistema foi montado durante os meses de Junho e Julho de 1997, tendo as primeiras medidas sido efectuadas no mês de Agosto desse mesmo ano.

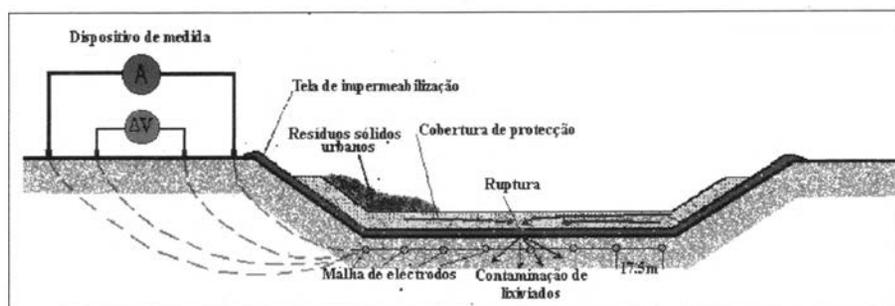


Fig. 1 – Esquema simplificado do sistema de monitorização instalado na Célula A do Aterro Multimunicipal do Centro (Figueiredo *et al.*, 1999).

2. LOCALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DO ATERRO

O aterro sanitário localiza-se a cerca de 4km a Sul da povoação de Taveiro e a 2,5km a NE da povoação de Anobra, no limite do concelho de Coimbra, figura 2.

Foi construído imediatamente a Sul da antiga lixeira que serviu este concelho e os concelhos limítrofes no período entre 1984 a 1997, ocupando uma área de aproximadamente 10000m², com uma capacidade total de 1000000m³ e funcionando desde o final do ano de 1997.

Sob o ponto de vista geológico, o aterro está implantado sobre uma camada de argilas pertencentes ao topo da Formação de Taveiro (Campaniano superior-Paleocénico?) que apresentará neste local uma espessura superior a 90m, podendo atingir uma espessura máxima provável de 150m (REIS, 1979, 1983; CUNHA e REIS, 1995). Esta formação, com uma atitude sub-horizontal, é constituída nesta zona por camadas métricas ($\leq 4m$) de arenitos, com granulometria média a grosseira, bem calibrados, alternantes com camadas de argila de espessura considerável ($\leq 20m$).



Fig. 2 – Localização geográfica do Aterro Multimunicipal do Centro (extracto da Carta Militar de Portugal, folhas n.º 240 e n.º 241, Serv. Cart. do Exército, 1984).

3. O MÉTODO DE RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

O método de resistividade eléctrica consiste no estudo do campo eléctrico criado artificialmente pela introdução de uma corrente eléctrica no terreno, através de dois eléctrodos, A e B, colocados na superfície, sendo a diferença de potencial medida noutros dois eléctrodos, M e N. Através da medição dos potenciais eléctricos induzidos, à superfície do terreno, pelo fluxo dessa corrente eléctrica e com base nos princípios estabelecidos pela Lei de Ohm determina-se a resistividade eléctrica do volume de terreno influenciado pela passagem da corrente eléctrica (ORELLANA, 1972).

A resistividade eléctrica dos terrenos depende do tipo e natureza das suas formações geológicas, da quantidade de água contida na sua estrutura, bem como dos sais minerais dissolvidos nessa água. Os poros e fracturas das formações geológicas estão vulgarmente preenchidos com água que contém sais minerais dissolvidos, conferindo uma maior ou menor aptidão para estas conduzirem a corrente eléctrica, verificando-se que, em geral, quando a porosidade e a fracturação diminuem a resistividade aumenta e vice-versa. Na figura 3 pode-se observar a variação da resistividade de águas de natureza diversa incluindo águas contaminadas.

A análise da resistividade eléctrica e da sua distribuição à superfície permite localizar e identificar estruturas geológicas, bem como plumas de contaminação em profundidade.

A quantidade de sais dissolvidos na água, depende da natureza das rochas com que a água esteve em contacto e fundamentalmente da mistura de contaminantes introduzidos nos aquíferos. Essa quantidade varia geralmente entre 0,1 g/l e 35 g/l, correspondendo este último valor à água do mar. No entanto, este valor é superado por algumas águas de escorrências de minas, lagos salgados e lixiviados de aterros e lixeiras.

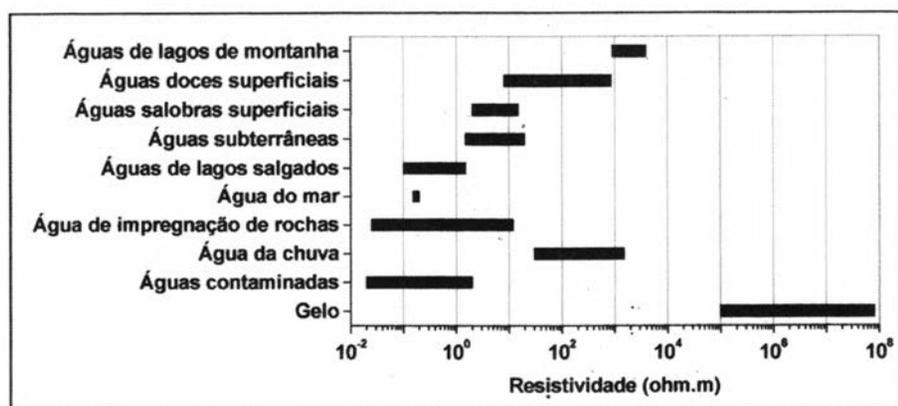


Fig. 3 - Valores de resistividade para águas de diversas naturezas (adaptado de ORELLANA, 1972; TELFORD *et al.*, 1988).

4. DISPOSITIVO DE MEDIDA QUADRADO TRIPOTENCIAL

Existem vários dispositivos de medida, podendo estes ser classificados em dois grupos. Os dispositivos a partir dos quais se obtém um único valor de resistividade por ponto de medida e os dispositivos tripotenciais em que se obtém três valores de resistividade por ponto de medida. Destes últimos dispositivos referimos os dispositivos Wenner Tripotencial (CARPENTER e HABBERJAM, 1956) e o Quadrado Tripotencial (HABBERJAM, 1979). Estes dois dispositivos permitem o controlo da qualidade dos dados de campo e a determinação das heterogeneidades do terreno.

O sistema de monitorização instalado no aterro permite efectuar as medidas utilizando vários dispositivos. Após a realização de vários conjuntos de medidas efectuados com diferentes dispositivos concluiu-se que o dispositivo Quadrado Tripotencial adapta-se melhor aos objectivos deste projecto por permitir cobrir uma maior área de medidas quando comparado com o Wenner Tripotencial, sendo essa diferença devida à geometria dos dispositivos.

Na figura 4 está representado o esquema do dispositivo Quadrado tripotencial, sendo as leituras efectuadas com este dispositivo referidas ao ponto central do dispositivo.

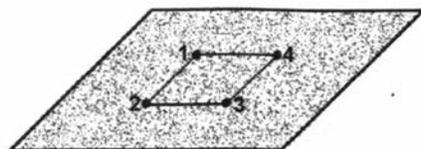
Através das equações seguintes são calculados as resistividades $\rho_\alpha(a)$, $\rho_\beta(a)$ e $\rho_\gamma(a)$, equações 1, 2 e 3, respectivamente, para as três configurações deste dispositivo, sendo a a dimensão do lado do quadrado, R_α e R_β as resistências medidas com as configurações α e β , respectivamente.

(Eq. 1)

$$\rho_\beta(a) = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{2 - \sqrt{2}} \cdot R_\beta \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\rho_\gamma(a) = 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

A, B - Eléctrodos de corrente
M, N - Eléctrodos de potencial



	Posição dos eléctrodos			
	1	2	3	4
Configuração α	A	M	N	B
Configuração β	A	B	N	M
Configuração γ	A	M	B	N

Fig. 4 - Dispositivo Quadrado Tripotencial. Localização dos eléctrodos nas configurações α , β e γ .

O valor de $\rho_{\gamma}(a)$ é igual a zero, devido ao valor da resistência gama ser zero. Esta resistência tem valor zero porque a diferença de potencial é nula, visto que nesta configuração os eléctrodos de potencial se encontram localizados segundo uma linha de equipotencial.

Outros dois parâmetros que se calculam através destes valores são a resistividade média, $\rho_m(a)$, equação 4, e o Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, $CHA(a)$, equação 5 (HABBERJAM, 1979).

$$\rho_m(a) = \frac{\rho_{\alpha}(a) + \rho_{\beta}(a)}{2} \quad (\text{Eq. 4})$$

$$CHA(a) = 2 \cdot \frac{\rho_{\alpha}(a) - \rho_{\beta}(a)}{\rho_{\alpha}(a) + \rho_{\beta}(a)} \quad (\text{Eq. 5})$$

Os valores $CHA(a)$ permitem localizar as zonas anisotrópicas do terreno, zonas essas que poderão corresponder a locais onde ocorrem a fuga de lixiviados através da tela.

5. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO INSTALADO

O sistema de monitorização instalado consiste num conjunto de 72 eléctrodos dispostos em malha regular quadrada de $17,5 \times 17,5 \text{m}^2$, colocados na base do aterro sanitário, a uma profundidade de 0,5m abaixo da tela de impermeabilização, figura 5.

Cada um destes eléctrodos está ligado a um painel de controlo por um cabo eléctrico multifilar de $2,5 \text{mm}^2$, num total de 32000m de fio eléctrico. Os eléctrodos são de aço inoxidável para garantir que o sistema de leitura funcionará durante o período de vida do aterro e após a sua selagem.

Os cabos de ligação entre os eléctrodos e o painel de controlo foram colocados dentro de tubarias, seleccionadas pela garantia de resistência e facilidade de instalação oferecidas. Todas as possíveis entradas dos tubos foram seladas para impedir que constituíssem um sistema privilegiado para a condução de água e lixiviados.

Com os 72 eléctrodos instalados e com o dispositivo de medida quadrado podem-se fazer 53 medidas, sendo os valores obtidos através deste sistema de monitorização utilizados para a construção dos mapas de valores de resistividade média, $\rho_m(a)$ e dos Coeficientes de Heterogeneidade Azimutal, $CHA(a)$.

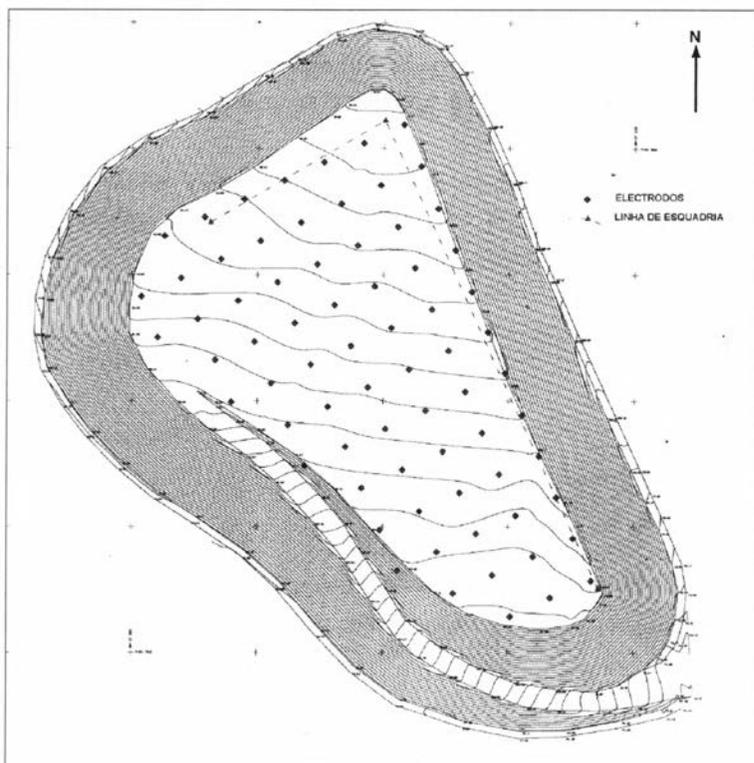


Fig. 5 – Planta da Célula A do aterro sanitário e localização dos electrodos utilizados no sistema de monitorização instalado.

No último conjunto de medidas, efectuado em Setembro de 2003, não foi possível fazer sete medidas devido a problemas com alguns dos electrodos, no entanto isso não inviabilizou a construção dos mapas referentes a essa data.

A análise dos mapas obtidos em diferentes alturas do ano permite detectar a existência de possíveis rupturas na tela e a libertação de lixiviados através das mesmas; a avaliação da propagação das plumas de contaminação é possível tendo em consideração os baixos valores de resistividade associados à presença dos lixiviados no terreno, quando comparados com o meio envolvente. Estes mapas constituem uma base sólida para o planeamento de medidas de minimização de impactes.

No caso de ser detectada alguma ruptura, serão efectuadas medidas de resistividade na área em questão, na área envolvente e em profundidade, para uma melhor avaliação da evolução da contaminação.

Não havendo rupturas na tela os valores da resistividade eléctrica medidos serão constantes ao longo do tempo de vida do aterro, existindo no entanto variações sazonais devido à variação do nível freático.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os valores da resistividade obtidos inicialmente, Agosto e Outubro de 1997, figura 6(a) e (b), respectivamente, mostram os valores de 'background' da resistividade da base do aterro. Estes dois mapas mostram resultados diferentes, apresentando o mapa de Outubro de 1997, figura 6(b), valores de resistividade inferiores, porque nesta data as telas já estavam totalmente colocadas, o que provocou uma homogeneização da humidade no terreno sob as telas.

Junto do talude do lado Este do aterro os valores da resistividade são inferiores aos obtidos no talude Oeste. Este facto é devido à contaminação induzida pelos lixiviados da antiga lixeira que contacta lateralmente com a Célula A do aterro no talude Este.

Junto deste talude, pode-se observar um canal preferencial de propagação de lixiviados entre os 120 e os 140 m, com uma resistividade média de 4,5 ohm.m, correspondente a uma zona identificada à data da instalação do sistema e das telas de impermeabilização, como uma zona preferencial de escoamento dos lixiviados da lixeira antiga.

Da análise dos gráficos das figuras 6 e 7, obtidos sequencialmente no tempo, podemos verificar que ocorreu uma diminuição gradual nos valores de resistividade da base do aterro desde o início do seu funcionamento. Os valores de resistividade máxima medidos decresceram dos 12,5 ohm.m em Agosto de 1997, figura 6(a), para valores de 6,5 (Fevereiro de 1998) e 7,5 ohm.m (Julho de 1999), figura 7(a) e (b), respectivamente, sendo esse decréscimo atribuído ao lixiviados da antiga lixeira que se introduzem sob a tela do aterro.

A figura 8 corresponde a leituras feitas em Julho de 2000 (a) e em Setembro de 2003 (b), sendo notória a diferença de resultados obtidas nestes dois períodos. Sob o ponto de vista de resistividade do terreno verifica-se que houve um aumento significativo dos valores da resistividade, que pode ser explicado pela diminuição do fluxo de lixiviados provenientes da antiga lixeira. Uma outra explicação para este facto pode ser a diminuição da circulação de lixiviados entre a tela de impermeabilização e a base do aterro devido aos aterro se encontrar quase a atingir a sua capacidade máxima, provocando o peso dos resíduos um contacto mais efectivo entre a tela e a base do aterro, que impede a circulação dos lixiviados.

Em relação ao mapa do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal os valores também são mais elevados o que pode ser explicado pela heterogeneidade do terreno (argiloso e arenoso) com diferentes permeabilidades, verificando-se, no entanto, que a área corresponde à zona preferencial de entrada de lixiviados da antiga lixeira continua presente.

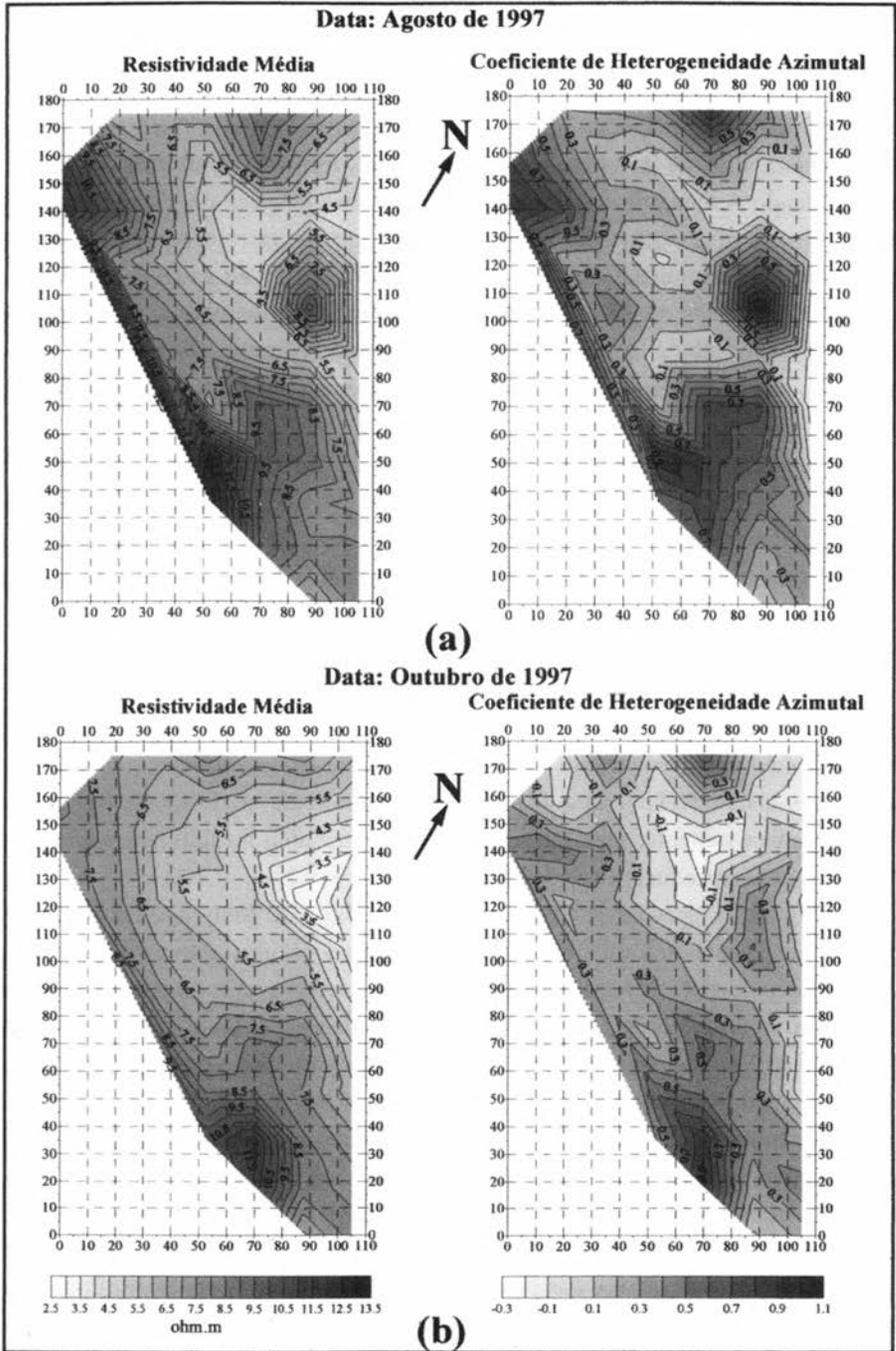


Fig. 6 – Mapas da resistividade média e do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, correspondentes a Agosto (a) e Outubro (b) de 1997.

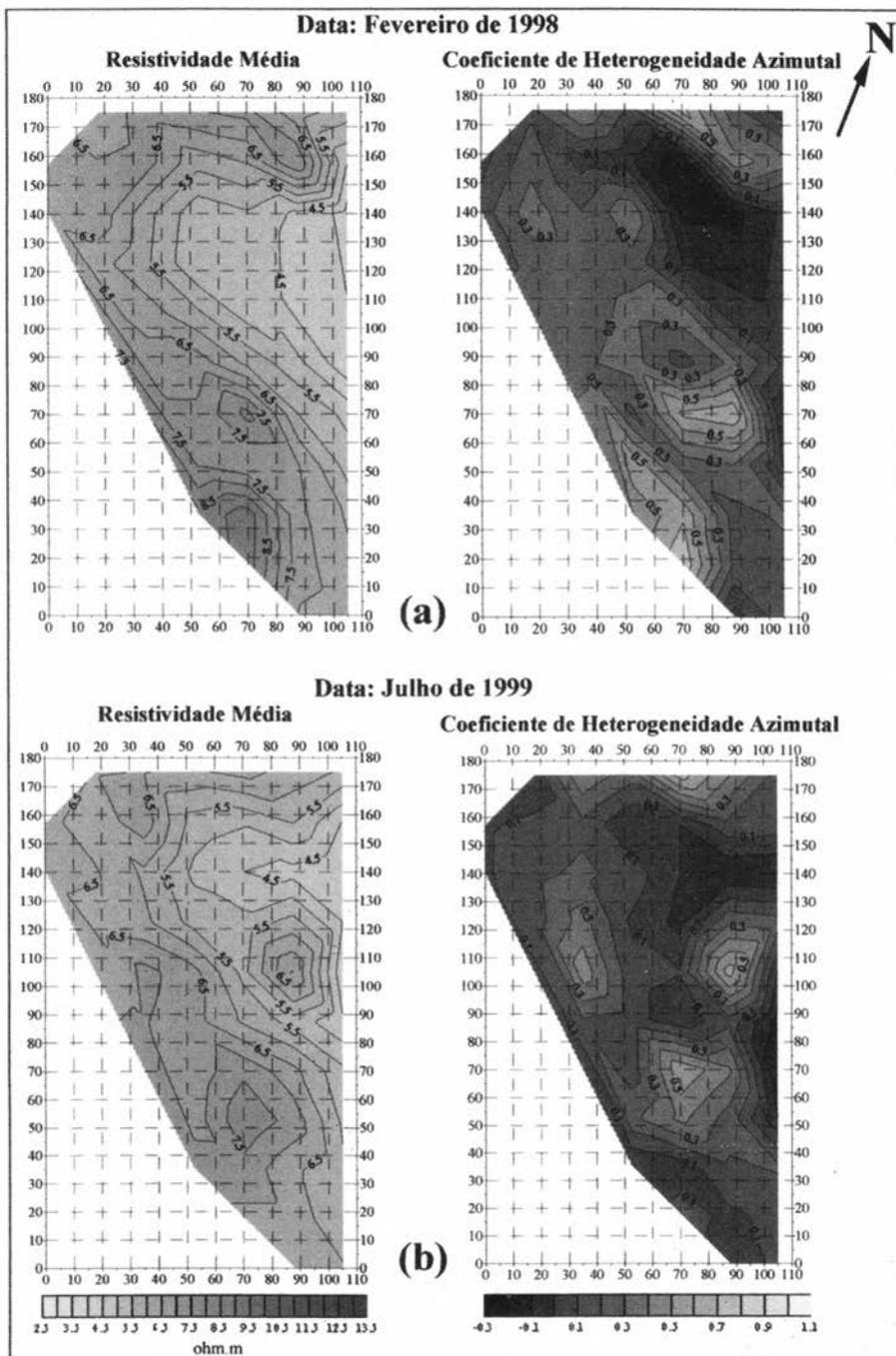


Fig. 7 – Mapas da resistividade média e do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, correspondentes a Fevereiro 1998 (a) e Julho de 1999 (b).

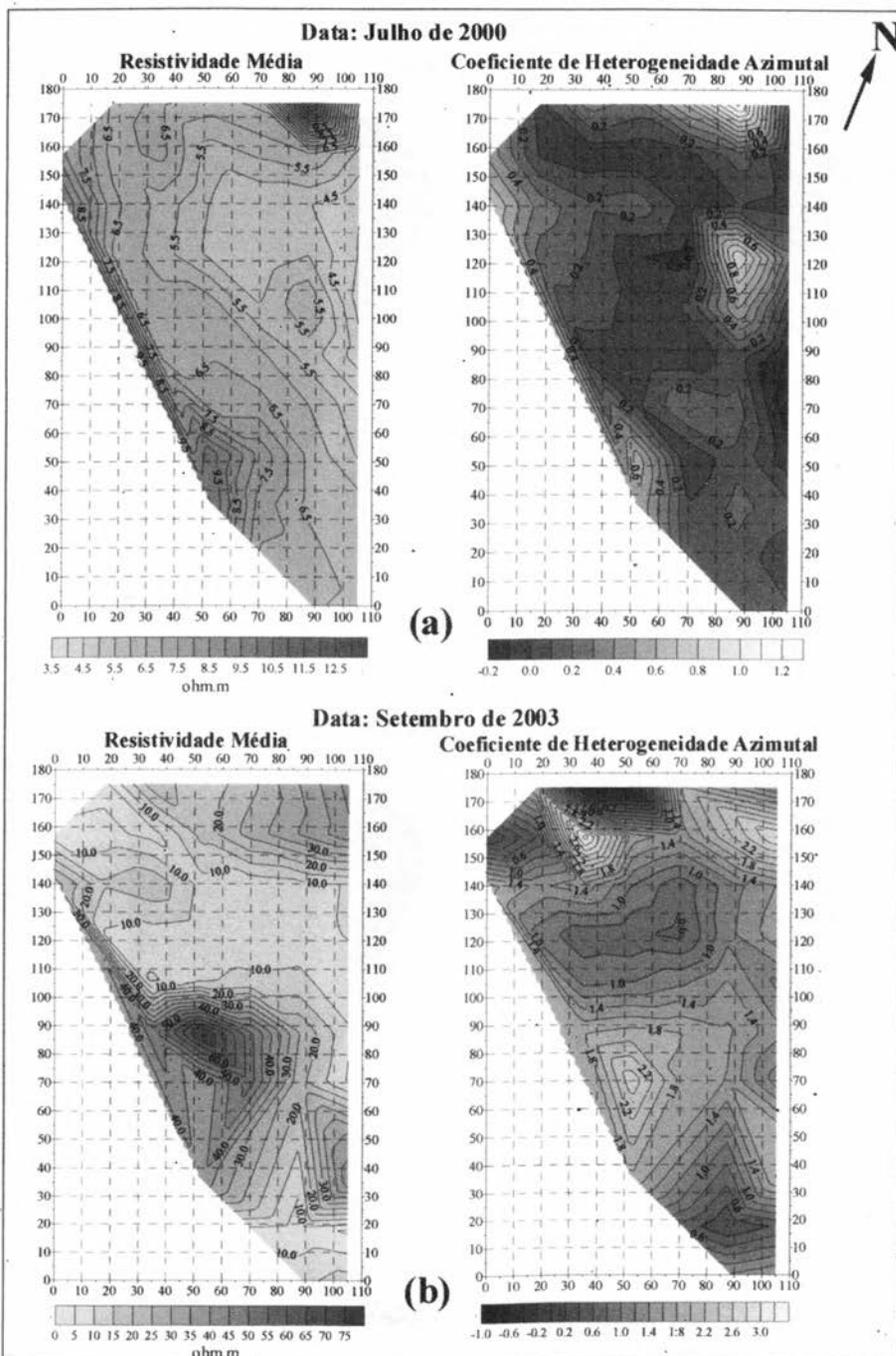


Fig. 8 – Mapas da resistividade média e do Coeficiente de Heterogeneidade Azimutal, correspondentes a Julho de 2000 (a) e Setembro de 2003 (b).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na base do aterro, não foi detectada nenhuma ruptura significativa da tela de impermeabilização uma vez que a distribuição geométrica das curvas de igual resistividade se mantiveram inalteradas, ao longo do tempo de vida do aterro.

O canal preferencial de propagação dos lixiviados da lixeira antiga continua a verificar-se à data das últimas medidas efectuadas.

O sistema instalado é um pouco dispendioso, quando comparado com outros sistemas, e fornece resultados fiáveis e de boa qualidade. Quanto maior o número de eléctrodos instalados melhor será a resolução e mais rápida será a detecção de fugas de lixiviados.

Após sete anos de funcionamento o sistema de monitorização continua operacional, permitindo o registo e a construção dos mapas apresentados.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à Câmara Municipal de Coimbra, ao Prof. Doutor Martim Portugal Ferreira, à ERSUC - Resíduos Sólidos do Centro, S.A., em especial ao actual administrador Dr. Alberto Santos e ao anterior, Eng. Humberto Conceição, ao Instituto de Investigação da Água - U.C., Departamento de Ciências da Terra - U.C., ACORIL S.A., Agroman S.A., SERIAL Lda. e GÓTOP Lda., bem como aos nossos colegas Fernando Pita, Lídia Catarino e Sara Renca, e ao electricista do nosso departamento Armando Silva todo o apoio dado durante a instalação do sistema e os dados técnicos fornecidos para a realização deste trabalho e apresentação desta comunicação.

9. BIBLIOGRAFIA

- CARPENTER, E. C. e HABBERJAM, G. M. (1956) - A tripotencial method of resistivity prospecting. *Geophysics* 21, pp. 455-469.
- Carta Militar de Portugal, folhas n.º 240 e n.º 241 (1984) - S. C. do Exército, Lisboa.
- CUNHA, P. P. e REIS, R. P. P. (1995) - Cretaceous sedimentary and tectonic evaluation of the northern sector of the Lusitanian Basin (Portugal). *Cretaceous Research*, 16, pp. 155-170.
- FIGUEIREDO, F. P. O., ANDRADE, A. I. A. S. S. e RODRIGUES, N. E. V. (1999) - Protótipo de um sistema de monitorização de aterros sanitários por métodos eléctricos - Aterro Intermunicipal do Centro. *6.ª Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*, Vol. 2, pp. 179-188, Univ. Nova de Lisboa, Portugal.
- HABBERJAM, G. M. (1979) - *Apparent resistivity observations and the use of square array techniques*. Geoexploration Monographs, Gebrüder Borwtraeger, Berlin-Stuttgart, Alemanha.

- MERLEVEDE, P. (1996) – Developments in the use of an Electronic Leak Detection Geotextile (ELDEG®) for civil engineering and waste disposal purposes. *Geosynthetics: Applications, Design and Construction*, De Groot, Den Hoesdt e Termaat (editores). Balkema, Roterdão.
- ORELLANA, E. (1972) – *Prospeccion geoeléctrica en corriente continua*, Paraninfo, Madrid, Espanha.
- PINTO, M. I. e COUSENS, T. W., (1996) – Aterros sanitários no Reino Unido - Exemplos dos aterros de Honley Old Wood e Howley Park em West Yorkshire. *Estudos de Engenharia Civil*, Vol. 8, nº.2, pp. 161-170. Dep. de Eng^a. Civil, F.C.T.U.C., Coimbra.
- REIS, R. P. P. (1979) – La Formation Argilo-Greseuse et Conglomeratique de Senhora do Bom Sucesso (Portugal). Etude sedimentologique. *Memórias e Notícias* 87, Publ. Mus. Lab. Min. Geol., pp. 3-18, Univ. Coimbra, Portugal.
- REIS, R. P. P. (1983) – *A sedimentologia de depósitos continentais. Dois exemplos do Cretácico Superior-Miocénico de Portugal*. Tese de Doutoramento, Univ. de Coimbra.
- REYNOLDS, J. M. e TAYLOR, D. I. (1996) – Use of geophysical surveys during the planning, construction and remediation of landfills. *Engineering Geology of Waste Disposal*, Bentley, S. P. (editor). Geological Society Engineering Geology Special Publication, nº. 11, pp. 93-98.
- RODRIGUES, N. E. V., FIGUEIREDO, F. P. O. e ANDRADE, A. I. S. (1997) – *Sistema de Monitorização da Célula A do Aterro Sanitário de Coimbra*. Relatório interno não publicado. Instituto de Investigação da Água-Secção de Hidrogeologia, Universidade de Coimbra.
- SENOS MATIAS, M. J. (2003) – Geofísica e ambiente: O desafio 4D. *3º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, Universidade de Aveiro, 10 a 13 de Fevereiro de 2003, Aveiro.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. e KEYS, D. A. (1988) – *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.

Endereço (URL) de documentos Internet consultados:

<http://www.bham.ac.uk/EarthSciences/tests/enviro2.html>, 1997

AS MINERALIZAÇÕES DE URÂNIO E A RADIO- ACTIVIDADE NATURAL EM PORTUGAL: FACTORES GEOLÓGICOS CONDICIONANTES E IMPLICAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

A. J. S. C. PEREIRA ¹, L. J. P. F. NEVES ¹, M. M. GODINHO ¹ e J. M. M. DIAS ¹

PALAVRAS CHAVE: mineralizações de U, radioactividade natural, ordenamento, Portugal.

KEY WORDS: U mineralizations, natural radioactivity, land planning, Portugal.

RESUMO

No decurso de trabalhos de investigação desenvolvidos nos últimos anos em diversas áreas urbanas da Região Centro obtiveram-se *ca.* três centenas de análises de U nas rochas e mais de um milhar de determinações da concentração de radão no ar do solo. Esta informação, suportada por estudos geológicos e mineralógicos de pormenor, permitiu a elaboração de diversos mapas de potencial de radão. A validação destes mapas foi efectuada através de campanhas de medição da concentração de radão no interior de habitações, em número de *ca.* 700. Concluiu-se existir correlação significativa entre factores geológicos e a concentração de radão nas habitações, sendo o risco mais elevado em rochas graníticas onde o urânio se não encontra fixado em suportes mineralógicos próprios, bem como em estruturas mineralizadas em U, geralmente caixas de falha, muito frequentes em parte da região das Beiras. As falhas dos sistemas N30-35°E e N70-80°E que intersectam granitos e metassedimentos metamorfizados por contacto são particularmente relevantes neste aspecto. Pode concluir-se que, para fins de ordenamento e planeamento do território, os mapas de risco de radão devem ser elaborados a uma escala local (1:5000 a 1:1000), de modo a poder controlar a radioactividade natural no interior das habitações.

¹ Departamento de Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 3000-272 Coimbra, Portugal.

ABSTRACT: Uranium mineralization and natural radioactivity: conditioning geological factors and the consequences on land planning

Along the last few years we carried out research on radioactivity of rocks (mainly granites and metasediments) and soils of some urban areas of Central Portugal. Data on the concentration of U in about three hundred rock samples and of radon in more than one thousand soil sites were obtained. On the basis of this quantitative information and of both local and regional geological and mineralogical studies, radon potential maps were performed; these maps were validated through *ca.* 700 radon-gas determinations in the air of the lowest floor of dwellings interior. A striking correlation was detected between geological factors and indoor radon concentration. Radon potential is higher in some fault filling materials and where U is mobile (intergranular or located in microfissures in minerals); N30-35°E and N70-80°E faults that cut granites and contact metamorphosed metasediments are specially relevant in this respect, at some places with very high radon potential. On the basis of these findings, it is concluded that land planning needs local scale (1:5000 to 1:1000) radon risk maps in order to control the natural radioactivity in the dwellings interior.

1. INTRODUÇÃO

O gás radão, gerado na cadeia de decaimento do ^{238}U , é a principal fonte de radioactividade natural, o que fundamenta e explica que em alguns países se tenha vindo a verificar interesse e preocupação em controlar a dose desse gás a que os cidadãos estão expostos em espaços confinados, em especial nas habitações. Embora não sejam os únicos, a constituição litológica duma região, o teor do urânio nas suas rochas e a permeabilidade destas, bem como o suporte mineralógico do urânio, são factores que determinam a concentração do radão nos solos e, conseqüentemente, do potencial de transmissão deste gás ao ar do interior de espaços confinados, designadamente das habitações.

Através de estudos realizados em diversas áreas urbanas da região Centro, têm vindo a ser desenvolvidas pelo Grupo de Modelagem de Sistemas Geológicos do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra metodologias de avaliação do potencial de radioactividade natural das rochas, visando, em última análise, a construção de mapas risco a escala que se adequem à sua utilização em planos de ordenamento do território.

O presente trabalho constitui uma síntese de alguma informação geológica e geoquímica adquirida nos últimos anos sobre o risco de radão nas áreas urbanas de Canas de Senhorim, Castelo Branco, Coimbra, Figueiró dos Vinhos, Guarda, Nelas, Oliveira do Hospital, Seia, Sertã e Tondela.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

As áreas urbanas em apreço inscrevem-se em duas grandes unidades geológicas do território português, que são o Maciço Hespérico e a Orla Meso-Cenozóica Ocidental. A região de Coimbra situa-se, na maior parte, sobre a Orla Meso-Cenozóica, em pequena parte sobre o Maciço Hespérico; as restantes inserem-se no Maciço Hespérico.

O Maciço é, na porção central do País, constituído por rochas graníticas (na sua grande maioria hercínicas, com idades 380-270 Ma), que são dominantes, e ainda por rochas metassedimentares de idade ante-ordovícica. As rochas graníticas têm sido caracterizadas como granitos biotíticos, granitos de duas micas e granitos moscovíticos, e a sua implantação gerou frequentemente auréolas de metamorfismo de contacto onde podem ocorrer micaxistos ou mesmo corneanas pelíticas. As rochas metassedimentares são essencialmente xistos e grauvaques, localmente também quartzitos. Em algumas áreas ocorrem depósitos de cobertura, de extensão e espessura relativamente reduzidas e idade cenozóica (<65 Ma), dispostos sobre granitos e metassedimentos.

A Orla Meso-Cenozóica Ocidental é constituída quase exclusivamente por rochas sedimentares (idade <245 Ma), com dominância das de natureza detrítica e das carbonatadas. Das regiões estudadas, apenas a de Coimbra se localiza (na sua maior parte) nesta Orla.

Tendo em conta o que precede, a constituição litológica das regiões em apreço pode sintetizar-se como segue:

- Na região de Coimbra ocorrem extensivamente sedimentos detríticos, de natureza essencialmente arenítica e argilosa, e ainda calcários e margas; numa faixa a oriente as rochas são xistos e grauvaques;
- Nas restantes regiões o substrato geológico é essencialmente composto de granitos ou de rochas metassedimentares. Os granitos são geralmente biotíticos porfiróides, de grão médio a muito grosseiro, e têm recebido designações locais que, no caso em apreço, são as de granito de Castelo Branco (FIGUEIREDO *et al.*, 1997), granito de Figueiró dos Vinhos (dados não publicados), granito de Tondela (PEREIRA E PONTE, 1992) e granito de Tábua (PEREIRA E PONTE, 1992). O granito de Tábua estende-se desde as proximidades de Tondela à Guarda, nele se incluindo as áreas urbanas de Canas de Senhorim, Nelas, Seia e Oliveira do Hospital; será doravante designado por granito de Tábua-Guarda. Localmente ocorrem pequenos corpos de granitos não porfiróides, geralmente de pequena expressão; gneisses, também de fraca expressão em afloramento, ocorrem nas proximidades de Figueiró dos Vinhos. Xistos e grauvaques são rochas presentes em porção significativa das áreas estudadas, sendo exclusivas na região de Sertã. Na região de Castelo Branco, para além de granitos,

xistos e grauvaques ocorrem quartzitos e xistos (alguns grafitosos) de idade ordovícico-silúrica, restritos a uma estreita faixa de direcção N50°W que atravessa a cidade. Depósitos de cobertura, essencialmente arcósico-argilosos, ocorrem nas regiões de Seia e Tondela; a sua espessura não excede, em geral, a dezena de metros.

Em todas as regiões estudadas o substrato geológico está fracturado, com dominância dos sistemas de falhas N10-15°E, N30-35°E, N50-60°E e N70-80°E; em algumas falhas implantaram-se filões de quartzo ou de rocha básica. O material que preenche as falhas (doravante designado por caixa de falha) resultou do esmagamento da rocha intersectada e, por vezes, também de quartzo filoniano, podendo, nalguns casos, atingir a dezena de metros de espessura; em algumas das falhas que intersectam rochas do Maciço reconheceram-se concentrações particularmente elevadas de urânio (COSTA *et al.*, 1997; FIGUEIREDO *et al.*, 1997; PEREIRA *et al.*, 1999a; SALGADO *et al.*, 1998).

3. MÉTODOS

Os estudos desenvolvidos foram suportados em todos os casos por cartografia geológica detalhada das áreas urbanas em análise, tendo sido dada especial ênfase à detecção de fracturas, quer no campo, quer, complementarmente, através de análise fotogeológica. A observação petrográfica das rochas permitiu caracterizar a sua mineralogia, com especial relevo para a identificação de minerais susceptíveis de incorporarem urânio e tório.

O estudo da distribuição mineralógica do urânio nas rochas foi aprofundado através da análise de amostras representativas por técnicas de *fission-track*, de acordo com metodologia descrita em PEREIRA *et al.* (1999b).

A avaliação do fundo radiométrico natural e de eventuais anomalias presentes foi efectuada com apoio de cintilómetros de raios gama, modelo SPP2 da Saphymo, e com espectrómetro de raios gama portátil GR130G da Exploranium, o qual possibilita ademais a caracterização expedita do conteúdo de urânio e de tório das rochas. Com este equipamento e ainda através de análises químicas convencionais obtiveram-se, no total, *ca.* 3 centenas de medições de U.

A concentração do radão nos solos foi medida em locais representativos e ao longo de perfis, de orientação e extensão variáveis, os quais compreendem as rochas aflorantes e caixas de falha que as intersectam; os locais de medição totalizam mais de um milhar nas diversas áreas estudadas. A técnica analítica encontra-se descrita em PEREIRA *et al.* (1998).

Com base na análise de toda a informação obtida em cada área, elaboraram-se cartas de potencial de radão, geralmente à escala 1:10000, as quais reflectem

a maior ou menor probabilidade de uma habitação poder apresentar, no seu interior, concentração de radão superior ao limite máximo recomendado pela UE (400 Bq.m⁻³ quando já existentes). A validação das cartas de potencial de radão foi efectuada através de campanhas de medição da concentração de radão no interior das habitações, as quais foram levadas a cabo com recurso a detectores passivos do tipo LR115. Em cada área urbana, e de acordo com a sua extensão, efectuou-se a colocação de 100 a 200 detectores, no período de inverno (Dezembro a Fevereiro), os quais ficaram expostos durante cerca de 3 meses. O tratamento laboratorial e contagem dos detectores foi efectuado através de procedimento descrito em NEVES *et al.* (1999).

4. RESULTADOS

4.1. RADIOMETRIA E TEORES DE URÂNIO

As litologias que ocorrem na região Centro apresentam significativas diferenças no que respeita ao conteúdo em elementos radiogénicos, em especial urânio, o que é, desde logo, detectável através da utilização de cintilómetros de raios gama. Para além de um fundo natural variável em função da natureza litológica das rochas, por vezes atingindo expressão de relevo no que respeita à capacidade de produzir radão, são ademais detectáveis com muita frequência estruturas correspondentes a caixas de falha e filões com mineralização em urânio nas rochas do Maciço. Algumas destas estruturas foram objecto de prospecção mineira e, nalguns casos, de exploração de urânio.

A tabela I condensa a informação obtida sobre o teor de urânio em 227 amostras de litologias representativas da Região Centro de Portugal; cerca de uma centena dos valores foram obtidos por espectrometria de raios gama, os restantes por métodos analíticos convencionais.

Tabela I – Média dos teores de U (ppm) nas litologias estudadas. N é o número de análises.

Litologia	Média aritmética do teor de U	N
Rochas carbonatadas da região de Coimbra	1.9	17
Sedimentos areno-conglomeráticos	3.8	20
Sedimentos areno-pelíticos	10.2	22
Xistos, grauvaques e (localmente) quartzitos	4.4	52
Gneisses e micaxistos da região de Figueiró dos Vinhos	3.8	9
Granito de Figueiró dos Vinhos	4.8	17
Granito de Tondela	7.9	14
Granito de Castelo Branco	8.2	7
Granito de Tábua-Guarda	11.7	68

Dos resultados obtidos, é patente que as rochas carbonatadas (calcários e dolomias) apresentam os mais baixos teores em urânio, enquanto, por outro lado, rochas graníticas e sedimentos areno-pelíticos apresentam os teores mais elevados. As rochas graníticas exibem acentuada variabilidade do seu teor médio em urânio, entre o mínimo observado para o granito de Figueiró dos Vinhos (4.8 ppm) e o máximo para o granito da Tábua-Guarda (11.7 ppm), situando-se este teor, para os restantes granitóides, em cerca de 8 ppm.

Obtiveram-se, ademais, 75 análises de materiais de caixa de falha com fundo radiométrico anómalo: em todos os casos o urânio mostrou ser o responsável pela anomalias radiométricas, tendo sido obtidos teores muito variáveis, entre algumas dezenas de ppm, no caso de anomalias com fraca expressão, até alguns milhares de ppm, em locais fortemente anómalos. É de salientar que, para além de caixas de falha simples, tendem a apresentar igualmente níveis de mineralização por vezes elevados alguns filões, geralmente com brecha de quartzo ou preenchimento de rocha básica. Os metassedimentos, quando em contacto com rochas graníticas ou em encaves no interior destas, apresentam também, por vezes, acentuado enriquecimento em urânio.

4.2. SUPORTE MINERALÓGICO DO URÂNIO

Para um mesmo conteúdo em urânio, a emissão de radão será fortemente potenciada numa rocha em que este elemento se localize em microfissuras e bordos intergranulares, donde o U é mobilizável, relativamente a outra onde ele se encontre confinado em minerais acessórios, designadamente zircão, monazite e apatite, onde o U está fixo em *loci* estruturais da rede desses minerais. Os estudos efectuados por técnicas de *fission track* mostraram que o suporte mineralógico do urânio nas rochas graníticas pode ser localmente diversificado; porém, no granito de Tábua-Guarda parece haver tendência a ocorrer sob forma mobilizável (PEREIRA *et al.*, 1999b). Isto poderá explicar, pelo menos em parte, o facto de as mais elevadas concentrações médias de radão em habitações ocorrerem sobre este granito (ver dados em TEIXEIRA e FAÍSCA, 1992).

4.3. CONCENTRAÇÃO DE RADÃO NOS SOLOS

As concentrações de radão medidas nos solos das áreas em apreço ultrapassam um milhar (algumas centenas não estão publicadas). Da tabela II constam as que definem o fundo regional, e estão organizadas de acordo com a natureza da rocha subjacente; o solo é entendido aqui, não no sentido pedológico do termo, mas como a camada superficial de materiais líticos, constituída essencialmente por rocha desagregada, em geral com muito pouca matéria orgânica.

Tabela II – Concentração média (média geométrica) do radão no ar dos solos das rochas dominantes nas regiões em apreço. N é o número de observações.

Litologia	Fundo (kBq.m ⁻³)	N
Rochas carbonatadas da região de Coimbra	2	30
Sedimentos detriticos areno-conglomeráticos	6	111
Sedimentos detriticos areno-pelíticos	28	73
Rochas metassedimentares (xistos e grauvaques)	12	172
Granito de Figueiró dos Vinhos	13	11
Granito de Tondela	29	51
Granito de Castelo Branco	26	32
Granito de Tábua-Guarda	52	152

Na área urbana de Coimbra as rochas carbonatadas e detriticas grosseiras são as mais pobres em radão, com valor médio inferior a 10 kBq.m⁻³, sendo também as rochas que têm teores de urânio mais baixos (PEREIRA *et al.*, 1997). Pelo contrário, a ocorrência de quantidades significativas de materiais argilosos, especialmente se associados a matéria orgânica, incrementa a capacidade de produção de radão nas rochas, como o parece indicar a média das concentrações do gás nos sedimentos detriticos mais finos (28 kBq.m⁻³). Sedimentos argilosos têm concentração média de radão que não difere significativamente da observada em rochas graníticas; este facto não é inesperado, uma vez que os materiais argilosos podem apresentar teores de urânio bastante elevados (NEVES *et al.*, 1996; PEREIRA *et al.*, 1997).

No conjunto das rochas do Maciço, as de natureza granítica são as mais ricas em radão, com valores de fundo regional que vão de 13 (granito de Figueiró dos Vinhos) a 52 kBq.m⁻³ (granito de Tábua-Guarda). O granito de Figueiró dos Vinhos (e, a ajuizar pelo teor de U, também os gneisses desta região) tem concentração de radão próxima da observada em metassedimentos. O granito de Tábua-Guarda é, dos estudados, o maior produtor de radão; os granitos de Tondela e de Castelo Branco, em consonância com os teores de urânio medidos, apresentam nível intermédio de produção.

É no granito de Tábua-Guarda que ocorrem diversas áreas mineralizadas em urânio, algumas com interesse económico, bem como milhares de anomalias radiométricas, por vezes fortes, de carácter muito localizado. Medições de radão, efectuadas em perfis orientados perpendicularmente a falhas que patenteavam anomalias radiométricas, mostraram, conforme esperado, acentuado acréscimo da concentração de radão, a qual chega a atingir valores dezenas de vezes superiores aos registados nas zonas limítrofes.

Em algumas das falhas que intersectam as diversas regiões do Maciço foram medidas as concentrações de radão mais elevadas, frequentemente superiores a 100 kBq.m⁻³ (n=244); estes valores são, em geral, mais frequentes quando as falhas intersectam os granitos. No que respeita às rochas metassedimentares, os valores

anómalos só se encontram na proximidade do contacto com os corpos graníticos ou nos encraves que se dispõem no interior destas, tendo-se observado, em alguns destes casos, concentrações excepcionalmente elevadas, superiores a 1.000 kBq.m^{-3} (PEREIRA *et al.*, 1999c; PEREIRA *et al.*, 1999d); o valor máximo encontrado até ao momento ($12.850 \text{ kBq.m}^{-3}$) foi obtido sobre um falha que intersecta um enclave metassedimentar. As fracturas responsáveis por estas elevadas concentrações orientam-se, nas regiões estudadas, predominantemente segundo N30-35°E e N70-80°E; a largura da faixa anómala é, geralmente, de apenas alguns metros, mas, localmente, pode atingir algumas dezenas de metros (FIGUEIREDO *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 1999c; PEREIRA *et al.*, 1999d).

4.4. CONCENTRAÇÃO DE RADÃO EM HABITAÇÕES

Os resultados obtidos no Inverno são menos influenciados por factores ligados ao uso e ventilação das habitações, pelo que os utilizamos geralmente em trabalhos que visam avaliar do potencial de risco de radão numa dada região; por outro lado, a maior parte dos detectores foram colocados no piso mais baixo, junto ao solo portanto, onde a concentração do radão é menos perturbada pelas actividades humanas. Os valores que se referem não são, por conseguinte, representativos do valor médio anual nas divisões habitáveis das respectivas habitações. Note-se que em 63 casos em que se repetiram no Verão, nos mesmos locais, as determinações efectuadas no Inverno, verificou-se uma redução média na concentração de radão de *ca.* 35% (dados não publicados).

Na tabela III apresentam-se os valores médios obtidos em habitações que assentam sobre diversas litologias dominantes na Região Centro: agrupam-se os dados relativos a rochas sedimentares detríticas, dado a heterogeneidade vertical das formações não permitir assegurar, na maior parte dos casos, se a contribuição para as concentrações de radão medidas provém de níveis areno-conglomeráticos ou areno-pelíticos.

Os resultados da tabela III correlacionam-se significativamente com os indicadores geoquímicos anteriormente referidos. Assim, as habitações assentes em rochas carbonatadas revelam as mais baixas concentrações de radão (30 Bq.m^{-3}), em consonância com os seus escassos teores de U, e reduzidas concentrações de radão nos solos (Neves *et al.*, 1999); os teores de U e as concentrações de radão nos solos das rochas sedimentares detríticas poderiam fazer supor uma maior capacidade de transmissão de radão às habitações; no entanto, o facto de, em geral, estas rochas possuírem estratificação sub-horizontal confere-lhes escassa permeabilidade, pelo que não surpreende que os metassedimentos, de foliação geralmente sub-vertical, mostrem níveis de radão mais elevados nas habitações sobre eles construídas (70 contra 50 Bq.m^{-3} , respectivamente). Tal como foi

Tabela III – Valores médios (média geométrica) da concentração do radão no ar do interior de habitações que assentam sobre as várias litologias das regiões em apreço. N é o número de observações.

Litologia	Radão (Bq.m ⁻³)	N
Rochas carbonatadas da região de Coimbra	30	12
Sedimentos detriticos indiferenciados	50	82
Gneisses e micaxistos da região de Figueiró dos Vinhos	50	10
Rochas metassedimentares (xistos e grauvaques)	70	68
Rochas metassedimentares com metamorfismo de contacto	240	30
Granito de Figueiró dos Vinhos	90	26
Granito de Tondela	120	79
Granito de Castelo Branco	110	27
Granito de Tábua-Guarda	280	390

anteriormente referido, nos casos em que as rochas metassedimentares de idade ante-ordovícica mostram ter sofrido metamorfismo de contacto, induzido por rochas graníticas, pode ocorrer acentuado enriquecimento em urânio e, conseqüentemente, elevados níveis de radão nos solos; as habitações construídas sobre este tipo de materiais geológicos reflectem esse facto, apresentando concentrações médias de radão (240 Bq.m⁻³) superiores às observadas em diversas rochas graníticas, aproximando-se mesmo da mais elevada média obtida, a qual foi observada para o granito de Tábua-Guarda (280 Bq.m⁻³). O granito de Figueiró dos Vinhos, com média de radão nas habitações de 90 Bq.m⁻³, comprova que a afectação do grau de risco na base meramente de uma classificação litológica pode conduzir a uma incorrecta avaliação, uma vez que, mesmo tratando-se de granito, os valores em pouco excedem os observados nos metassedimentos. Nem todas as rochas graníticas apresentam, de facto, elevado potencial de produção de radão, como este caso exemplifica. Por outro lado, embora as restantes rochas graníticas apresentem mais elevada concentração média de radão nas habitações, distinguem-se também entre si por apresentarem potencial de radão distinto; os granitos de Tondela e de Castelo Branco situam-se num patamar intermédio (110-120 Bq.m⁻³), e o granito de Tábua-Guarda apresenta o mais elevado potencial de transmissão de radão às habitações.

5. AVALIAÇÃO DO RISCO DE RADÃO

Ao que se sabe, o radão pode envolver risco para a saúde especialmente espaços confinados onde a ventilação se não processe com o necessário vigor. Para que esse risco exista, duas condições são necessárias: o gás deve ser produzido na rocha e no solo, e por este ser exalado em quantidade bastante; o gás exalado deve penetrar no espaço confinado. A arquitectura da habitação, os materiais líticos utilizados, e especialmente as técnicas usadas na construção, influem na concentração do radão

no ar do seu interior; por exemplo, a existência de uma caixa de ar ventilada situada sob a habitação impedirá que boa parte do radão exalado do solo migre para o seu interior. O clima, ao condicionar a ventilação natural das habitações, pode também contribuir de forma indirecta para incrementar ou reduzir as concentrações de radão no seu interior.

Em todo o caso, o contexto geológico pode induzir no ambiente risco potencial de radão; foram já estabelecidos esquemas de classificação desse risco, adoptados internacionalmente, os quais se baseiam na concentração do radão nos solos (vg. AKERBLUM, 1994; APPLETON & BALL, 1995), fazendo-se corresponder risco baixo, moderado, elevado e muito elevado a certos intervalos de concentração. Mapas de risco podem ser construídos conjugando informação geológica, geoquímica e radiométrica, e tomando em consideração a permeabilidade dos materiais geológicos.

Dos dados obtidos pode concluir-se que, ao avaliar o risco de radão, especial atenção deve prestar-se a alguns tipos de rochas graníticas e a metassedimentares de contacto, bem como a falhas que intersectam aquelas rochas. As falhas com elevado potencial de produção de radão, que, como já referimos, se alinham maioritariamente segundo N30-35°E e N70-80°E, devem merecer, pois, atenção especial aquando da elaboração de mapas de risco de radão, instrumentos que consideramos necessários na configuração duma correcta política de ordenamento do território. A elaboração dum mapa de risco de radão carece da detecção destas estruturas e da sua cartografia a uma escala local (1:5000 a 1:1000), particularmente em áreas sujeitas a pressão urbanística.

Delimitadas as áreas de risco, poderão fundamentadamente ser tomadas, aquando da construção, medidas de minimização que se considerem apropriadas. Estas medidas podem, em alguns casos, consistir no uso de adequadas técnicas de construção dos edifícios projectados. Para áreas urbanas já ocupadas, podem ser executadas algumas modificações nos edifícios que reduzam o fluxo de radão do substrato para o seu interior, ainda que, neste último caso, os custos sejam consideravelmente superiores aos que estão implicados na resolução do problema em habitações a construir. Este facto explica, aliás, que a recomendação da União Europeia estabeleça limites mais exigentes para a concentração de radão tolerável em habitações a construir, relativamente às já existentes (200 e 400 Bq.m⁻³, respectivamente).

6. CONCLUSÕES

1) O maior risco de radioactividade natural deve-se à presença de radão no ar do interior de habitações. Este gás provém essencialmente do solo sobre que assenta a habitação. 2) Os materiais líticos usados na construção de habitações

podem incrementar o risco de construir num dado local se tiverem níveis de radioactividade elevados. Deve ser, por isso, tida em conta a concentração de U nas rochas usadas na construção, de modo a evitar a disseminação de materiais radioactivos. 3) Embora as maiores concentrações de radão em habitações se encontrem em solos de certas litologias subjacentes, não basta o conhecimento destas para avaliar o risco de radiação. Com efeito, a concentração de radão no solo depende do facto de U estar ou não confinado na estrutura dos minerais, e ainda de factores como o tipo e a densidade da fracturação, a orientação das fracturas, a permeabilidade do solo. 4) Especial atenção deve ser dada à ocupação humana de solos sobrejacentes a falhas, as quais por vezes possuem enchimento com fundo radiométrico muito anómalo, a metassedimentos de contacto com granitos e a encaves no interior destes, bem como ao granito de Tábua-Guarda, onde os teores de urânio e o suporte mineralógico deste elemento químico propiciam acentuados níveis de exalação de radão. 5) É recomendável que, na expansão de áreas urbanas, seja seguida uma política de ordenamento que tenha em conta os riscos associados à presença de níveis elevados de radão, construindo, para o efeito, mapas de potencial a uma escala local (1:5000 a 1:1000). 6) Quando é elevado ou muito elevado o risco de radiação, é recomendável que as novas habitações tenham a sua construção condicionada ao uso de técnicas que minimizem o risco, e as já existentes sejam rastreadas no sentido de avaliar o risco que sobre elas impende e de controlar esse risco.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi executado no âmbito do Grupo de Modelagem de Sistemas Geológicos, do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra, e teve financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia através deste Centro.

BIBLIOGRAFIA

- ÅKERBLOM, G. (1994) – Ground radon – monitoring procedures in Sweden. *Geoscientist*, 4, 21-27.
- APPLETON, J.D. & BALL, T.K. (1995) – Radon and background radioactivity from natural sources: characteristics, extent and relevance to planning and development in Great Britain. British Geological Survey, Technical Report WP/95/2.
- COSTA, L.A.P.A., NEVES, L.J.P.F., PEREIRA, A.J.S.C. & GODINHO, M.M. (1997) – Alguns dados geoquímicos sobre as rochas da região de Seia, com especial ênfase no urânio e no tório. *IV Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e X Semana de Geoquímica, Actas*, Braga, 377-379.

- FIGUEIREDO, J.M.S., PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F. & GODINHO, M.M. (1997) – Distribuição de U e Th em rochas graníticas e metassedimentares da área urbana de Castelo Branco (Portugal Central). *IV Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e X Semana de Geoquímica, Actas*, Braga, 385-388.
- FIGUEIREDO, J.M.S., PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F. & GODINHO, M.M. (1998) – Distribuição do radão em solos da área urbana de Castelo Branco (Portugal Central). *Comunic. Inst. Geol. Min.*, 84, E114-117.
- NEVES, L.J.P.F., PEREIRA, A.J.S.C., GODINHO, M.M. & DIAS, J.M. (1996) – A radioactividade das rochas como um factor de risco ambiental no território continental português: uma síntese., in *V Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*, Eds. C. Borrego, C. Coelho, L. Arroja, C. Boia e E. Figueiredo, **1**, pp. 641-649.
- NEVES, L.J.P.F., PEREIRA, A.J.S.C. & GODINHO, M.M (1999) – Actividade do radão em habitações da região de Coimbra e factores geológicos condicionantes. *II Congresso Ibérico de Geoquímica*, Lisboa, Actas, 131-135.
- PEREIRA, A.J.S.C. & PONTE, M.J.B. (1992) – Geologia da região de Tondela-Oliveira do Hospital (Portugal Central). *Memórias e Notícias*, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol. Univ. Coimbra, 114, 1-17.
- PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F., SOARES, A.F., GODINHO, M.M. & MARQUES, J.F. (1997) – Distribuição de U e Th em rochas da região de Coimbra (Portugal Central). *IV Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa e X Semana de Geoquímica, Actas*, Braga, 405-408.
- PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F., SOARES, A.F., GODINHO, M.M. & MARQUES, J.F. (1998) – Distribuição do radão em solos da região de Coimbra (Portugal Central). *Comunic. Inst. Geol. Min.*, 84, E110-113.
- PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F., ABRANTES, L.M.C.B.L. & GODINHO, M.M (1999a) – Distribuição de U e Th em áreas radiometricamente anómalas da região de Oliveira do Hospital (Portugal Central). *II Congresso Ibérico de Geoquímica, Lisboa, Actas*, 409-411.
- PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F. & GODINHO, M.M. (1999b) – Suportes de urânio no granito das Beiras – implicações para o potencial de emissão do radão. *II Congresso Ibérico de Geoquímica, Lisboa, Actas*, 137-140.
- PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F. & GODINHO, M.M. (1999c) – Distribuição do radão em áreas radiometricamente anómalas da região de Oliveira do Hospital (Portugal Central). *II Congresso Ibérico de Geoquímica, Lisboa, Actas*, 127-130.
- PEREIRA, A.J.S.C., SALGADO, A.L.V., NEVES, L.J.P.F. & GODINHO, M.M. (1999d) – Distribuição do radão em solos da região de Tondela. *II Congresso Ibérico de Geoquímica, Lisboa, Actas*, 441-444.
- SALGADO, A.L., PEREIRA, A.J.S.C., NEVES, L.J.P.F. & GODINHO, M.M. (1998) – Distribuição de U e Th em rochas da região de Tondela (Portugal Central). *Comunic. Inst. Geol. Min.*, 84, B122-125.
- TEIXEIRA, M.M.R. e FAÍSCA, M.C. (1992) – Concentrações de radão em habitações a nível nacional. *III Conf. Nacional sobre a Qualidade do Ambiente*, vol. II, p. 522-531.

AS CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS E O COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DOS TERRENOS NO BAIRRO DA BICA, LISBOA

I. MOITINHO DE ALMEIDA¹, J. LOPO MENDONÇA¹,
M. OLIVEIRA DA SILVA¹, G. BARBOSA DE ALMEIDA^{2,3} e C. FONSECA³

PALAVRAS-CHAVE: Lisboa, Miocénico, hidrogeologia urbana, problemas geotécnicos.

KEY WORDS: Lisbon, Miocene, urban hydrogeology, geotechnical problems.

RESUMO

No Bairro da Bica, em Lisboa, tem sido referido o aparecimento de novas emergências de água no piso térreo de alguns edifícios da Calçada da Bica Grande.

Estes fenómenos podem levar à degradação das condições geotécnicas locais e exigem particular atenção devido aos antecedentes desta zona de Lisboa: a própria toponímia está associada à existência de nascentes e no passado houve escorregamentos, por vezes de grandes dimensões, que justificam em parte a sua acidentada topografia.

No âmbito deste estudo recolheu-se informação geológica, geotécnica e hidrogeológica sobre a área do Bairro da Bica e inventariaram-se os pontos de água.

A interpretação dos fenómenos de instabilidade geotécnica registados no passado, o modelo hidrogeológico esboçado e a caracterização das unidades geotécnicas podem servir para antecipar o comportamento e os riscos associados a intervenções urbanas superficiais e no subsolo que colidam com a percolação da água subterrânea.

¹ Centro e Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, C2 – 5º Piso, 1749-016 Lisboa, moitinho@fc.ul.pt, jmendonca@fc.ul.pt, mosilva@fc.ul.pt

² Câmara Municipal de Lisboa, Campo Grande, 25 – 3 A, 1749-099 Lisboa, gabinetegeologia@cm-lisboa.pt

³ Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, C2 – 5º Piso, 1749-016 Lisboa

ABSTRACT: Geotechnical framework and its hydrogeological conditioning at Bairro da Bica, Lisboa

Several new water emergencies have been reported on the ground floors of some buildings in the Calçada da Bica Grande, at the Bica quarter in Lisbon.

Given their consequences to the geotechnical properties, these occurrences must be regarded with particular attention in this area of Lisbon, known by the abundance of natural and artificial springs (bica), which justify the toponymy of the quarter (Bairro da Bica). The abundance of water, inducing significant land instability, is one of the remarkable features of this area where historical landslides have occurred.

In order to understand the geological, geotechnical and hydrogeological characteristics of the area data has been collected. The knowledge and interpretation of the geotechnical and ground water flow can be used to predict and minimize the consequences of future urban interventions.

INTRODUÇÃO

Recentemente, no Bairro da Bica, em Lisboa, tem sido notado o aparecimento de novas emergências de água no piso térreo de alguns prédios da calçada da Bica Grande que, aparentemente, também é o local do bairro mais afectado por fenómenos passados de instabilidade geotécnica. A constatação destes factos está na base do estudo aqui apresentado, onde se sintetiza a informação hidrogeológica e geotécnica disponível e se esboçam o modelo conceptual de fluxo das águas subterrâneas e as suas influências na estabilidade geotécnica do maciço.

A ocorrência de água nos terrenos é, em regra, um factor desfavorável do ponto de vista geotécnico quer pela degradação das características de resistência e deformabilidade dos terrenos que normalmente se lhe associa, quer pela instalação de subpressões sobre as estruturas quer, ainda, pelas dificuldades construtivas que acrescenta.

A urbanização dos terrenos causa alterações significativas no ciclo hidrológico local e regional, nomeadamente, como é facilmente perceptível, com o aumento dos caudais de cheia e a deterioração da qualidade das águas superficiais. À semelhança do que acontece com as águas superficiais, a urbanização causa impactes nos sistemas aquíferos que se traduzem por alterações na recarga, nos níveis piezométricos, nos escoamentos e na qualidade da água. Um factor importante e muito óbvio que condiciona o regime hidrológico subterrâneo é a impermeabilização de grandes superfícies do terreno, nomeadamente nas zonas urbanas mais antigas, onde as zonas verdes são em geral de área muito limitada. Além da influência na taxa de infiltração profunda, a impermeabilização pode conduzir à contaminação físico-química e microbiológica da água que se infiltra.

As infra-estruturas urbanas podem desempenhar papel importante na alteração dos escoamentos subterrâneos (FOSTER & MORRIS, 1997), comportando-se de forma muito diversificada: como barreiras e zonas preferenciais de escoamento, sumidouros ou fontes de água, como é o caso das redes de abastecimento e de saneamento.

A construção e o desenvolvimento das áreas urbanas podem levar, por outro lado, a alterações de níveis piezométricos com impactes de natureza geotécnica e nas estruturas urbanas (CESANO & OLOFSSON, 1997; HERNÁNDEZ & GONZÁLEZ, 1997; STIPHO, 1997). A construção de estruturas urbanas subterrâneas (caves e túneis, por exemplo) faz-se muitas vezes abaixo da superfície freática ou colide com aquíferos confinados ou semiconfinados superficiais. O rebaixamento do nível piezométrico provocado pela drenagem de água, temporária ou permanente, pode conduzir a problemas geotécnicos, como assentamentos locais, subsidência mais ou menos generalizada e danos em fundações de edifícios, como é exemplo o apodrecimento e a decomposição bacteriológica de estacas de madeira quando expostas ao ar. No entanto, as alterações de níveis piezométricos podem ser de sentido oposto ao relatado. Isto é, a diminuição das extracções de água subterrâneas provocada, por exemplo, pela substituição de origens locais por águas superficiais ou outras exógenas ao perímetro urbano, pode ser a causa da subida dos níveis piezométricos. Também as fugas de água das redes de abastecimento e/ou de saneamento podem conduzir a uma situação em que a recarga é superior à recarga natural o que conduz à subida generalizada dos níveis de água nos aquíferos. Estes fenómenos podem ser a causa de inundações de caves e outras cavidades subterrâneas e implicar a instalação de sistemas de drenagem permanentes. A mesma ocorrência pode ser a origem do desenvolvimento de subpressões sobre as estruturas, de variações de volume dos solos, de alteração da resistência em solos sensíveis, de movimentos em fundações, da deterioração dos betões e da corrosão do aço e elementos metálicos das estruturas.

O BAIRRO DA BICA – EVOLUÇÃO URBANA

A Bica é um bairro típico de Lisboa, de dimensão reduzida que ocupa uma dezena de arruamentos, e está encaixado num vale delimitado a leste pelo Alto das Chagas e a oeste pelo Alto de Santa Catarina (fig. 1).

No Bairro da Bica, ao longo dos tempos que correspondem à sua ocupação urbana, têm-se registado fenómenos de instabilidade geotécnica. Há descrições de escorregamentos de terras que remontam aos séculos XVI e XVII. A presença de emergências de água subterrânea é igualmente reportada e está na origem da sua toponímia.

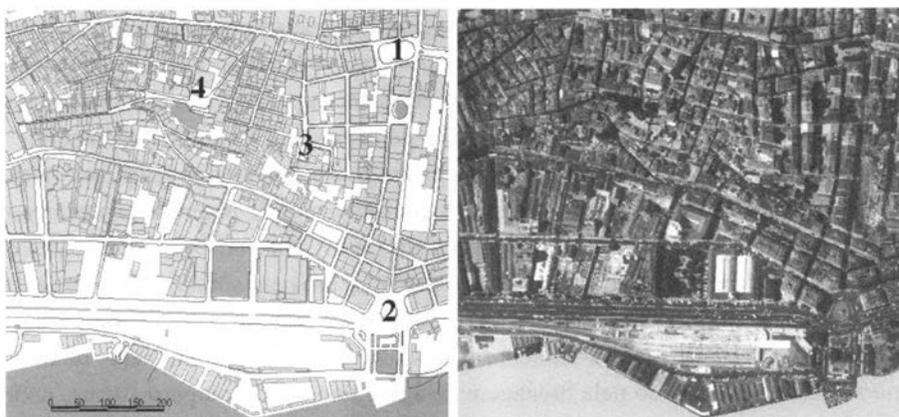


Fig. 1 – Localização da área estudada. 1 – Praça Luís de Camões; 2 – Cais do Sodré; 3 – Alto das Chagas; 4 – Alto de Santa Catarina.

No final do século XV, os terrenos a ocidente da área urbana, limitada pela muralha fernandina, estavam integrados em duas grandes herdades com olivais, vinhas, pomares e campos de cereais, e a estrada de Santos ou da Horta Navia, era uma importante via de acesso à cidade pelas portas de Santa Catarina. A herdade da Boavista, a sul, marginava o Tejo até à Esperança, entre o que são hoje as Chagas e o alto de Santa Catarina. A herdade de Santa Catarina, a norte, ocupava as terras mais altas e ia até à Cotovia e aos Moinhos de Vento, actual Príncipe Real.

No século XVI, a zona ribeirinha foi sendo ocupada, principalmente por gente ligada às actividades do mar. Em Julho de 1597, um aluimento de terras cavou um vale entre os altos de Santa Catarina e Chagas, destruindo três ruas e cerca de 110 casas. A este grande movimento de terras, bem documentado, seguiram-se, em 1621, novos desabamentos de menor dimensão. Na zona correspondente a estas instabilizações existiram diversas emergências e captações pouco profundas de água subterrânea, actualmente quase todas desactivadas.

No início dos séculos XVIII, o bairro encontrava-se praticamente todo construído, sendo o século XIX um período de adensamento da malha urbana com ocupação dos espaços deixados pelos terraços, pátios ou logradouros.

Actualmente, o Bairro da Bica e zona envolvente enquadra-se na chamada Área Histórica de Lisboa, com elevada densidade de construção, com ruas asfaltadas, portanto com baixa permeabilidade, e com passeios de calçada à portuguesa que, em regra, permite uma maior infiltração que o asfalto. Trata-se também de zona onde a redes de distribuição de água e saneamento são antigas e susceptíveis de apresentarem perdas elevadas. Para a Área Histórica de Lisboa há estimativas que apontam para fugas até 40% do caudal distribuído, o que corresponde a um valor de recarga superior ao estimado para a recarga natural.

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

A área correspondente ao Bairro da Bica encontra-se localizada na vertente sul do conjunto de colinas que constituem o interflúvio que separa a sul a bacia da ribeira do Vale de Pereiro - Esteiro da Baixa da bacia do vale da ribeira de São Bento e que tem a norte, como vértice, a colina do Príncipe Real. Trata-se de uma área muito acidentada, onde predominam os declives superiores a 25 %.

Este retalho de uma antiga superfície de aplanção dos terrenos miocénicos, provavelmente protegida pelas bancadas dos “Calcários de Entrecampos”, é actual e quase exclusivamente constituído por terrenos da base da série miocénica (“Argilas e Calcários dos Prazeres” e “Areolas da Estefânia”), que nesta zona constituem, no geral, um monoclinal levemente inclinado para sul e sudeste (fig. 2), localmente perturbado por pequenos acidentes tectónicos. As aluviões do Tejo recobrem os terrenos terciários a sul e, pontualmente, encontram-se alguns depósitos de aterro e depósitos de vertente (ALMEIDA, 1991).

As dificuldades de caracterização das condições geológicas nesta zona podem ser generalizadas a quase toda a área do concelho de Lisboa, densamente coberta pela ocupação urbana. Neste caso, é apenas possível recorrer à cartografia geológica existente (ALMEIDA, 1986), preparada a partir dos levantamentos de campo do final do século XIX e início do século XX e de dados de sondagens geotécnicas existentes e integrar novos dados de sondagens entretanto realizadas. Na área estudada foi possível compilar 8 relatórios geotécnicos, incluindo 34 sondagens e 460 ensaios SPT, abrangendo o conjunto das formações geológicas referidas e que permitiram confirmar a estrutura geológica local e definir as principais características geotécnicas.

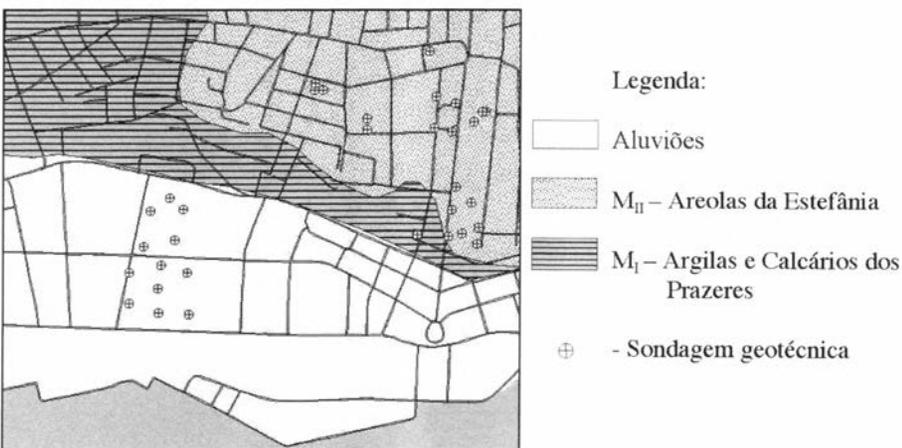


Fig. 2 - Esboço geológico e localização das sondagens geotécnicas.

A área é caracterizada pela diferença de comportamento entre as formações superficiais de aterros e aluviões, quase exclusivamente constituídas por solos normalmente consolidados, compressíveis e com baixa resistência, e as formações do substrato miocénico fortemente sobreconsolidadas e superficialmente descompactadas.

Em todas as sondagens foram atravessados depósitos de aterro, com matriz predominantemente arenosa, englobando não só terra vegetal mas também matérias deslocados, incluindo depósitos de vertente, e materiais antrópicos. A espessura média dos aterros é de 3,6m e máxima de 7,5m numa das sondagens realizada no Largo Barão de Quintela. Os resultados dos ensaios SPT (fig 3) indicam tratar-se de solos muito soltos (42%), soltos (18%) e medianamente compactos (22%). Os valores mais elevados correspondem a elementos mais grosseiros, normalmente associados a fases anteriores de construção. Numa das sondagens realizadas na Rua das Chagas, com aterros atingindo espessuras da ordem dos 7m, foi interceptado um “vazio”, não revestido, entre os 4m e os 5,3m de profundidade. Não tendo mais elementos relativos à geometria deste “vazio” e considerando que as sondagens foram realizadas em época de estiagem (Junho de 2000), com nível de água a cerca de 7,5m de profundidade, instalado na formação das Areolas da Estefânia, pode admitir-se a hipótese de fazer parte de um antigo sistema de captação de água.

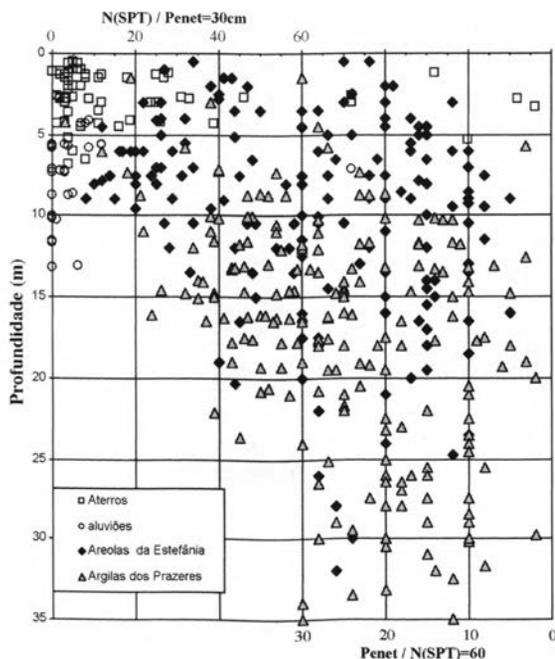


Fig. 3 – Resultados dos ensaios SPT nas sondagens realizadas na área da Bica.

O alinhamento definido pelas ruas de São Paulo e da Boavista, correspondem ao limite da zona aplanada do enchimento a aluvionar (fig. 2). A maior parte desta área terá sido conquistada ao rio, em sucessivas fases, através da construção de aterros. Nas sondagens realizadas entre a Av. 24 de Julho e a Rua da Boavista foram atravessados depósitos aluvionares predominantemente lodosos, muito moles a moles (fig. 3), com níveis dispersos de areias siltosas a lodosas, soltas a medianamente compactas.

Os dados das sondagens realizadas nas “Areolas da Estefânia” indicam que são predominantemente ($\approx 74\%$) constituídas por siltes areno-argilosos micáceos incoerentes (areolas), de tons amarelados, com intercalações calcareníticas ou argilosas. Os ensaios SPT (fig. 3) indicam tratar-se de solos arenosos muito compactos, com mais de 65% dos resultados superiores a 50.

Os níveis do topo das “Argilas e Calcários dos Prazeres”, atravessados nas sondagens analisadas, são predominantemente ($>70\%$) constituídos por argilas siltosas cinzento escuro a negro, com intercalações de margas e calcários ou arenosas. Os ensaios SPT realizados (fig. 3), correspondem a solos muito rijos a rijos, com mais de 75% de valores superiores a 50.

ENQUADRAMENTO HIDROGEOLÓGICO

A geologia descrita serve de suporte a dois sistemas hidrogeológicos distintos: o aluvionar e o miocénico.

O sistema hidrogeológico aluvionar é caracterizado por unidades lenticulares de condutividade hidráulica e armazenamento contrastantes: as areias, de condutividade hidráulica relativamente elevada, com comportamento de aquífero; os lodos e as argilas, de condutividade hidráulica muito baixa, com comportamento de aquífero ou de aquífero. Isto é, ter-se-á uma estrutura aquífera complexa com camadas mais ou menos contínuas e espessas de lodos ou areias lodosas semiconfinando e delimitando as areias.

O sistema hidrogeológico miocénico é multicamada constituído por alternância de camadas relativamente permeáveis (areias, arenitos e alguns calcários) com outras semipermeáveis, como os argilitos e os siltitos.

As camadas aquíferas deste sistema hidrogeológico fornecem água doce que no passado era aproveitada por nascentes localizadas em zonas de topografia favorável e que abasteciam alguns dos chafarizes de Lisboa. Nalgumas zonas da cidade, o sistema hidrogeológico do miocénico é aproveitado por intermédio de algumas captações por furo com produtividade muito variáveis.

Na zona entre o Terreiro do Paço e Santa Apolónia são numerosas as nascentes (algumas delas foram consideradas minero-medicinais) relacionadas com os terrenos miocénicos e eventualmente com sistemas de falhas. Referem-se algumas: Banhos

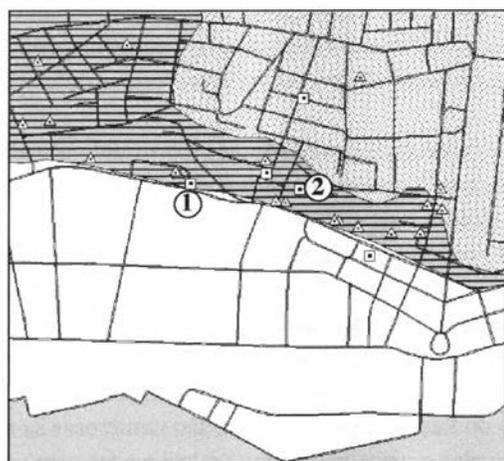
do Doutor (contíguos ao Chafariz de Dentro); Alcaçarias do Duque, Banhos de J.A. Batista e Banhos de D. Clara, na área do Terreiro do Trigo; emergência no local do Chafariz de El Rei.

No âmbito espacial que respeita ao Bairro da Bica, a área de recarga deste sistema hidrogeológico estende-se para norte, desde a margem do Tejo até à zona de Campolide – Parque Eduardo VII, e as zonas de descarga são os vales do Tejo e das antigas ribeiras das actuais avenida da Liberdade e rua de S. Bento.

À semelhança do que acontece na zona entre o Terreiro do Paço e Santa Apolónia, no Bairro da Bica, além das referências históricas a fontes e nascentes, foram inventariados mais de duas dezenas de pontos de água (fig. 4), incluindo nascentes, poços e minas (FONSECA, 2002).

Do inventário realizado destacam-se:

- A Bica dos Olhos ① (actualmente desactivada) alimentada por uma nascente situada no prédio contíguo. Descrevem-se os resultados de uma análise química de 1927: “de acordo com a aplicação médica que o povo, empiricamente descobriu – sendo uma água sulfatada cálcica de elevado resíduo seco, imita as formas galénicas dos oftalmologistas, também à base de sulfato” (FLORES e CANHÃO, 1999).
- A Bica do Pátio do Broas ou Fonte da Bica ② (provavelmente origem da toponímia do bairro), em 1957, segundo Mário Real *in* CORDEIRO (1997) fornecia água aos moradores do Pátio do Broas e “estava metida num grande e alto vão aberto na escarpa e possuía um largo tanque que era utilizado na altura para lavar a roupa”. Actualmente, mantém-se o arranjo da bica, o caudal é de 0,3 L/s e a água tem condutividade eléctrica de 1,3 mS/cm, pH de 7,6 e temperatura de 19,4 °C.



- - bicas e chafarizes
- △ - pontos de água

Fig. 4 – Localização dos pontos de água.

- Cerca de duas dezenas de poços tapados e/ou entulhados, localizado no interior de prédios.
- A maioria dos edifícios onde tem sido notado o aparecimento de novas emergências de água no piso térreo (fig. 4) localiza-se sobre as “Argilas e Calcários dos Prazeres”.

A HIDROGEOLOGIA E O COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

De acordo com as descrições históricas existiram três movimentos de terra no Bairro da Bica, o primeiro em 1597, o segundo em data desconhecida e o terceiro em 1621. Apesar da maioria dos autores afirmar que o primeiro movimento de terra foi causado por sismo, a verdade é que não existe notícia de qualquer outro fenómeno que possa ser associado a um sismo nessa mesma data.

O primeiro movimento de terras de 1597 ocorreu em 21 de Julho a que se seguiu a 7 de Agosto do mesmo ano um importante movimento de terra na ribeira de Alcântara. Estes factos fazem pensar que o escorregamento que deu origem ao vale da Bica teve origem numa ocorrência anormal da precipitação que desencadeou um movimento rotacional ou misto nas “Areolas da Estefânia”. A entrada de água no maciço e o correspondentes aumento de peso e a degradação da resistência, devem ter ocorrido através de fendas ou fracturas de descompressão e/ou de origem tectónica paralelas à orientação do relevo e ao do vale do Tejo.

Da descrição histórica do movimento de terras de Fevereiro de 1621 parece poder depreender-se que houve um desmoronamento de terras, favorecido pela atitude das camadas e certamente relacionado com a degradação da resistência do maciço provocada pela água das chuvas infiltrada naquele Inverno.

O aparecimento de novas emergências de água no piso térreo de alguns prédios da calçada da Bica Grande que, aparentemente, também é o local do bairro mais afectado por fenómenos de instabilidade geotécnica, de acordo com o inventário das situações melhor caracterizadas, aparenta estar associado a intervenções no subsolo. Com efeito, no processo de requalificação urbanística em curso no Bairro da Bica, as fundações directas dos edifícios sujeitos a intervenção têm sido substituídas por fundações indirectas do tipo micro-estacas.

Num caso inventariado, a descrição da ocorrência corresponde à emergência de água através do furo, reveladora de fenómeno de artesianismo repuxante provocado por atravessamento de camada aquífera confinada.

Noutro caso, apesar de não aparecer água no piso térreo do edifício onde foram construídas as micro-estacas, as manifestações de água no piso térreo de outros edifícios próximos começaram a surgir após esta intervenção. O mecanismo que pode explicar esta ocorrência é idêntico ao do relato anterior, havendo neste caso um “horizonte” intermédio por onde se escapa a água. Estar-se-ia num situação

típica de “circulação inter-aquíferos” em que as perfurações ou a zona envolvente das micro-estacas promovem o “curto-circuito hidráulico” entre camadas permeáveis.

O aparecimento destas emergências poderá ter duas consequências: (1) a instalação de subpressões sobre os revestimentos de pisos térreos e/ou a emergência de água; (2) a alteração e/ou decomposição de argilas e margas sensíveis com a correspondente degradação da resistência mecânica e o aumento de deformabilidade.

De acordo com o exposto, o volume do maciço correspondente às “Argilas e Calcários dos Prazeres”, onde se localiza a maioria dos pontos de água inventariados, parece ser a zona do maciço mais problemática no que respeita à circulação de água subterrânea:

- Porque a zona superior pode funcionar localmente como substrato menos permeável relativamente às “Areolas da Estefânia”;
- Porque as intercalações calcárias são zonas de permeabilidade relativamente mais elevada por onde se podem dar fluxos concentrados e em pressão, de tipologia idêntica à que se admite estar associada à nascente da Bica Grande que, no contexto hidrogeológico descrito, é uma nascente de caudal elevado;
- Porque sendo a Formação em contacto com o nível de base da circulação da água no miocénico (nível da água nas aluviões) é para aí que convergem os escoamentos.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F. Moitinho (1986), Carta Geológica do Concelho de Lisboa, Escala 1:10000, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- ALMEIDA, I. Moitinho (1991), Características geotécnicas dos solos de Lisboa Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa.
- CESANO, D. & OLOFSSON, B. (1997), Impact on groundwater level when tunneling in urban area. *in* Groundwater in the urban environment, Proceedings of the XXVII IAH congress on groundwater in the urban environment, ed. J. Chilton *et al.*, A.A. Balkema, vol 1, pp.219-230.
- CORDEIRO, G.I. (1997), Um lugar na cidade: quotidiano, memória e representação no Bairro da Bica, Portugal de Perto, 37, Publicações D. Quixote, Lisboa.
- FLORES, A. & CANHÃO, C. (1999), Chafarizes de Lisboa, INAPA, Lisboa.
- FONSECA, C. (2002), Estudo hidrogeológico dos terrenos da área de intervenção do Grupo de Trabalho da Bica, em Lisboa, Relatório de Estágio, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- FOSTER, S. & MORRIS, B. (1997), Groundwater impacts and issues in developing cities – An introductory review. *in* Groundwater in the urban environment – Selected city profiles, ed. J. Chilton, A.A. Balkema, pp.3-16.

- HERNÁNDEZ, M.A. & GONZÁLEZ, N. (1997), Impact of rising piezometric levels on Greater Buenos Aires due to partial changing of water services infrastructure. *in* Groundwater in the urban environment, Proceedings of the XXVII IAH congress on groundwater in the urban environment, ed. J. Chilton *et al.*, A.A. Balkema, vol 1, pp.237-242.
- STIPHO, A.S. (1997), Evaluation of potential geotechnical problems associated with rising groundwater level in Riyadh city, Saudi Arabia. *in* Groundwater in the urban environment, Proceedings of the XXVII IAH congress on groundwater in the urban environment, ed. J. Chilton *et al.*, A.A. Balkema, vol 1, pp.261-271

ANÁLISE DE PROBLEMAS DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA EM ZONAS DIAPÍRICAS: OS CASOS DE BELO HORIZONTE, SANTA CLARA E MORRO DO LENA (LEIRIA)

CLÁUDIA AMADO ¹, ANABELA VEIGA ²,
MÁRIO QUINTA FERREIRA ³ e JOSÉ VELHO ⁴

PALAVRAS CHAVE: Geologia de engenharia, diapiros, ensaios, solos e rochas, fundações.

KEY WORDS: Engineering geology, salt domes, tests, rocks and soils, foundations.

RESUMO

As áreas de Belo Horizonte, Santa Clara e Morro do Lena constituem locais de expansão e de actual desenvolvimento urbano da cidade de Leiria. Encontram-se no limite W do diapiro de Leiria ocorrendo aí um conjunto de aspectos geológicos que as tornam como um caso de referência em Portugal, no que diz respeito aos problemas de geologia de engenharia numa zona diapírica. Estas três zona apresentam uma assinalável diversidade geológica que torna bastante complexa a implantação de obras de engenharia civil. A associar à complexidade geológica, as áreas possuem uma topografia variável que torna o estudo de geologia de engenharia crítico para a resolução dos problemas existentes, nomeadamente: instabilidade de taludes; ocorrência de argilas expansivas; compartimentação por vezes densa, dos maciços, devido à presença de falhas e ainda nascentes de água. O trabalho identifica e analisa os principais factores de risco, de uma forma

¹ Mestranda em Minerais e Rochas Industriais, Universidade de Aveiro, Aveiro

² Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria

³ Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Coimbra

⁴ Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro, Aveiro

integrada, reflectindo também sobre as características dos terrenos e as condicionantes para a definição do tipo de fundações a realizar.

ABSTRACT: Engineering Geology in diapiric zones: the case studies of Belo Horizonte, Santa Clara and Lena hill (Leiria)

Belo Horizonte, Santa Clara and Morro do Lena are new areas of urban expansion of Leiria town. Geologically, these areas are located in a diapiric structure, Leiria-Parceiros, characterized by a great geological diversity. The main goal of this research is to stress out the critical aspects not only about geology but essentially to emphasize the consequences of such a complex structure like a diapir on the implementation of engineering structures. The work identifies and analyses the main problematic aspects, in an integrated way, the geomechanical properties of rocks and soils as well as some technical restrictions to be made in the type of foundation in diapiric areas.

INTRODUÇÃO

As áreas de estudo de Belo Horizonte, Santa Clara e Morro do Lena, localizam-se a WNW da cidade de Leiria, abrangendo um relevo com cotas que variam entre os 40 m e os 85 m. Estas áreas situam-se no interior do diapiro de Leiria-Parceiros e constituem três casos de estudo dos problemas relativos à implantação de estruturas urbanas em formações diapíricas. Este trabalho tem como objectivo inventariar os problemas geotécnicos daquelas três áreas bem como caracterizar o tipo de solo e o comportamento geomecânico bem como a capacidade de suporte dos terrenos, dada a elevada taxa de construção verificada naquelas áreas (fig. 1).

Para o efeito, foram realizados ensaios de laboratório e *in-situ*, nos solos e nas rochas. Os resultados obtidos permitiram fazer algumas reflexões quanto às características dos terrenos de fundação existentes naquelas áreas.

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A estrutura tectónica onde se inserem as áreas de estudo é o diapiro de Leiria-Parceiros, constituído por um núcleo formado pelo complexo "Margas de Dagorda", constituído por margas salíferas e gipsíferas, calcários dolomíticos e gesso com intercalações de sal. O diapiro apresenta uma orientação NE-SW e os seus flancos são constituídos por formações jurássicas, cretácicas e terciárias, afectadas de fortes pendores, especialmente no flanco ocidental, onde as camadas aparecem em posição vertical, ou mesmo, invertidas.

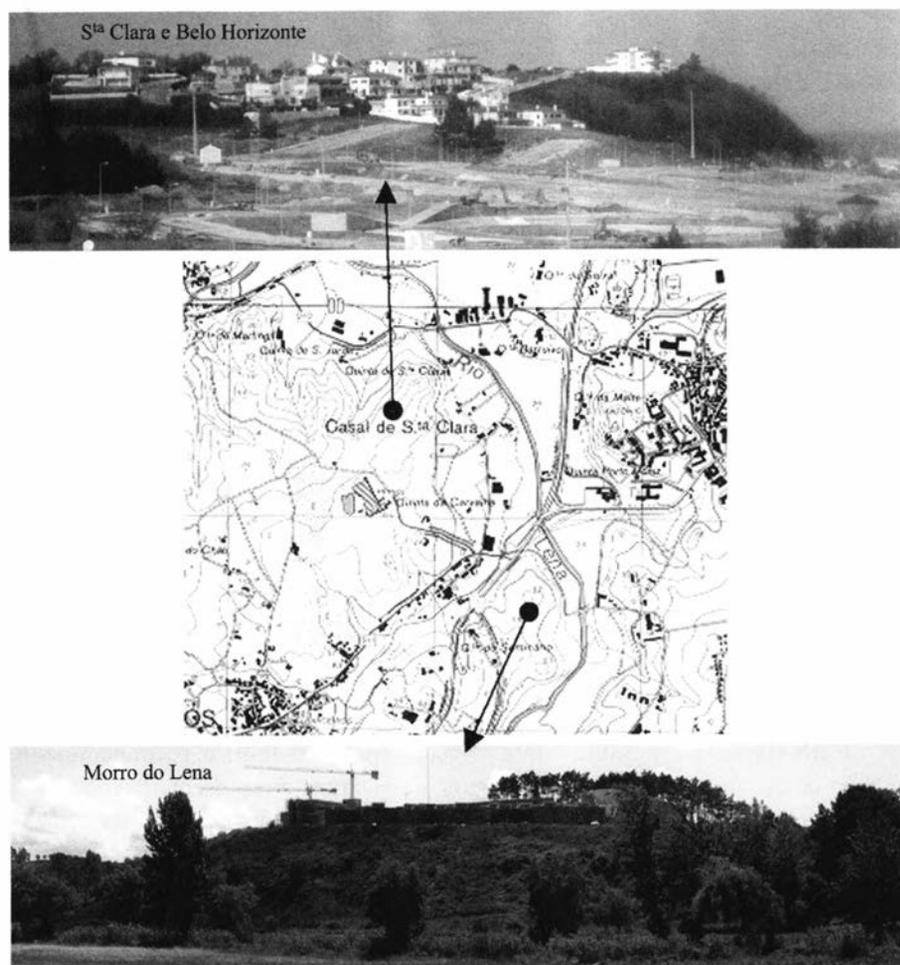


Fig. 1 — Aspectos gerais e localização das áreas estudadas (Carta Militar de Portugal, à escala 1/25 000, folha 297).

Trata-se de um anticlinal de perfil dissimétrico, que terá sofrido compressão de SE para NW (TEIXEIRA *et al.*, 1968). O fenómeno diapírico teve o seu início no Jurássico médio, após o que ocorreu a ascensão magmática, com a formação do domo dolerítico de Belo Horizonte e dos filões doleríticos que atravessam o Morro do Lena e Santa Clara. Os movimentos deformadores permaneceram activos até ao Pliocénico (fig. 2).

Para além daquelas formações geológicas ocorrem ainda solos residuais, depósitos coluvionares, aluviões e aterros de solos e de rochas doleríticas com diferentes graus de alteração.

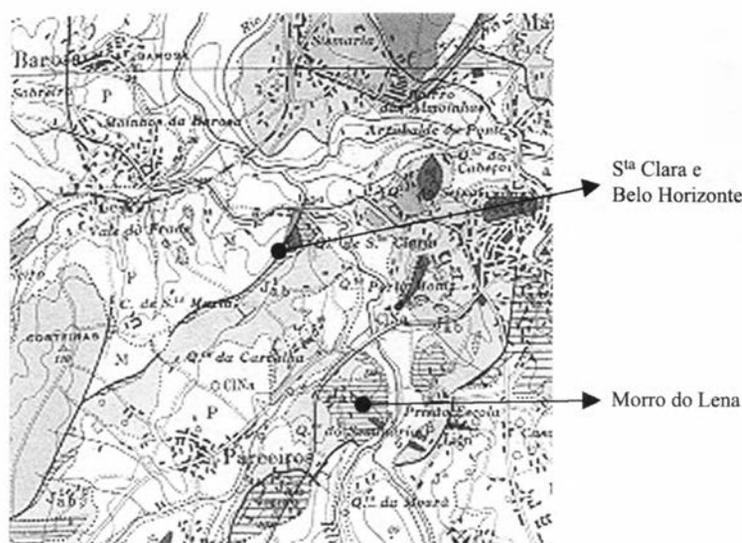


Fig. 2 – Geologia do local (Carta Geológica de Portugal, à escala 1/50 000, folha 23-C).

MÉTODOS

Belo Horizonte e Santa Clara: Nestas áreas foi feito o reconhecimento geológico de superfície, ao qual se seguiu a amostragem representativa dos solos e das rochas, com o objectivo de efectuar o seu estudo laboratorial. Para a caracterização do material rochoso foram utilizados os ensaios de resistência à compressão pontual, massa volúmica, porosidade aparente, absorção de água, desgaste em meio húmido e dureza Schmidt, cujos métodos se baseiam nas normas da International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1978; 1979; 1985). Os ensaios realizados em solos foram a análise granulométrica (E 196, 1966 – LNEC), os limites de Atterberg (NP-143, 1969), o azul de metileno VBS (NF P 94-068, 1993), o equivalente de areia (E 199, 1967 – LNEC), a compactação (E 197, 1966 – LNEC) e o CBR (E 198, 1967 – LNEC). Foram ainda realizados a difracção de raios-X das fracções total, $<63\mu\text{m}$ e $<2\mu\text{m}$, para solos e rochas, e a microscopia óptica, apenas para os doleritos.

Morro do Lena: Os trabalhos de reconhecimento consistiram numa campanha de prospecção geotécnica que envolveu a realização de 30 sondagens mecânicas com comprimentos até aos 176.5m, nos locais destinados aos edifícios da cantina, o bloco D, bem como os da Associação de Estudantes e da Biblioteca, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria (ESTG). Foram realizados os ensaios de penetração normalizada (SPT) que permitiram avaliar as características geomecânicas dos solos prospectados, em termos de resistência,

compacidade relativa e/ou consistência para a definição das condições de fundação. Foram ainda realizados, na formação margosa hetangiana, os seguintes ensaios de laboratório: análise granulométrica, limites de Atterberg, compactação e CBR. Dada a limitação do espaço, serão apresentados os resultados mais significativos.

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Solos: A tabela I apresenta os dados de análise granulométrica (AG), equivalente de areia (EA), azul de metileno (VBS), Proctor e CBR, bem como a classificação dos solos, segundo os sistemas mais utilizados em geologia de engenharia.

Quanto à plasticidade, os solos apresentam grande variedade, desde solos argilosos de baixa plasticidade (CL) a solos argilosos de alta plasticidade (CH). As amostras localizadas no Morro do Lena (Jm6 e Jm7, pertencentes ao Jurássico Inferior) bem como as amostras da mesma formação, nas outras duas zonas (Jm1 e Jm3), apresentam propriedades geotécnicas idênticas.

Os solos arenosos (Ol, Pc2, Pc3, Pc4, Pm2, A1, A2, A3, A4 e M) são areias mal graduadas (SP e SP-SM), geralmente com uma granulometria pouco extensa, em que a fracção fina é quase exclusivamente constituída por siltes não plásticos. Do ensaio de embebição por água verificou-se que as amostras apresentavam uma expansão quase nula, como são os casos das formações Pc e A.

Os solos margosos (Jm1-Jm7) apresentam argilas expansivas exibindo um comportamento problemático devido às suas elevadas plasticidade e expansibilidade.

Tabela I – Valores médios dos ensaios realizados em solos (A=% seixo; B=% areia; C=% argila).

Amostras/ Ensaio	AG %			EA (%)	VBS g/100g	Proctor		CBR			Classificação		
	A	B	C			Wópt. (%)	γdmáx. (g.cm ³)	CBR (%)	GC %	Exp. (%)	ASTM	AASHTO	RTR
D5	12	66	22	7,03	5,583	15	1,9				SC-CH*	A-2-7	B6
Jm1	4	95	72	13,55	1,6	12,2	2,02				SP*	A-2-7	B2
Jm3	28	70	2	17,71	2,8	19,3	1,815				SC-CH	A-2-7	B6
Jm6	7	75	18			15,7	1,81	2	93	33	SP-CL	A-2-6	
Jm7	12	61	27								SP-CL	A-2-6	
Ol	3	72	28								SW*	A-1-b	
Jc2	7	48	45	6,31	3,5						SW-CH*	A-2-7	B4
Jc4	12	61	27	1,64	1,8						SW-SM*	A-2-4	B6
Pc2	0	96	4	21	0,64	10,4	1,995	22	94	0,22	SP	A3	B2
Pc3	6	90	4	19,7	0,65	11,2	2,062				SP	A3	B2
Pc4	0	92	8	14,8	1,36						SP	A3	B2
Pm2	0	99	1	90,6	0,47	Não compactáveis					SP	A3	B2
Dv1	8	77	15	1,3	3,5	13,5	1,89				SW-SC*	A-2-7	B6
Dv2	15	66	19	3,36	2,5	13	1,9				SC-CH*	A-2-7	B6
Dv3	8	57	35	14,83	3,9	14	1,85				SW-SC*	A-2-7	B4
A1	13	82	5	13,94	1,5						SM	A-2-4	B5
A2	9	65	26	14,62	3						SW-SM*	A-1-b	B6
A3	29	68	3	2,95	2,3	10,2	2,105				SM	A-2	B6
A4	18	75	7	8,2	2,4						SC-CL	A-2-6	B6
M	25	64	11	6,1	1,524	12	1,8				SW-SC*	A-2-6	B6

O solo residual dolerítico (D5) é essencialmente uma areia silto-argilosa, de cor castanha, sendo as argilas predominantes, esmectites e caulinites. Este solo apresenta elevada sensibilidade à água, dado o seu elevado valor de azul de metileno (VBS).

Os solos carbonatados, em particular Jc4, apesar de granulometricamente serem areias siltoosas é-lhes atribuído o grupo B6 na classificação RTR, pelo que terá também sensibilidade hidrófila.

Os depósitos coluvionares (Dv) apresentam elevados valores de limite de liquidez e índice de plasticidade e no ensaio do azul de metileno (VBS) obtiveram-se adsorções a variar entre 2,5 e 3,9 g/100g.

Na tabela II encontram-se identificados os complexos lito-geotécnicos bem como os valores médios do índice de resistência à penetração e o respectivo comportamento geotécnico.

Os depósitos de aterro contêm, por vezes, alguns fragmentos líticos e restos de cerâmica; foram depositados para modelação do terreno sem qualquer controle de compactação. Os depósitos de idade pliocénica estão representados por uma alternância de leitos predominantemente granulares. Os valores de Nspt mais elevados correspondem aos solos argilosos muito duros e duros e aos solos arenosos compactos. O substrato Jurássico aumenta de resistência e de compacidade com a profundidade (Tabela II).

Em termos hidrogeológicos, foi referenciado o nível freático, pouco produtivo, a uma profundidade variável entre 4,5 m e 16,5 m.

Tabela II – Complexos lito-geotécnicos e valores médios dos índices de resistência à penetração obtidos nos terrenos do Morro do Lena.

Complexo Lito-geotécnico	Espessura	Caracterização Geológica	Nspt	Comportamento Geotécnico
Horizonte de terra vegetal	1,5m	constituição argilo-siltosa		
Depósitos de aterro	0,6 a 9m	depósitos castanhos de argilas siltoosas e margosas por vezes, c/ passagens arenosas	2 a 23	desfavorável
Depósitos Pliocénicos	4 a 6m	areias finas amarelas	7 a 33	solto a medianamente compacto
		horizonte areno-argiloso alaranjado	15 a 60	medianamente compacto a muito compacto
		horizonte arenoso fino c/ fracção argilo-siltosa, tonalidade amarela c/ laivos alaranjados	27 a + 60	medianamente compacto a muito compacto
	7 a 22m	areias grosseiras c/ seixos rolados castanhas-amareladas	22 a + 60	medianamente compacto a muito compacto
	1,5m	nível argilo-siltoso acastanhado	15 a 19	solo coesivo e duro
Terrenos Jurássicos	5,5 a 12m	horizonte sup. argilo-siltoso e margoso de tonalidades cinzentas-avermelhadas	1 a 30	duro e muito duro
		horizonte inf. c/ fácies argilo-margosa e vénulas gipsíferas, de tom cinzento escuro	6 a + 60	muito duro e rijo
Filão dolerítico		rocha amigdalóide, c/ fenocristais de olivina muito alterada e decomposta	13 a 26	duro e muito duro

Rochas: Na zona de Belo Horizonte, assume particular relevância o talude que se localiza à entrada da urbanização, devido às suas características de instabilidade, relacionadas com a litologia e estrutura das formações que aí ocorrem. Este talude apresenta características essencialmente rochosas a W e terrosas a E. A zona estudada tem uma extensão de 300 m, uma altura média de 20 m e uma inclinação quase vertical. Litologicamente, este talude é predominantemente constituído por margas (Jm4 e Jm5), solos margosos (Jm3), calcários dolomíticos (Jc1) dispostos em bancadas semi-verticais, que se encontram bastante tectonizados com dobras e falhas, calcários margosos (Jc3), intrusão dolerítica (D1-3) e solos coluvionares (Dv1-3). As rochas apresentam-se desde ligeiramente alteradas (à excepção de D3), até desagregadas, provocando desmoronamentos e queda de blocos. O talude apresenta problemas de estabilidade, devido essencialmente à alternância de margas gipsíferas com calcários margosos e dolomíticos.

Na base e parte intermédia E do talude, o material margoso (Jm3), em contacto com a intrusão dolerítica, encontra-se alterado, solto e permanentemente molhado devido a uma nascente. A parte W do talude, embora rochosa e compacta (Jm4, Jm5, Jc1 e Jc3) encontra-se extremamente fracturada e com dobramentos de eixo próximo da vertical, formando-se no pé do talude um depósito de material desagregado. Na crista do talude, o horizonte de terra vegetal é pouco espesso, sendo a vegetação arrastada pelos deslizamentos sucessivos. Também contribuem para a instabilidade do talude as inúmeras falhas, praticamente com orientação N-S, e as diaclases. As descontinuidades facilitam as acções dos agentes de meteorização.

Tabela III – Resultados dos ensaios de caracterização físico-mecânica das rochas estudadas.

Amostras/ Ensaio	Mineralogia e Petrografia	Massa Volumica Aparente (g/cm ³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção rápida (%)	Durabilidade Id (%)	Carga Pontual Is (Mpa) Cs (Mpa)	Dureza Schmidt (r)	Resist. Comp. (Mpa)
D ₁	Dolerito de grão fino, cinzento, pouco alterado (W2)	2,52	18,7	3,07	97	2,1 46,2	59,2	100
D ₂	Dolerito de grão fino, cinzento (W1)	-	-	-	-	- -	61,8	-
D ₃	Dolerito de grão fino, castanho e descolorada (W3)	1,97	12	10,01	93	1,85 40,7	23,2	28
D ₄	Filão de dolerito, castanho e desintegrado			-	-	- -	-	-
Jc ₁	Calcário dolomítico, compacto, de cor creme, duro e resistente	3,04	22	1,32	95	2,38 52,36	40,6	94
Jc ₃	Calcário margoso, cinzento escuro	2,4	17,8	-	78,3	2,1 46,2	16,42	22
Jm ₄	Margas gipsíferas, acizentadas	1,78	14	-	84,5	1,39 30,58	19,42	19
Jm ₅	Margas gipsíferas, avermelhadas	2,32	15,5	-	74,6	0,74 16,28	20,5	22

As rochas foram descritas, do ponto de vista geológico e petrográfico, a que se seguiu a determinação das propriedades índice em laboratório, como a porosidade, massa volúmica, alterabilidade e resistência (Tabela III).

Do ponto de vista mineralógico, o estudo ao microscópio do dolerito mostrou tratar-se de uma rocha básica de grão médio, formada essencialmente por labradorite, augite, óxidos de ferro e de titânio, olivina, para além de minerais argilosos que são produtos de meteorização. A textura é ofítica, típica desta rocha, com os cristais de plagioclase orientados aleatoriamente encontrando-se rodeados por cristais de piroxena. Foi impossível a colheita de uma amostra sã, pelo que as amostras D₁ e D₂ são consideradas como amostras de referência (VELHO *et al.*, 2003).

A análise de difracção de Raios X da fracção <2 mm, para as amostras não orientadas, permitiu a identificação de montmorilonite como o mineral argiloso principal resultante da meteorização do dolerito. As amostras D₁ e D₂ mostram um grau de meteorização muito baixo, enquanto na amostra D₁ é possível a identificação de montmorilonite, de caulinite e de clorite; a amostra D₂ não revela a presença de montmorilonite, estando presentes a caulinite e a ilite. De todas as amostras, aquela que mostra um teor mais elevado em montmorilonite é a D_f (VELHO *et al.*, 2003).

O potencial de desagregação (“slake”) foi avaliado pelo ensaio de desgaste húmido (Slake Durability Test – SDT) segundo a norma da ISRM (1979). O índice Id permitiu classificar as rochas analisadas, pelo que o dolerito e o calcário dolomítico têm uma durabilidade média a alta, enquanto as margas e o calcário margoso têm uma baixa durabilidade. O calcário margoso Jc3, apresentou-se frágil, tendo-se obtido uma perda de massa de 21,7%, superior à rocha carbonatada dolomítica, Jc1, uma vez que este calcário do Sinemuriano, compacto e de textura fina, apresenta elevada resistência.

Os diversos ensaios realizados com o dolerito revelaram valores que possibilitam classificá-lo como alterado. A presença dos minerais mais alterados na amostra D3 é responsável pela diminuição dos valores de massa volúmica aparente, resistência à compressão pontual, resistência à compressão uniaxial, dureza Schmidt e índice de durabilidade. O baixo valor de massa volúmica aparente registada para D3 deverá resultar do elevado grau de alteração desta rocha.

152

A resistência à compressão simples foi estimada a partir dos ensaios de carga pontual (PLT). As amostras de rocha D1, D3, Jc3, Jm4 e Jm5 são moderadamente resistentes, enquanto Jc1 é resistente. As amostras de rocha (Jc3, Jm4 e Jm5) com elevados teores em minerais argilosos, são muito influenciáveis pela presença de água, apresentando uma importante diferença entre os comportamentos nos estados seco e saturado.

A resistência das rochas doleríticas e dos calcários dolomíticos diminui significativamente com o aumento da alteração e da fracturação.

A elevada dureza dos calcários dolomíticos deve-se ao facto de se apresentarem recristalizados, em resultado da circulação de fluidos ao longo das fracturas. Nestas rochas é ainda evidente, para além de falhas e fracturas, um complexo de dobras e micro-dobras.

REFLEXÃO SOBRE AS CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS

1 – Belo Horizonte e Santa Clara

O talude de Belo Horizonte permitiu observar um maciço heterogéneo, com zonas tectonizadas, alteradas e de diferente composição litológica, exibindo comportamentos e resistências diferentes em função do grau de meteorização dos materiais, da facilidade de dissolução das rochas carbonatadas e gipsíferas, da alterabilidade e da capacidade de expansão das rochas (Tabelas I e III).

Em profundidade o domo dolerítico encontra-se num estado praticamente são (grau I), possuindo elevada resistência. No entanto, devido às descontinuidades (falhas, fracturas e diaclasas) e à percolação da água, as características da rocha sofrem uma progressiva degradação. O processo de meteorização provoca a desintegração e a decomposição do dolerito constituído por minerais quimicamente instáveis, como as olivinas, os feldspatos e as piroxenas, formando-se minerais de alteração argilosos e expansivos, que constituem o solo residual D5.

As margas do Hetangiano expandem por hidratação, podendo produzir deformações que podem levar a deficientes comportamentos em obra. De notar, a presença de uma nascente, num local (Jm5) onde o maciço margo-calcário se encontra muito fracturado, diaclasado e dobrado. A parte ocidental do talude mostra a passagem de uma rocha branda (margas e calcário margoso) a uma rocha dura (calcário dolomítico recristalizado), apresentando um carácter descontínuo e anisotrópico.

É na parte oriental do talude, onde este passa a terroso, que a resistência ao corte dos vários tipos litológicos se encontra mais reduzida, o que é agravado pela presença da nascente localizada em Jm3, originando pressões neutras e degradando as propriedades do maciço, tornando-o mais susceptível a processos de deslizamento.

Os solos com esmectites, são muito plásticos e expansivos exibindo baixa capacidade de carga quando possuem elevados teores em água (e.g. solo Jm3).

Os solos como Jm1, Jc2 e Jc4 têm uma plasticidade média a baixa devido ao moderado comportamento (plástico) da caulinite.

Os solos argilo-margosos têm um comportamento particularmente desfavorável quando aplicados em obras de engenharia civil geralmente devido às elevadas percentagens de finos, agravado pela natureza expansível das argilas.

Os solos aluvionares e coluvionares são geralmente de baixa de resistência, uma vez que são essencialmente constituídos por areias siltosas e silto-argilosas muito soltas.

Os depósitos Pliocénicos, sendo mais permeáveis que o substrato, funcionam como mantos retentores das águas superficiais que, por percolação conduzem à lixiviação do substrato Hetangiano.

Os principais mecanismos que condicionam a expansão e o comportamento geotécnico das rochas argilosas são a descompressão e as variações do teor em água, podendo, em casos extremos, ocasionar danos muito elevados nas obras de engenharia civil.

Nestas áreas existe grande possibilidade de ocorrerem posteriormente assentamentos diferenciais nas edificações com fundações directas correntes, provocando o aparecimento de fissuras em vivendas e muros, tal como se verifica na urbanização Belo Horizonte.

2 – Morro do Lena

Na área do Morro do Lena as sondagens evidenciaram a regularidade do substrato Hetangiano coberto por depósitos Pliocénicos com espessuras variáveis. As deficientes características dos terrenos Pliocénicos obrigaram a recorrer a fundações indirectas, procurando atingir o firme, evitando os assentamentos diferenciais posteriormente. As sondagens permitiram reconhecer o maciço e interpretar as unidades geotécnicas ocorrentes, tal como se indica:

- Aterros: Em termos de resistência e de deformabilidade, são materiais sem aptidão para serem mobilizados como nível de fundação.
- Terrenos jurássicos: Muito descomprimidos nos níveis superiores, que apesar de poderem viabilizar uma solução de fundação directa, impõem a utilização de tensões modestas. Os baixos valores de N_{spt} obtidos, denunciam uma acentuada degradação mecânica, em princípio relacionada com a saturação dos terrenos. O estudo geotécnico estabeleceu a presença de solos coesivos de consistência média a rija, com base nos valores de N_{spt} registados.
- Filões doleríticos: Apresentam um comportamento geotécnico não muito diferente da formação encaixante margosa.

As condições geotécnicas, em quase toda a área da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTG) do Instituto Politécnico de Leiria, para a construção de edifícios de vários andares, tornam mais adequado o recurso a fundações indirectas por estacas, a encastrar no complexo Jurássico, mobilizando os níveis profundos, mais resistentes com N_{spt} superiores a 60. Para SE, onde se regista a ocorrência da formação pliocénica, considera-se a possibilidade de mobilizar directamente estes terrenos, a partir dos 4,5m de profundidade, caracterizados por valores de N_{spt} compreendidos entre 23 a 47. No entanto, são interessados terrenos com comportamento geotécnico mais débil aos 6m de profundidade, com valores de N_{spt} entre 15 e 17. Para efeitos de dimensionamento das fundações preconizou-

se a adopção de tensões de contacto modestas, podendo ser necessário privilegiar o recurso à solução de fundações indirectas por micro-estacas a mobilizar os horizontes pliocénicos (GEOCONTROLE, 2001, 2002a, 2002b e 2003; RODIO, 2002).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram a complexidade de implantação de obras de engenharia em zonas diapíricas. A diversidade geológica é enorme, a que se associa a presença de materiais geológicos bastante deformáveis, muitas vezes condicionados por acidentes tectónicos. A tectónica foi responsável pela presença à superfície de rochas e solos gipsíferos e salíferos para além da presença de minerais argilosos expansivos e de rochas com diferentes graus de alteração. A execução de escavações originou alguns taludes que se mostram bastante instáveis. Alguns dos aterros construídos com materiais evolutivos possuem volumetrias assinaláveis.

Podemos apontar como principais problemas de geologia de engenharia ocorrentes em zonas diapíricas os seguintes:

- solos expansivos e de baixa resistência;
- doleritos muito evolutivos;
- margas sensíveis à acção da água;
- intensa compartimentação devido à tectónica e aos dobramentos.

A variabilidade e complexidade das condições geológicas e geotécnicas encontradas em zonas diapíricas aconselham à realização de estudos aprofundados que permitam a escolha fundamentada das soluções técnicas mais económicas e adequadas às estruturas a construir.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ESTG a autorização de publicação de elementos dos relatórios de prospecção geotécnica na área do Morro do Lena.

BIBLIOGRAFIA

- GEOCONTROLE (2001) – Estudo Geotécnico do edifício da biblioteca, da ESTG, Morro do Lena – Alto do Vieiro – Leiria.
- GEOCONTROLE (2002a) – Estudo Geotécnico do edifício da cantina, da ESTG, Morro do Lena – Alto do Vieiro – Leiria.
- GEOCONTROLE (2002b) – Reconhecimento Geotécnico Complementar do edifício D, da ESTG, Morro do Lena – Alto do Vieiro – Leiria.

- GEOCONTROLE (2003) – Estudo Geotécnico do edifício da Associação de Estudantes, da ESTG, Morro do Lena – Alto do Vieiro – Leiria.
- ISRM (1978) – Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 15, nº 3.
- ISRM (1979) – Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 141-156.
- ISRM (1985) – Suggested method for determining point load strength. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol 22.
- RODIO (2002) – Reconhecimento Geológico e Geotécnico do edifício D e edifício da cantina, da ESTG, Morro do Lena – Alto do Vieiro – Leiria.
- TEIXEIRA, C.; ZBYSZEWSKI, G., TORRE DE ASSUNÇÃO, C. & MANUPPELLA, G. (1968) – Carta Geológica de Portugal, na escala 1/50 000. Notícia explicativa da folha 23-C (Leiria). Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- VELHO, J.; AMADO, C.; QUINTELA, A. & QUINTA FERREIRA, M. (2003) – Processo de alteração química do dolerito de Belo Horizonte (Leiria). Apresentação em poster no IV Congresso Ibérico de Geoquímica, Univ. Coimbra.

ESTUDOS GEOTÉCNICOS NO *CAMPUS* DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

M. A. CHAVES ¹, J. A. RODRIGUES CARVALHO ¹, P. C. LAMAS ¹ e A. P. SILVA ¹

PALAVRAS CHAVE: estudos geotécnicos, estudo de sítios, prospecção e ensaios, fundações.

KEY WORDS: geotechnical studies, site investigation, exploration and testing, foundations.

RESUMO

Sumarizam-se os programas de prospecção e ensaios realizados durante os estudos geológico-geotécnicos para as fundações dos vários edifícios construídos no *Campus* da FCT-UNL. São referidos tipos e quantidades de trabalhos, explicando-se a metodologia faseada e sequencial seguida e que levou a diminuir custos, mantendo a fiabilidade da informação pretendida. As quantidades de trabalhos são discutidas no âmbito daquela metodologia. Por fim, anotam-se alguns aspectos técnicos suscitados pelos estudos bem como a exigência de acompanhamento e fiscalização dos trabalhos na fase de prospecção e ensaios e na fase de construção.

ABSTRACT: *Geotechnical works in the Campus of the Faculty of Sciences and Technology, New University of Lisboa*

157

The paper lists the exploration and testing programs carried out for the geological and geotechnical studies for the foundations of the several buildings constructed in the *Campus* of the FCT-UNL. The types and the quantities of works

¹ Centro de Estudos Geológicos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica.

are referred to and the methodology used, which involved different phases and a programmed sequence that enabled to cut costs and maintain the reliability of the searched information is explained. The quantities of works are discussed on the basis of that methodology. At the end some technical aspects derived from the works as well as the need for technical follow-up both during the site investigations and the construction are highlighted.

1. INTRODUÇÃO

Após ter funcionado provisoriamente nos Olivais, em Lisboa, a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL) instalou-se em definitivo na margem sul do Tejo, em 1981, criando um *Campus* universitário com 59,2 ha, na então denominada Quinta da Torre. O grande esforço de construção do conjunto de edifícios que actualmente existe, faltando apenas a futura biblioteca para encerrar o conjunto projectado, teve início em fins dos anos 80, altura em que se construíram os edifícios III (Centro de Processamento de Dados), IV (Anfiteatros Pequenos) e V (Grande Auditório), a que se seguiriam, no âmbito do Programa Prodep, já nos anos 90, os Edifícios Departamentais (Química + Eng^a do Ambiente, Matemática e Complexo Pedagógico, Eng^a Mecânica e Eng^a Industrial, Ciências da Terra e Eng^a Civil, Eng^a Electrotécnica), e ainda o Centro de Informática e Tecnologias de Informação (CITI) e o Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT).

Para todos os edifícios construídos na década de 90, foram realizados estudos geológico-geotécnicos, conduzidos pelo Grupo de disciplinas de Geologia de Engenharia. Idênticos estudos foram, ainda, realizados para edifícios cuja construção não se concretizou (Administração Central) ou que constituem interfaces com a FCT (Centro de Diversificação Curricular-UNINOVA, e Centro de Excelência para o Ambiente). A construção de todos estes edifícios decorreu entre 1992 (início do primeiro edifício departamental) e 2001 (conclusão do edifício de Eng^a Electro-técnica).

A programação dos trabalhos, dirigida especialmente no sentido de definir a aptidão dos terrenos para fundações, foi sendo ajustada na dependência da informação acumulada durante o desenrolar dos sucessivos estudos para os diversos edifícios. Este estudo faseado e sequencial, conduziu a uma metodologia de investigação particular.

Neste artigo resumem-se, os tipos e quantidades de trabalhos realizados nos diferentes sítios investigados explicando-se a metodologia faseada e sequencial seguida, que levou a diminuir custos mantendo a fiabilidade da informação pretendida. São abordados aspectos técnicos revelados pelos estudos e anota-se a exigência de acompanhamento e fiscalização dos trabalhos na fase de estudo e na fase de construção.

Como elementos de trabalho dispôs-se de uma carta geológica da zona, e da respectiva nota explicativa, à escala 1:2 000 (ANTUNES, M. Telles *et al.*, 1979*), e da planta de localização das obras à mesma escala e à escala 1:1 000.

2. LOCALIZAÇÃO DO CAMPUS E GEOLOGIA

O *Campus* da FCT-UNL (*Campus* da Caparica) ocupa, na Margem Sul do Tejo, frente a Lisboa, uma faixa de 59,2 ha, segundo direcção N-S, entre o cabeço do Castelo Picão e as proximidades do IC 20 – via rápida da Caparica (fig. 1). No *Campus*, discriminam-se três áreas: o Núcleo Central (a área inicial do *Campus*), com 16,4 ha e outras duas, o Núcleo Norte e o Núcleo Sul, respectivamente com 25,3 ha e 17,5 ha, acrescentadas posteriormente.

O *Campus* da FCT-UNL situa-se no reverso da costeira que forma parte da Margem Sul do Tejo, frente a Lisboa, no segmento geomorfológico entre a Ponte sobre o Tejo e a Trafaria. O modelado em degraus que caracteriza a escarpa deve-se à natureza dos terrenos que a constituem: bancadas alternantes arenosas, silto-argilosas e carbonatadas. Salvo perturbação local causada pela presença de acidentes tectónicos, as bancadas apresentam atitude bastante regular com direcção ENE-WSW inclinando, em geral, 6° a 8° para SSE.

No *Campus* e área envolvente, ocorrem terrenos do Miocénico médio e superior correspondentes às divisões de COTTER, V-c (Calcários com *Anomia Choffati* da Quinta das Conchas), VI-a (Argilas Azuis de Xabregas), VI-b (Grés de Grilos), VI-c (Calcário de Marvila) e VII-a + VII-b (respectivamente, Areolas de Braço de Prata e Areolas de Cabo Ruivo). Localmente, estão recobertos por solos plistocénicos e modernos. Na figura 2 estão indicados os limites entre os terrenos aflorantes no *Campus* (Núcleo Central).

Os sítios estudados localizam-se no Núcleo Central do *Campus*, com topografia suave, entre as cotas (89.00) e (102.00), inclinando 1° a 3° para nordeste.

Os testemunhos das sondagens não permitiram verificar, com segurança, a presença da sequência completa que, previsivelmente até às profundidades investigadas, poderia ser constituída, de cima para baixo, por: “Areolas”, Calcário de Marvila, Grés de Grilos, Argilas Azuis de Xabregas e, eventualmente, Calcário da Quinta das Conchas que poderá ocorrer na área de implantação do edifício CITI, referido em 3.3., onde, sob a argila se detectou um terreno rijo não amostrável com o ensaio de penetração dinâmica normalizado, SPT. A sequência que deve representar o Calcário de Marvila e o Grés de Grilos corresponderá às camadas descontínuas, irregulares e em regra pouco espessas, de solos siltosos carbonatados

* Actualização da cartografia de Lisboa, Estudo geológico da área de implantação das futuras instalações da Universidade Nova de Lisboa (Monte de Caparica), CEEPUL (Centro de Estudos de Estratigrafia e Paleobiologia, Universidade Nova de Lisboa).

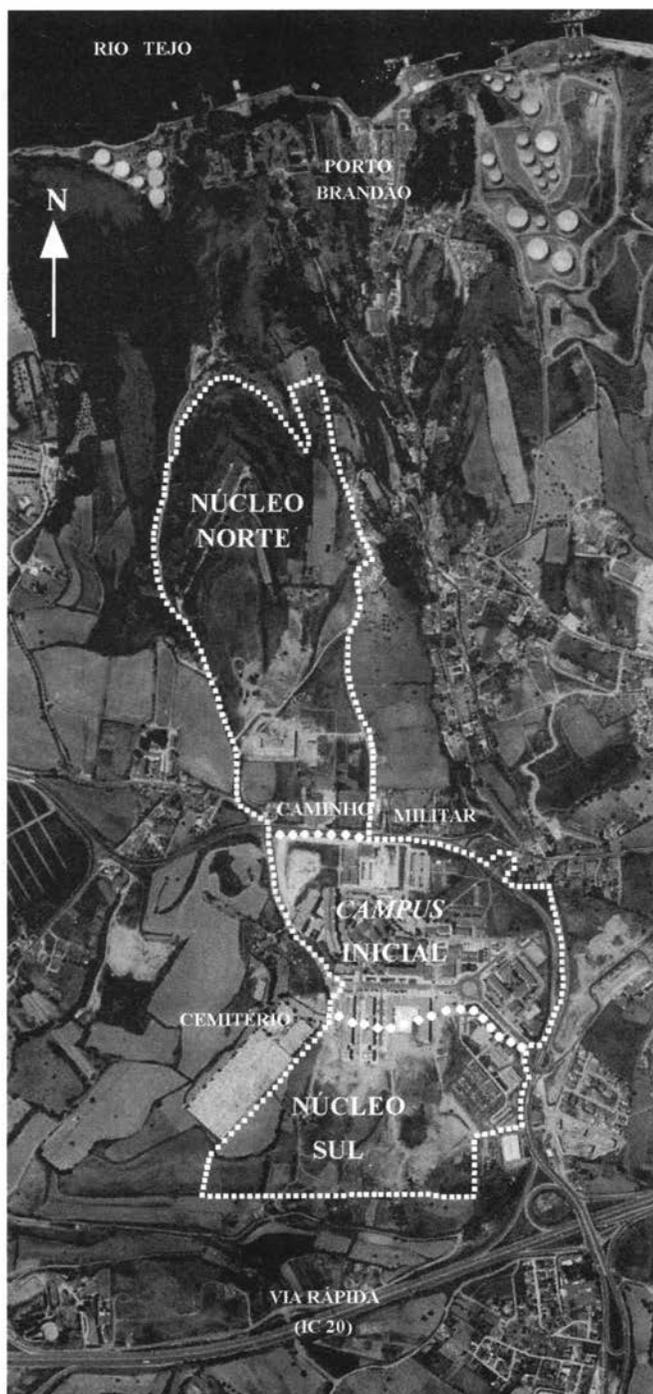
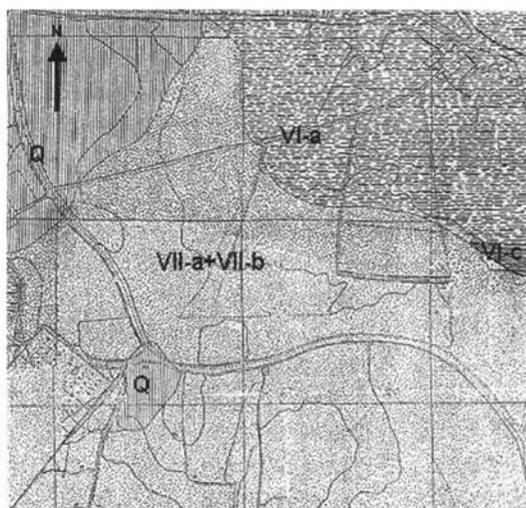


Fig. 1 – Localização do Campus (escala aproximada 1:15 000).



Legenda

Q
Plistocénico e Moderno

VII-a + VII-b
Areolas de Braço de Prata
e de Cabo Ruivo

VI-c
Calcário de Marvila

VI-a
Argilas Azuis de Xabregas

Escala aproximada 1:6 000

Fig. 2 – Geologia do *Campus* (Núcleo Central).

com fósseis, amarelo-acinzentados, sobrejacentes, na maior parte dos casos, à camada também irregular e descontínua de solos siltosos com argila, acinzentados, que por sua vez assenta em solos silto-arenosos, entre as quais não se observam horizontes de separação. As bancadas de “Areolas” e de Argilas de Xabregas situadas, respectivamente, superior e inferiormente à sequência descrita, estão bem definidas.

O nível de água acompanha frequentemente o topo da bancada de “Argila de Xabregas”, subindo em algumas zonas para o nível superior, arenoso, atingindo nalguns locais os siltes acinzentados com passagens argilosas; aprofunda, para sul, com a inclinação geral das bancadas.

3. ESTUDOS REALIZADOS

3.1. ESTUDOS PRELIMINARES

O primeiro estudo na área do *Campus* incidiu na zona leste e foi realizado em 1977-78. Deste estudo preliminar, que constou de reconhecimento geológico de superfície e execução de sondagens com trado manual (11) e com penetrómetro dinâmico ligeiro, PDL (11), ressalta a recomendação de evitar “qualquer tipo de construção na zona de mais baixas cotas, no canto nordeste” onde se situam as cabeceiras de uma linha de água que segue para norte, e a indicação de que, na restante área, os terrenos têm aptidão para fundações superficiais.

Em fins dos anos 80, foram construídos os edifícios III (Centro de Processamento de Dados), IV (Anfiteatros Pequenos) e V (Grande Auditório) em locais que, aparentemente, não foram alvo de estudos geológico-geotécnicos.

Posteriormente, antes de estar definido o plano de pormenor do *Campus*, foram realizados alguns estudos geológico-geotécnicos de sítios em áreas que se previa ocupar por construções, o que não viria a acontecer.

Em Outubro de 1989, portanto anteriormente à intervenção dos autores nos diversos estudos geotécnicos que se viriam a realizar a partir de 1991, foi executado um estudo, que constou de 9 sondagens acompanhadas de ensaios SPT, em área que só parcialmente viria a ser ocupada pelo então designado Edifício Departamental (Química e Ambiente). Em Junho e Julho de 1991, foram realizados trabalhos de prospecção no local entre os actuais campos de ténis e de futebol (3 sondagens e ensaios SPT), num local que abrangeu o terreno agora ocupado pela Caixa Geral de Depósitos e Livraria Barata, então previsto para o edifício de Administração Central (4 sondagens e ensaios SPT), e na faixa nordeste do Núcleo Sul, na bordadura da estrada de acesso ao cemitério, a ocupar pelo UNINOVA (4 sondagens, relativamente afastadas, e ensaios SPT).

3.2. ESTUDOS EM ÁREAS DE IMPLANTAÇÃO DE EDIFÍCIOS

Após definição do Plano de Pormenor do *Campus*, foi realizado, com início em 1992, o estudo faseado dos locais dos edifícios previstos naquele.

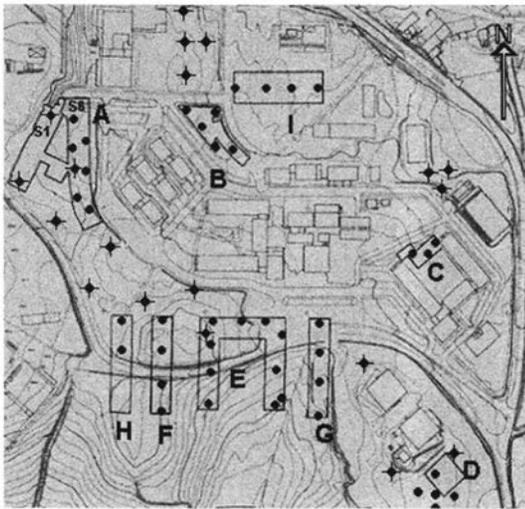
A elaboração dos programas de prospecção e ensaios, para cada local, teve em consideração as características dos edifícios, a nível de ante-projecto, designadamente o respeitante a fundações e respectivas tensões.

Para cada sítio, foi realizada análise de informação já existente, seguida de reconhecimento geológico de pormenor da zona, após o que se definiram os locais a investigar através de prospecção mecânica.

O programa de prospecção e ensaios iniciou-se com a execução de uma ou mais valas de prospecção que, possibilitaram a observação directa dos terrenos e recolha de amostras, nalguns casos indeformadas e, esporadicamente, a execução de ensaios de corte rotativo com o *vane-test* manual. A investigação subsequente constou de sondagens (fig. 3) com trados ocos (Mobile Drill B47), com SPT's, em regra, iniciados a 1 m de profundidade e espaçados, também, de 1 m.

Em todas as sondagens, foram recolhidas as amostras obtidas nos SPT's, bem como as amostras remexidas "vindas à boca" entre cada 2 ensaios consecutivos. Pontualmente, foram recolhidas amostras indeformadas com amostrador Shelby.

Nalguns locais, onde se detectaram vales preenchidos com materiais deslocados, de baixa resistência, a geometria dos mesmos foi definida através de sondagens com PDL. Foram, ainda, anotados os níveis de água e as suas posições após estabilização nos furos.



Legenda

Sondagens de estudos para:

- edifícios construídos
- ◆ projectos abandonados

Edifícios:

- A - Departamental
- B - Excelência
- C - CITI
- D - Materiais
- E - Matemática
- F - Mecânica e Industrial
- G - Electrotecnia
- H - C. da Terra e Eng^o Civil
- I - Biblioteca

Escala aproximada 1:6 000

Fig. 3 – Localização das sondagens.

Algumas das amostras recolhidas foram submetidas a ensaios de identificação, e determinação de características físicas que permitem inferir o comportamento mecânico dos terrenos. Nalguns casos, justificados pelas características macroscópicas, determinou-se a percentagem de matéria orgânica.

Salienta-se que os sucessivos planos de estudo de sítios objecto de estudo foram sendo adaptados em função do acervo de conhecimentos acumulados durante o desenrolar dos trabalhos, no tempo e no espaço.

A informação geológica sobre a área do *Campus*, já atrás referida, foi também importante no desenvolver dos diferentes planos de prospecção, já que forneceu suporte fiável para interpretar e correlacionar os resultados que se foram obtendo na sequência dos diferentes estudos.

3.3. CARACTERÍSTICAS PARTICULARES RELATIVAS A CADA SÍTIO (LOCAL DE EDIFICAÇÃO)

Face aos objectivos deste trabalho, dos estudos para cada edifício apenas se transcrevem a localização, área de implantação, quantidades de trabalho relativas a sondagens e ensaios *in situ*, e os tipos de ensaios em laboratório realizados.

Edifício Departamental (Química e Ambiente) (1ª e 2ª fases do edifício)

A área de implantação da 1ª fase de construção do Edifício (2/3 da sua extensão), abrangeu unicamente 2 dos 9 locais de sondagem no estudo de 1989, mencionado em 3.1.

A coerência dos resultados das sondagens então realizadas na zona, indicadores de boa qualidade dos terrenos, levou a prescindir de estudos subsequentes.

Em Março de 1992, foi retomada a investigação na área de implantação do edifício, mas apenas na destinada à 2ª fase de construção, onde fora já executada 1 das sondagens realizadas em 1989. O programa de prospecção constou de 6 sondagens (69,1 m de furação) acompanhadas de 47 ensaios SPT.

A comparação dos resultados obtidos nos estudos de 1989 e de 1992, mostrou diferenças expressivas. Os valores dos SPT's obtidos em 1992 foram substancialmente inferiores aos do estudo seguinte. Durante o saneamento e regularização do local para início da obra, em 1992, a simples observação visual e táctil dos terrenos evidenciou que as suas características eram incompatíveis com os resultados do primeiro estudo. Assumiu-se que os valores determinados no segundo daqueles estudos eram fiáveis, tanto pela execução, já que se usou equipamento normalizado, como por reflectirem as condições mais desfavoráveis similares às encontradas nos estudos preliminares de locais investigados anteriormente (*vide 3.1.*) pelo que, as características obtidas nesta fase foram adoptadas para a área total de implantação e transmitidas ao projectista para reavaliação do projecto de fundações.

A fiscalização das escavações teve também subjacente o conhecimento dos terrenos adquirido nos estudos de outros locais, já realizados em 1991 (*vide 3.1.*).

Edifício “Centro de Excelência do Ambiente” (Julho de 1992)

Localização: cerca de 40 m para norte do Edifício I. Área: cerca de 1480 m². Prospecção e ensaios *in situ*: 5 sondagens com um total de 46,25 m de furação e 44 ensaios SPT's.

Edifício “Materiais” (CENIMAT) (Julho de 1993)

Localização: cerca de 250 m a SW do Edifício I e cerca de 25 m a Sul do Centro de Diversificação Curricular. Área: cerca de 900 m². Prospecção e ensaios *in situ*: 1 vala, 5 sondagens, com profundidades entre 6 m e 8,5 m (total de 37,0 m de furação), 35 SPT's e 4 PDL's. Amostragem e ensaios em laboratório: amostras indeformadas (2), na vala, para ensaios de corte consolidado não drenado, identificação, peso específico das partículas sólidas, pesos específicos aparente e saturado e teor de água; ainda 13 das amostras dos SPT para ensaios de identificação.

Edifício “Matemática e Complexo Pedagógico”(Novembro de 1993)

Localização: em frente e 30 m para sul do Edifício I. Área: cerca de 4320 m². Prospecção e ensaios *in situ*: 1 vala, 10 sondagens no total de 106,37 m de furação, 34 SPT. Amostragem e ensaios em laboratório: amostras indeformadas a 4 profundidades, na vala, para determinação de características físicas e, em duas delas, características mecânicas em ensaios de corte consolidado não drenado; ainda 2 amostras do SPT para ensaios de identificação e determinação de características

físicas (peso específico das partículas sólidas, pesos específicos aparente e saturado e teor de água).

Edifício “Ciências da Terra e Engenharia Civil” (Novembro de 1993)

Localização: cerca de 85 m a SW do Edifício I. Área: cerca de 1 820 m². A investigação incidiu apenas na metade norte do terreno devido ao então proprietário do terreno não ter permitido o acesso à área sul.

Prospecção e ensaios *in situ*: 1 vala, programadas 4 sondagens, das quais, pelo motivo apontado, foram realizadas apenas 2, num total de 20,60 m de furação e 18 SPT's. Amostragem e ensaios em laboratório: 8 amostras, para identificação, colhidas com amostrador SPT e na vala.

Edifício “Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção Industrial” (Novembro de 1993)

Localização: cerca de 50 m para SW do Edifício I. Área: cerca de 1860 m². Prospecção e ensaios *in situ*: 1 vala, 4 sondagens, num total de 39,56 m de furação e 34 SPT's. Amostragem e ensaios em laboratório: ensaios de identificação em 10 amostras de SPT e determinação do peso específico das partículas sólidas, pesos específicos aparente e saturado e teor de água em 2 amostras (da vala).

Edifício “Biblioteca” (Dezembro de 1993)

Localização: cerca de 90 metros a Norte do Edifício I. Área: cerca de 2 550 m². A área a edificar situa-se numa zona agora aplanada, correspondente a um vale bastante amplo, preenchido com materiais de aterro. O perfil do vale, relativo a uma linha de água, com direcção provável SW-NE, interpreta-se pela presença de argila magra e silte com matéria orgânica, aparentemente colúvio-aluvionares (taludes) e de silte com seixo, aluvionares (fundo).

Prospecção e ensaios *in situ*: 4 sondagens, com um total de 47,8 m de furação, 46 SPT's, e ainda 6 PDL's executados para definição da geometria daquele vale. Ensaios de identificação em 11 amostras de SPT e determinação do peso específico das partículas sólidas, pesos específicos aparente e saturado e teor de água em 4.

Edifício “Centro de Inteligência Artificial” (CITI) (Dezembro de 1993)

Localização: construído para ampliar o Edifício II, corresponde à sua ala NW. Área: cerca de 485 m². Prospecção e ensaios *in situ*: 3 sondagens com comprimentos entre 6,5 m e 8,5 m, que totalizaram 23,25 m de furação, 20 SPT's e 4 PDL's. Amostragem e ensaios em laboratório: determinado o teor em água de amostras representativas de 4 profundidades.

Edifício “Engenharia Electrotécnica” (Janeiro de 1994)

Localização: cerca de 45 metros a Sul do Edifício I. Área: cerca de 1 880 m².

Situa-se junto à cabeceira, e na vertente esquerda, de um pequeno vale com orientação NNE-SSW. Prospecção e ensaios *in situ*: 1 vala, 4 sondagens com um total de 38,35 m e 37 SPT's. Amostragem e ensaios em laboratório: das amostras dos SPT's e da vala seleccionaram-se 8 para identificação e 1 para determinação do teor de água e peso específico das partículas sólidas.

4. ALGUNS ASPECTOS DA METODOLOGIA SEGUIDA

4.1. QUANTIDADES DE TRABALHOS

A análise da metodologia seguida na programação faseada para os diversos sítios dos edifícios conduz a relações, no que respeita ao número de sondagens realizadas vs. área investigada, que se afastam de algumas propostas orientadoras. Por exemplo, afastam-se nitidamente das indicadas na Norma Brasileira NBR 8036 de Junho de 1983. Consta-se, ainda, que as relações adoptadas no decorrer dos diferentes estudos do *Campus* não se ajustam a um modelo único. Como se pode observar na figura 4 o número de sondagens adoptado foi sempre inferior ao sugerido na NBR, diminuindo significativamente numa 2ª fase de estudo e discriminam-se duas relações, divergentes entre si, uma referente aos 4 estudos realizados primeiramente, 1ª fase e outra, inferior a esta, correspondente aos estudos subsequentes, 2ª fase.

A metodologia seguida quanto ao número de sondagens (e demais trabalhos), resulta do conhecimento detalhado prévio da geologia das áreas a edificar e da zona envolvente acrescida da informação obtida nos estudos preliminares de locais, entretanto abandonados. Assim, nos primeiros estudos, apesar da malha de investigação ser larga relativamente ao habitual, mas porque se contou com pormenorizado conhecimento geológico disponível, foi possível definir a geometria dos terrenos em cada local e estabelecer correlações entre locais.

Para estabelecer estas correlações, foram efectuados ensaios de identificação para garantir confiança na classificação visual e táctil utilizada nessas mesmas correlações. Obtiveram-se, ainda, através de ensaios laboratoriais, valores para características mecânicas dos solos que se usaram, também, na aferição de valores estimados a partir dos resultados dos ensaios *in situ* ($N_{(SPT)}$).

A concordância dos resultados nos primeiros locais estudados, 1ª fase, legitimou alargar a malha de pontos de investigação nos estudos subsequentes num propósito de, mantendo a fiabilidade das conclusões dos estudos, reduzir custos.

(Nota: para o Edifício de Ciências da Terra e Engª Civil considerou-se o número de sondagens programado para a área total).

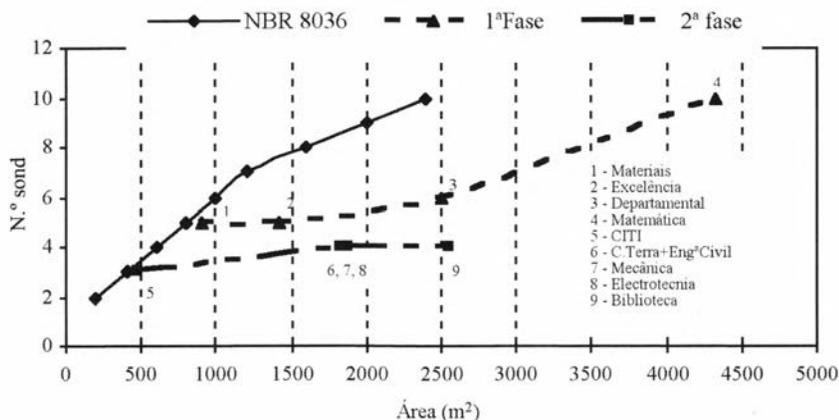


Fig. 4 – Número de sondagens vs. área investigada.

4.2. PORMENORIZAÇÃO DA GEOLOGIA LOCAL

Na correlação litológica entre sondagens verificaram-se algumas dificuldades. Por um lado a amostragem fiável era apenas de testemunhos obtidos com SPT. Por outro lado, a composição dos solos siltosos varia, quanto ao teor de argila, lateral e verticalmente, chegando a conferir ao solo, localmente, a classificação de argila. Acresce ainda, a má definição das camadas de Grés de Grilos e de Calcários de Marvila. Isto levou a que, dentro do possível, se usasse a Argila de Xabregas como camada guia. Foi possível, contudo, à medida que os estudos decorriam, estender a correlação aos locais estudados o que permitiu alargar o conhecimento geológico a aspectos particulares, nomeadamente no que se refere a interpretação de falhas e variações de fácies.

4.3. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE OS VALORES DOS SPT'S NO ESTUDO PARA O EDIFÍCIO "QUÍMICA E AMBIENTE"

No estudo de 1989 para o 1º edifício Departamental, obtiveram-se SPT's elevados a 3,0 m de profundidade ($N_{(SPT)} > 30$, salvo num local onde $N_{(SPT)} = 22$). Abaixo desta profundidade, na maioria dos casos o valor de $N_{(SPT)}$ foi igual ou próximo de 60. No estudo de 1992 os valores de $N_{(SPT)}$ foram substancialmente inferiores; em regra, $N_{(SPT)} < 30$ e, só pontualmente, se atingiram 60 pancadas, possivelmente devido a ocorrência de fósseis ou carbonatos.

Ainda que tenha sido verificado que o amostrador SPT usado no primeiro daqueles estudos apresentava o bordo deformado, a majoração dos valores de $N_{(SPT)}$

não parece dever-se exclusivamente ao equipamento. Também, não era admissível atribuir a degradação dos terrenos ao tempo diferido entre os dois estudos; porém as diferenças entre as épocas do ano em que se realizaram poderiam ter tido alguma influência. Considerando os valores acumulados da pluviosidade relativa aos 3 e 6 meses que antecederam os dois estudos, verificam-se, respectivamente, valores de 98,8 mm e 137,4 mm antes de Novembro de 1989 e de 133,8 mm e 273,1 mm antes de Março de 1992.

Por outro lado, o estudo de 1989 não menciona a presença de níveis de água que, em 1992 foram detectados entre 6,3 m e 8,8 m de profundidade.

Sondagens do 1º estudo (S1) e do 2º (S6), distantes aproximadamente 25 m segundo W-E, mostrando sequências litológicas equivalentes contrastam, fundamentalmente, pela ausência de nível de água e valores de SPT mais elevados na primeira, e presença de água e valores de SPT baixos na segunda.

Verifica-se outra situação singular, quanto aos SPT's, na faixa de terrenos que abrange a área do edifício de Engª Mecânica e Engª Industrial e a ala poente do edifício de Matemática e Complexo Pedagógico. Os ensaios SPT aqui realizados conduziram a valores elevados, muito frequentemente $N_{(SPT)} = 60$, muito superiores aos que se determinaram nas zonas envolventes: ala leste do edifício de Matemática e Complexo Pedagógico, edifício de Engª Electrotécnica (para nascente) e edifício de Ciências da Terra e Engenharia Civil (para poente).

Os valores mais baixos de $N_{(SPT)}$ parecem reflectir o efeito de tectonização que se interpreta através de falhas verificadas por rejeitos evidentes na camada guia (Argila de Xabregas), especialmente na zona leste onde os vales estão instalados segundo falhas identificadas, e por modificação da atitude das camadas. Não se podem atribuir as variações de resistência aos factores equipamento, pluviosidade e variações sazonais de teor em água, pois os estudos realizaram-se em Outubro (Matemática) e Novembro de 1993 (Mecânica e Ciências da Terra), utilizaram-se procedimentos e equipamentos normalizados e em perfeitas condições, e a pluviosidade não variou significativamente durante o período em que se realizaram os estudos.

5. FISCALIZAÇÃO

As escavações para as fundações, foram sistematicamente verificadas.

Constatou-se que a previsão sobre a qualidade dos terrenos, em regra foi correcta, tendo porém ocorrido algumas situações singulares merecedoras de realce. Uma delas, que manifesta a importância do acompanhamento em fase de obra, refere-se ao 1º Edifício Departamental, atrás descrita (vide 3.2.). Houve, ainda, que proceder a pequenos ajustes relativamente a saneamento e à profundidade de escavação, localmente, em situações relacionadas com a presença de vales "fósseis".

Os vales detectados, através da prospecção, no bordo sudeste dos edifícios departamentais de Matemática e Complexo Pedagógico (ala leste) e de Eng^a Electrotécnica mereceram acompanhamento especial.

A obra da nova Biblioteca, a construir em breve, terá de merecer também a inspecção cuidadosa das escavações, particularmente se for adoptada a solução de construir uma cave aproveitando o saneamento dos terrenos de aterro e aluvio-coluvionares; a geometria do vale que cruza a área de implantação do edifício, não está suficientemente definida em toda a sua extensão.

6. CONCLUSÕES

Da análise dos trabalhos realizados retiram-se alguns aspectos relevantes:

- os primeiros estudos, preliminares, conduziram à eliminação de áreas para edificação, por os terrenos ocorrentes não oferecerem segurança para a construção de fundações directas e pelo impacte ambiental resultante da obliteração de cabeceiras de linha de água;
- o acervo de conhecimentos adquiridos durante estudos faseados, em áreas amplas, e a sua correlação, permitiu elaborar programas de estudo sucessivamente menos densos, logo menos onerosos, mantendo a qualidade dos resultados;
- as correlações entre resultados obtidos nos vários sítios assentou em parâmetros bem definidos e adequados para a fiabilidade das mesmas;
- as diferenças entre os resultados obtidos de local para local, onde os trabalhos de prospecção foram acompanhados e fiscalizados, evidenciaram a necessidade de, em fase de obra, proceder ao controlo da qualidade dos terrenos ocorrentes até à cota de fundação levando a sublinhar que acompanhamento e fiscalização são exigidos tanto para os trabalhos de prospecção como em fase de obra;
- a existência de vales “fósseis”, cuja geometria não se define com rigor, destacadamente no caso do edifício da Biblioteca em que foi recomendada a execução de fundações indirectas ou equacionar a construção de uma cave que aproveitasse a escavação devida ao saneamento dos terrenos, exige, em fase de obra, acompanhamento e fiscalização permanentes para definir com rigor o saneamento a efectuar, tanto dos terrenos aluvionares como de eventuais aterros e, ainda, dos terrenos naturais *in situ*, infra-jacentes, cuja qualidade pode estar afectada; a fiscalização tomou uma feição primordial nos dois casos em que se verificaram variações laterais da resistência à cravação dinâmica e em que, num deles, não foi possível aduzir razões justificativas para tal.

PLANTA GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE ALQUEVA

J. NEVES¹, F. FERREIRA² e L. GONÇALVES³

PALAVRAS CHAVE: Alqueva, fundação da barragem, planta geológica-geotécnica.

KEY WORDS: Alqueva, dam foundation, geological-geotechnical map.

RESUMO

É efectuado um breve enquadramento que inclui um resumo das características geológicas da região onde se insere a barragem de Alqueva e uma síntese das principais características geológicas e geotécnicas do local da barragem, efectuada a partir da informação obtida no decurso dos levantamentos geológicos, ensaios "in situ" e laboratoriais, realizados durante a fase de Projecto. Na margem esquerda, a fundação é constituída por filitos medianamente alterados, muito fracturados e cortados por numerosas falhas. Na margem direita e fundo do vale ocorrem rochas metavulcânicas básicas (xistos verdes), geralmente pouco alteradas e pouco fracturadas, intersectadas por algumas falhas. A caracterização geológica-geotécnica efectuada durante a fase de construção da barragem permitiu verificar a adequabilidade das características mecânicas da fundação às estruturas a construir e forneceu a informação de base para a elaboração do projecto de elementos de reforço na fundação e, ainda, para o projecto de tratamento das fundações através de injeções de calda de cimento.

¹ Geólogo – EDP Produção EM, Engenharia e Manutenção, S.A., jorge.neves@em.edpproducao.edp.pt

² Eng.º Geólogo – fferreira@hidroprojecto.pt

³ Geólogo – luisgoncalves@det.uminho.pt

ABSTRACT: Alqueva Dam Foundation Geological and Geotechnical Map

This paper includes a brief description of the regional geological setting of the Alqueva dam site and a synthesis of the main geological and geotechnical characteristics of Alqueva's dam site, based on the data obtained from field observations, geological mapping and "in situ" and laboratory tests, performed during the dam's design phase. The left embankment of the dam's foundation is constituted by altered and fractured phyllites, intersected by numerous faults. At the right embankment and valley bottom occur slightly altered mafic metavolcanic rocks (greenschists), intersected by some faults. The geological and geotechnical mapping of the dam's foundation gave the basic elements that allowed the verification of its adequateness to the dam's design and also for the design of foundation superficial reinforcement elements and for the dam's foundation treatment by grouting design.

1. INTRODUÇÃO

O local da barragem de Alqueva situa-se no rio Guadiana, no Sudeste Alentejano, a cerca de 7 km para NW de Moura e de 38 km para NE de Beja (distâncias medidas em linha recta).

A barragem de Alqueva é uma abóbada de dupla curvatura, em betão, com desenvolvimento no coroamento de 458 m e altura máxima de 96,00 m acima da fundação, 2 descarregadores de superfície em canal, 2 descarregadores de meio-fundo constituídos por orifícios que atravessam a abóbada, e uma descarga de fundo, instalada na antiga galeria de derivação provisória; a central é do tipo pé de barragem e encontra-se equipada com 2 grupos reversíveis com potência máxima no eixo da turbina de 120 MW por grupo [1].

A Planta geológica-geotécnica da Fundação da Barragem do Alqueva, em anexo no final do texto, constitui uma síntese dos elementos geológicos e geotécnicos resultantes da cartografia das superfícies escavadas da fundação da barragem e da central hidroelétrica, obtidos no decurso dos levantamentos efectuados entre 1996 e 2002, pela HIDRORUMO, S.A. e, posteriormente, pela EDP Produção EM, S.A., no âmbito da sua prestação de serviços à EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A.

2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

A região de Alqueva situa-se na Zona de Ossa-Morena, no domínio dos Maciços de Évora e Beja, sector de Montemor-Ficalho e do Maciço de Beja.

Este domínio apresenta diversos maciços intrusivos Hercínicos, predominantemente ácidos no maciço de Évora e básicos, no de Beja, os quais são considerados, no geral, de idade Carbonífera.

As sequências sedimentares e vulcano-sedimentares encaixantes, cuja idade ainda suscita algumas dúvidas, em face da ausência de evidências paleontológicas, tem levado vários autores a proporem diversas colunas estratigráficas para esta região, baseadas em correlações com outros sectores onde existe informação paleontológica.

A barragem de Alqueva insere-se num troço do rio Guadiana com direcção N32°W, escavado ao longo de falhas com direcção N45°-55°W e diaclases, cuja atitude favorece o processo de erosão remontante [2]. O vale é largo, embora encaixado, com margens abruptas e fundo achatado.

No local da barragem afloram duas unidades geológicas [2], atribuídas ao Ordovícico superior – Silúrico inferior [3], de características geológicas e geotécnicas muito distintas: na margem esquerda, *filitos* sericítico-clorítico-siliciosos e, na margem direita e fundo do vale, a unidade designada por *xistos verdes*, que correspondem a rochas metavulcânicas básicas.

A deformação Hercínica é característica do andar estrutural inferior, com 3 fases de deformação dúctil e, pelo menos, uma fase tardi-Hercínica com características frágeis. Ao longo deste sector, e para SW, torna-se progressivamente evidente uma fase de deformação precoce relacionada com a instalação do Complexo Ofiolítico de Beja-Acebuches, à qual se associa um evento metamórfico de alta pressão [4].

A maior parte das estruturas geológicas observadas no local da barragem foram produzidas pela orogenia Hercínica, durante o Carbónico, admitindo-se a reactivação Alpina de algumas das falhas existentes. As principais dobras são isoclinais e apresentam plano axial com atitude média NW-SE, 33°NE, flancos com inclinação 12°-55°NE e eixo que mergulha 30°-35° para NW [2]. A xistosidade, que materializa o plano axial destas dobras, tem atitude N40°-60°W, 15°-50°NE. As famílias de fracturas (falhas e diaclases) mais frequentes apresentam as seguintes atitudes (adaptado de [2]): **A-** N40°-65°W, 12°-65°NE; **B-** N75°W-S75°W, 65°N-90°-55°S; **C-** N65°-90°W, 12°-55°NNE; **D-** N20°-42°W, 65°-90°ENE; **E-** N25°-55°E, 65°SE-90°.

As falhas são numerosas, particularmente na margem esquerda e apresentam, de um modo geral, um preenchimento constituído por milonite argilosa, acompanhadas de fracturação mais ou menos intensa das zonas adjacentes.

Durante a fase de Projecto, o maciço rochoso de fundação da barragem e central de Alqueva foi intensamente estudado do ponto de vista geológico e geotécnico, podendo-se destacar as várias campanhas de sondagens com recuperação de testemunhos (cerca de 3750 m de furação), acompanhadas, na sua maioria, por ensaios Lugeon (460 ensaios), a prospecção geofísica (refracção e tomografia

sísmicas, resistividade eléctrica aparente), os ensaios “in situ” para a determinação da deformabilidade do maciço rochoso (MNP, LFJ e BHD) e os numerosos ensaios laboratoriais sobre provetes de rocha para caracterização da sua anisotropia e resistência ao corte (UCS, E, v , ϕ e c).

Estes trabalhos permitiram a elaboração de um zonamento do maciço rochoso de fundação da barragem [2] (Quadro I), sendo de destacar a considerável diferença entre os módulos de deformabilidade das duas unidades geológicas.

Com base nos ensaios de deslizamento de diaclases realizados, o LNEC [5] determinou os valores médios da coesão e ângulo de atrito, que são reproduzidos no Quadro II, destacando-se a geralmente mais baixa coesão e ângulos de atrito das diaclases no filito.

O conhecimento pormenorizado das características geológicas e geotécnicas do maciço rochoso, permitiu indicar a Zona III, situada a maior profundidade e de melhor qualidade geotécnica, como sendo a mais adequada para a fundação da barragem de Alqueva [2].

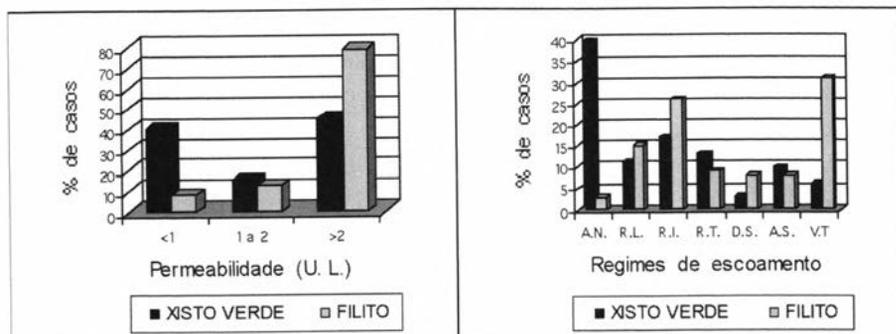
Os ensaios de absorção de água de tipo Lugeon realizados, permitiram caracterizar o maciço rochoso no que respeita à sua permeabilidade e identificar os regimes de escoamento predominantes [6]. Os resultados obtidos reflectem a diferente natureza das formações geológicas que ocorrem na fundação da barragem e central ou, ainda, a presença de zonas de falha ou zonas mais fracturadas.

Quadro I – Zonamento geotécnico do maciço rochoso (adaptado de [2]).

Rochas dominantes	Margem esquerda			Fundo do vale e margem direita		
	Filitos			Xistos verdes		
Zona geotécnica	I	II	III	I	II	III
Alteração	W4-W3	W2	W2-W1	W3-W2	W2-W1	W1
Fracturação	F4-F3	F3-F2	F2-F1	F3-F2	F2-F1	F1
Permeabilidade (Unidades Lugeon)	>10	>10	1-10 (por vezes >10)	>10	>10	1-10 (por vezes >10)
V_L (m/s)	<2000	2300-3200	>3500	1450-2300	3600-4500	>4800
E (GPa)	E_{din}	<6,5	12,0-24,0	>28,5	4,9-12,3	29,0-47,0
	E_{est}	<2,0	4,3-11,0	>13	0,5-4,3	10,0-42,0
						>49,0

Quadro II – Valores médios da coesão e ângulo de atrito das diaclases ensaiadas no xisto verde e no filito (adaptado de [5]).

Tipo litológico	Diaclases	c (Kgf/cm ²)	ϕ (°)
Xisto verde	Segundo a xistosidade	1,0	24
	Fazendo um ângulo inferior a 15° com a xistosidade	1,7	38
	Fazendo um ângulo maior que 15° com a xistosidade	1,8	43
Filito	Segundo a xistosidade	1,1	22
	Subverticais e subhorizontais	1,3	29
	Com inclinação entre subvertical e subhorizontal	1,3	36



A.N. – Absorção Nula; R.L. – Regime Laminar; R.I. – Regime Intermédio; R.T. – Regime Turbulento;
 D.S. – Diminuição da Secção; A.S. – Aumento da Secção; V.T. – Vazão Total..

Fig. 1 – Valores da permeabilidade e regimes de escoamento obtidos nos ensaios realizados nas sondagens seleccionadas (adaptado de [6]).

De acordo com a análise sobre um conjunto de ensaios Lugeon, em sondagens cujo posicionamento foi considerado mais representativo da fundação da barragem, foi obtida a distribuição dos valores da permeabilidade e dos regimes de escoamento apresentada na figura 1.

Deve-se assinalar que a caracterização efectuada em [6] é anterior à execução do tratamento das fundações, pelo que, presentemente, e após o mesmo, será de esperar ter-se produzido uma alteração significativa das condições hidráulicas do maciço rochoso.

3. CARTOGRAFIA GEOLÓGICA E GEOTÉCNICA DA FUNDAÇÃO

Os *filitos* que ocorrem na margem esquerda, sobrepostos à unidade dos xistos verdes, são constituídos por quartzo, clorite, sericite, albite e rara calcite [7]. Nesta margem foram também cartografadas algumas intercalações de xistos verdes com espessura métrica a decamétrica, intensamente dobradas, aspecto notório na fundação do descarregador de superfície da margem esquerda.

Apresentam xistosidade bem marcada e tendência para descomprimir com facilidade ao longo desses planos, os quais apresentam, geralmente, o aspecto acetinado (baixo atrito) da clorite e sericite, quando sãs ou pouco alteradas.

Na margem direita e fundo do vale, até ao bloco 4-5, inclusive, ocorre a unidade dos *xistos verdes*, na qual predominam as rochas basálticas metamorfizadas constituídas por albite, quartzo, epidoto, clorite, anfíbola, sericite, calcite e rara hidrogrossulária [7]. Esta unidade inclui também litologias tais como, xistos cloríticos com epidoto, epidositos e intercalações de filito que, nalguns casos,

poderão corresponder a tufitos intermédios a básicos. São muito frequentes os leitos, lâminas e lenticulas de mármore de cor esbranquiçada e, mais raramente, rósea. Os veios e filonetes de carbonatos também ocorrem com frequência, particularmente, em fracturas de direcção NNE-SSW a NE-SW.

Abaixo do contacto com os filitos e na proximidade do topo da unidade dos xistos verdes, ocorre, localmente, uma zona com 2 a 5 metros de espessura, muito alterada e com abundantes óxidos de ferro acastanhados e outros minerais de alteração de cor escura, apresentando a rocha um aspecto cavernoso e terroso. É possível que corresponda a uma zona com abundante mineralização de sulfuretos, a qual terá sido, posteriormente, alterada e lixiviada.

Com excepção dos locais onde ocorrem intercalações de xisto clorítico ou filádio, a xistosidade apresenta-se pouco marcada e subparalela à estratificação.

As falhas observadas na fundação da barragem apresentam, geralmente, preenchimento constituído por milonite argilosa com espessura variável e direcções/pendores que permitem a sua inclusão nas famílias atrás indicadas.

A *falha 22* foi identificada e caracterizada do ponto de vista geológico, nos anos 60, no decurso dos primeiros trabalhos de reconhecimento realizados neste local. Este acidente tectónico corresponde a uma *zona de falha* limitada por 2 falhas argilosas [8], que atravessa a fundação da barragem na transição do fundo do vale para a margem esquerda e se desenvolve para o interior desta margem, mergulhando para montante sob a fundação do encontro esquerdo.

Em face das fracas características mecânicas do seu preenchimento e da sua grande espessura, esta zona de falha foi objecto de um tratamento específico que consistiu na escavação e preenchimento com betão de vários níveis de galerias subhorizontais e células de alargamento, sob a abóbada e o encontro da margem esquerda.

Neste local, a *zona de falha 22* apresenta uma atitude $N70^{\circ}-80^{\circ}W$, $30^{\circ}-45^{\circ}NNE$, espessura compreendida entre 4 a 14 metros e preenchimento muito variável, constituído por argila e filito esmagado e/ou muito fracturado, cortado por falhas argilosas secundárias. As falhas argilosas que a limitam a tecto e muro foram designadas por 22D e 22C, respectivamente, e apresentam espessuras variáveis entre 0,10 m e 1,20 m.

176

Localmente, é possível observar a influência das falhas da família **D** na geometria das falhas 22D e 22C, admitindo-se que estas terão sido as últimas a movimentar-se e aproveitado o plano (mais inclinado) das primeiras como “rampas laterais”, o que poderá explicar as suas bruscas variações de atitude, acompanhada, geralmente, por idêntica variação da atitude da xistosidade.

A grande variabilidade das características geotécnicas do preenchimento desta zona de falha, poderá ser explicada, por um lado, pela maior ou menor proximidade das falhas 22C e 22D, cuja movimentação terá provocado o esmagamento e/ou

fracturação do material rochoso situado entre elas e, por outro lado, pela própria natureza do filito, o qual apresenta variações significativas nas percentagens relativas dos seus minerais constituintes.

A *falha 66*, na margem esquerda, apresenta atitude $N50^{\circ}-60^{\circ}W$, $35^{\circ}-45^{\circ}NE$ e preenchimento constituído por milonite argilosa com espessura de 0,10 m a 0,60 m. Atravessa a fundação do encontro esquerdo da barragem (bloco 1-2) e descarregador de superfície e mergulha para montante, intersectando o maciço de fundação da barragem a profundidades relativamente reduzidas.

A *falha 29*, com atitude $N15^{\circ}-25^{\circ}W$, $55^{\circ}-65^{\circ}ENE$ e preenchimento de milonite argilosa com espessura de 0,10 a 0,40m, atravessa a fundação da barragem no bloco 1-2 onde, em conjunto com a falha 66, foi objecto de um tratamento específico, o qual consistiu na execução de uma recrava de betão.

Atravessando a fundação da barragem (blocos 12-13 e 13-14) e da central, a *zona de falha 17/18* apresenta atitude $N50^{\circ}-55^{\circ}W$, $50^{\circ}-62^{\circ}NE$ e preenchimento constituído por milonite argilosa, xisto verde esmagado e, localmente, alterado e muito fracturado, com possança de 0,6 a 2,0 m.

Tal como no caso da falha 29, esta falha também foi objecto de um tratamento específico na fundação da barragem e central, o qual consistiu na execução de uma recrava em betão. Na fundação da barragem, foram ainda realizadas injeções de calda de cimento ao longo do seu plano, até uma profundidade máxima de 28,5 m.

A *falha 19* pertence à mesma família da falha 17/18, apresenta uma atitude $N60^{\circ}-65^{\circ}W$; $50^{\circ}-60^{\circ}NE$ e preenchimento constituído por milonite argilosa com possança de 0,10 a 0,50 m. A NNW da central, ramifica-se em duas falhas que atravessam a fundação do muro-barragem e descarregador de superfície da margem esquerda.

As principais famílias de diaclases apresentam as atitudes atrás indicadas, sendo de assinalar que estas apresentam diferentes características geotécnicas nos xistos verdes e no filitos.

Nos xistos verdes (margem direita e fundo do vale) são, frequentemente, extensas (> 20 m), apresentam, geralmente, espaçamentos superiores a 0,60 m e são rugosas a muito rugosas. Quando têm preenchimento, este é constituído por atapulgite ou carbonatos com espessuras, geralmente, inferiores a 10 mm. Nestas litologias e, particularmente, na fundação do encontro da margem direita, a família **E** assume elevada importância dada a grande extensão das diaclases desta família. Em contrapartida, a família **A**, subparalela à xistosidade, perde grande parte da sua expressão, pois a sua frequência diminui acentuadamente em relação à atribuída em [2], o que permite inferir que a origem de parte significativa das diaclases desta família, se ficará a dever à descompressão superficial do maciço rochoso.

Nos filitos (margem esquerda), predominam as diaclases da família **A**, subparalelas à xistosidade (diaclases de descompressão), as quais são, geralmente,

pouco extensas (< 10 m), apresentam pequenos espaçamentos (< 0,20 m), aberturas de 2-3 mm e são lisas a pouco rugosas. Quando as paredes das diáclases se encontram alteradas, o seu preenchimento é constituído por uma fina película de argila e óxidos de ferro.

O estado de alteração (W) e o grau fracturação (F) do maciço rochoso foram observados e registados no decurso dos levantamentos efectuados, segundo o preconizado pela ISRM [9, 10].

Dum modo geral, o maciço rochoso de fundação na margem direita e fundo do vale, onde ocorrem os xistos verdes, encontra-se pouco alterado (W1 a W2) e apresenta fracturas afastadas a medianamente afastadas. Em alguns locais da fundação dos descarregadores de meio-fundo e muro-barragem, o maciço rochoso apresenta-se mais alterado (W2 a W3), bem como na proximidade das falhas, onde a mais intensa fracturação do maciço rochoso facilitou a percolação de água e a alteração da rocha.

Na fundação da abóbada e do encontro da margem esquerda, onde predominam os filitos, o estado de alteração do maciço rochoso à superfície é W2 a W3. Na fundação do descarregador de superfície da margem esquerda e fecho da portela, onde as escavações atingiram menor profundidade, o grau de alteração do maciço rochoso passa a W3 e, localmente, W4. O grau de fracturação dos filitos é, dum modo geral, F4-5 e, menos frequentemente, F3-4.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da caracterização efectuada, julga-se importante destacar a fundação da barragem na margem esquerda, essencialmente constituída por filito e intersectada por numerosas falhas geológicas, a qual apresenta, globalmente, características geomecânicas e hidráulicas mais fracas do que a fundação constituída por xisto verde, no fundo do vale e margem direita.

Os elementos da cartografia geológica-geotécnica, obtidos antes da colocação dos primeiros betões, permitiram verificar a adequabilidade das características mecânicas da fundação às estruturas a construir e forneceram informação de base para a realização do projecto dos elementos de reforço da fundação (recravas) e para o projecto de consolidação e impermeabilização das fundações da barragem e central, através da injeção de caldas de cimento.

AGRADECIMENTOS

À EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infra-estruturas do Alqueva, S.A., pela autorização concedida para a publicação deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AGUIAR, A. A.; MATOS, D. S. & PIRES, J. M. (1996) – “Aproveitamento de Fins Múltiplos de Alqueva – a Barragem e a Central Hidroeléctrica”, *3º Congr. da Água e VII Simp. Luso Brasileiro de Eng. Sanit. e Ambiental*, Assoc. Port. de Recursos Hídricos & Assoc. Bras. de Eng. Sanit. e Ambiental, Lisboa, Vol. II, pp. 277-292.
- [2] COTELO NEIVA, J.M.; SILVA MATOS, D.; LIMA, C. & FERREIRA, F. (1997) – “Geologia e Geotecnia do local da Barragem do Alqueva no rio Guadiana”, *6º Congresso Nacional de Geotecnia*, IST, Lisboa, Volume 2, pp. 615-626.
- [3] OLIVEIRA, J.T. *et al.* (1992) – “Carta Geológica de Portugal - Escala 1/200000 - Nota Explicativa das Folhas 7 e 8”, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.
- [4] ICAT (1997) – “Estudo Neotectónico e Sismotectónico da Falha de Alqueva”, Relatório não publicado, EDIA, S.A., Lisboa.
- [5] LNEC (1984) – “Estudo das Características de Deslizamento de Diáclases do maciço de Fundação da Barragem de Alqueva – Relatório 272/84”, Proc. 45/1/8350 e 45/11/7305, Relatório não publicado, Lisboa.
- [6] HIDRORUMO (1999) – “Elementos de Projecto – Memória”, Escalão de Alqueva, Concurso Público Internacional Nº 15/99, Empreitada de Tratamento de Fundações e Injecções de Juntas da Barragem e Central Hidroeléctrica, Vol. III, Relatório não publicado, EDIA, S.A.
- [7] COTELO NEIVA, J.M. (1995) – “Elementos Geológicos e Geotécnicos (I) – Estudos Geológicos e Geotécnicos”, Concurso Público Nº 2/95 – Empreitada Principal de Construção do Escalão de Alqueva, Vol. V, Relatório não publicado, EDIA, S.A.
- [8] HIDRORUMO (1998) – “Reconhecimento Geológico-Geotécnico: Nota Técnica 02-ALQ-98”, Relatório não publicado, EDIA, S.A.
- [9] ISRM (1977) – “Suggested methods for the quantitative description of discontinuities”, Lisboa.
- [10] ISRM (1978) – “Basic Geotechnical Description of Rock Masses (BGD)”, Lisboa.

PLANTA GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE ALQUEVA

LEGENDA

LITOLOGIA

-  Filito
-  Xisto verde
-  Xisto verde com abundantes óxidos de ferro

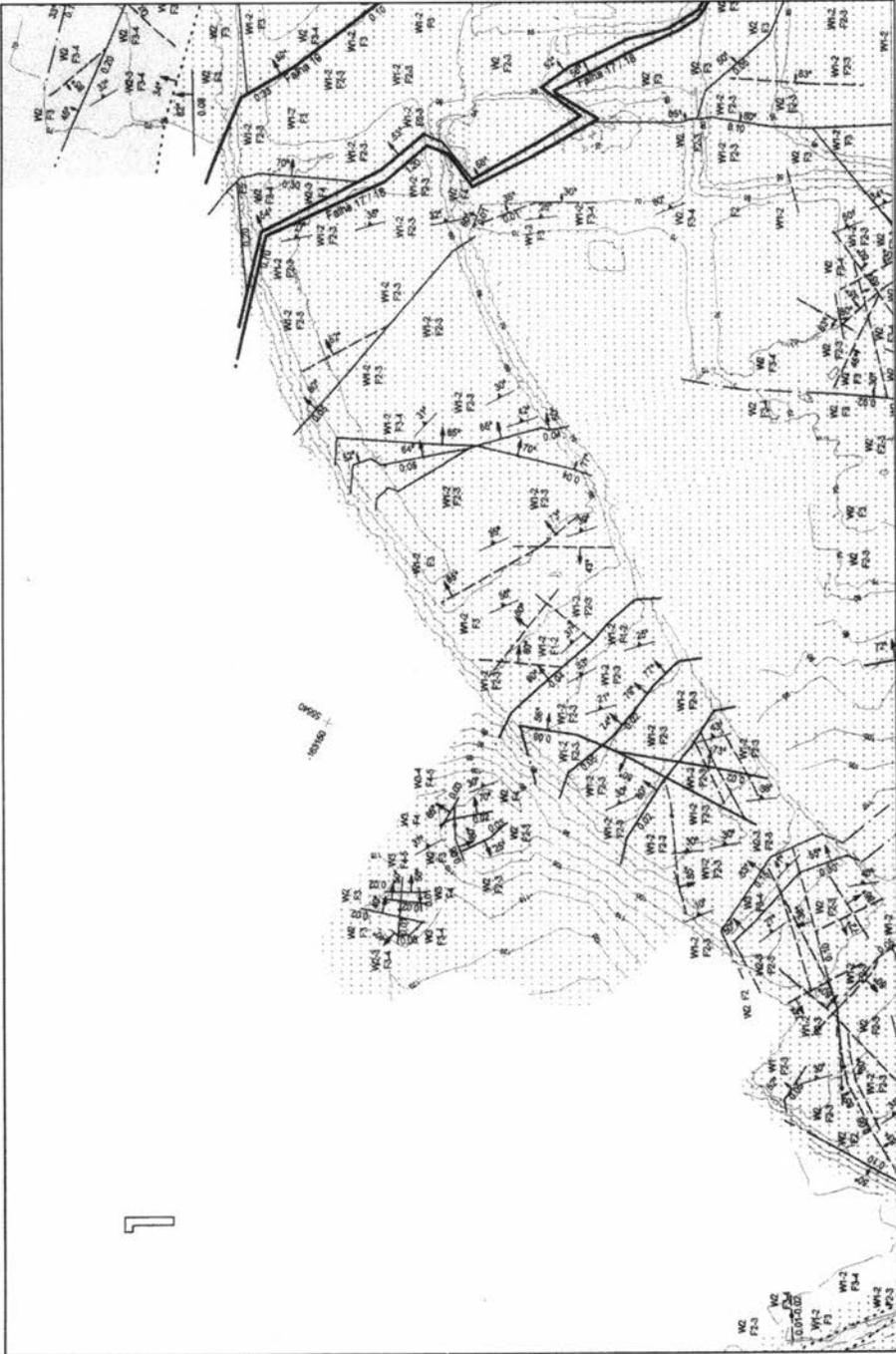
ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

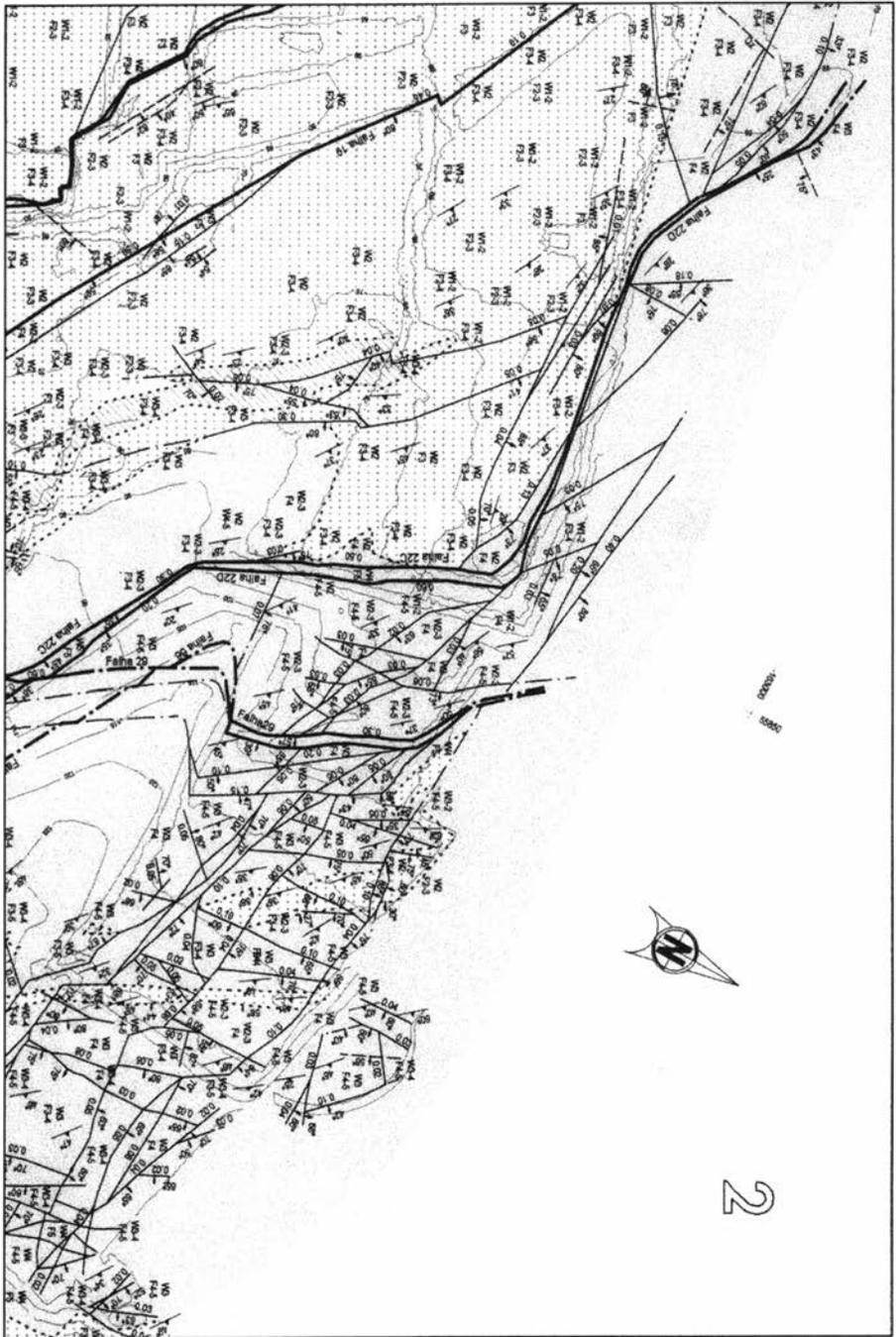
-  Limite geológico
-  Falha - Traçado observado, com indicação de pendor e possança real (em metros)
-  Falha - Traçado observado, com indicação de pendor vertical e possança real (em metros)
-  Falha - Traçado provável (interpolado ou extrapolado)
-  Diaclase extensa (>10m), com indicação de pendor e da espessura do preenchimento
-  Xistosidade

ESQUEMA DE LIGAÇÃO DAS FOLHAS

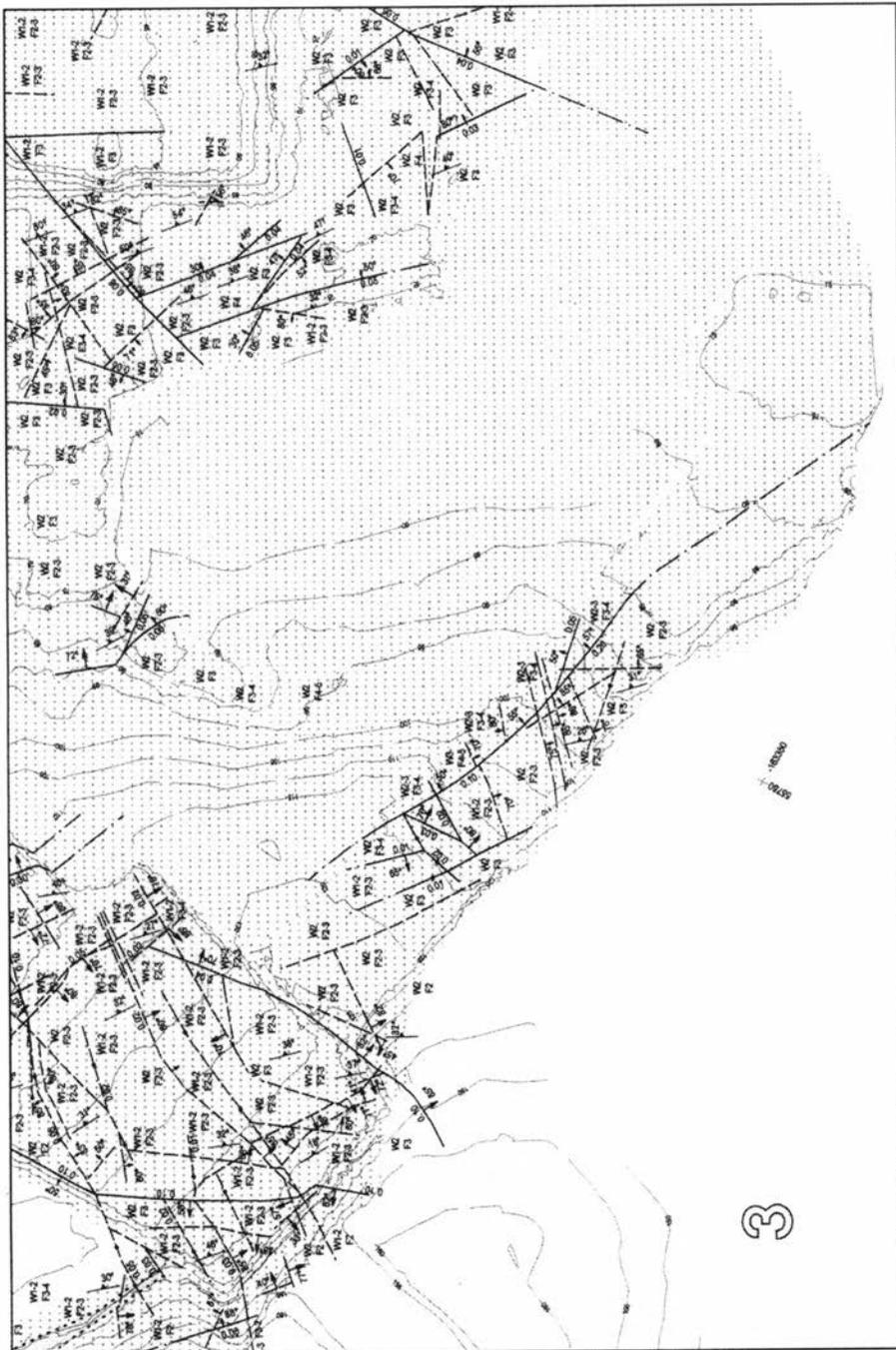
180

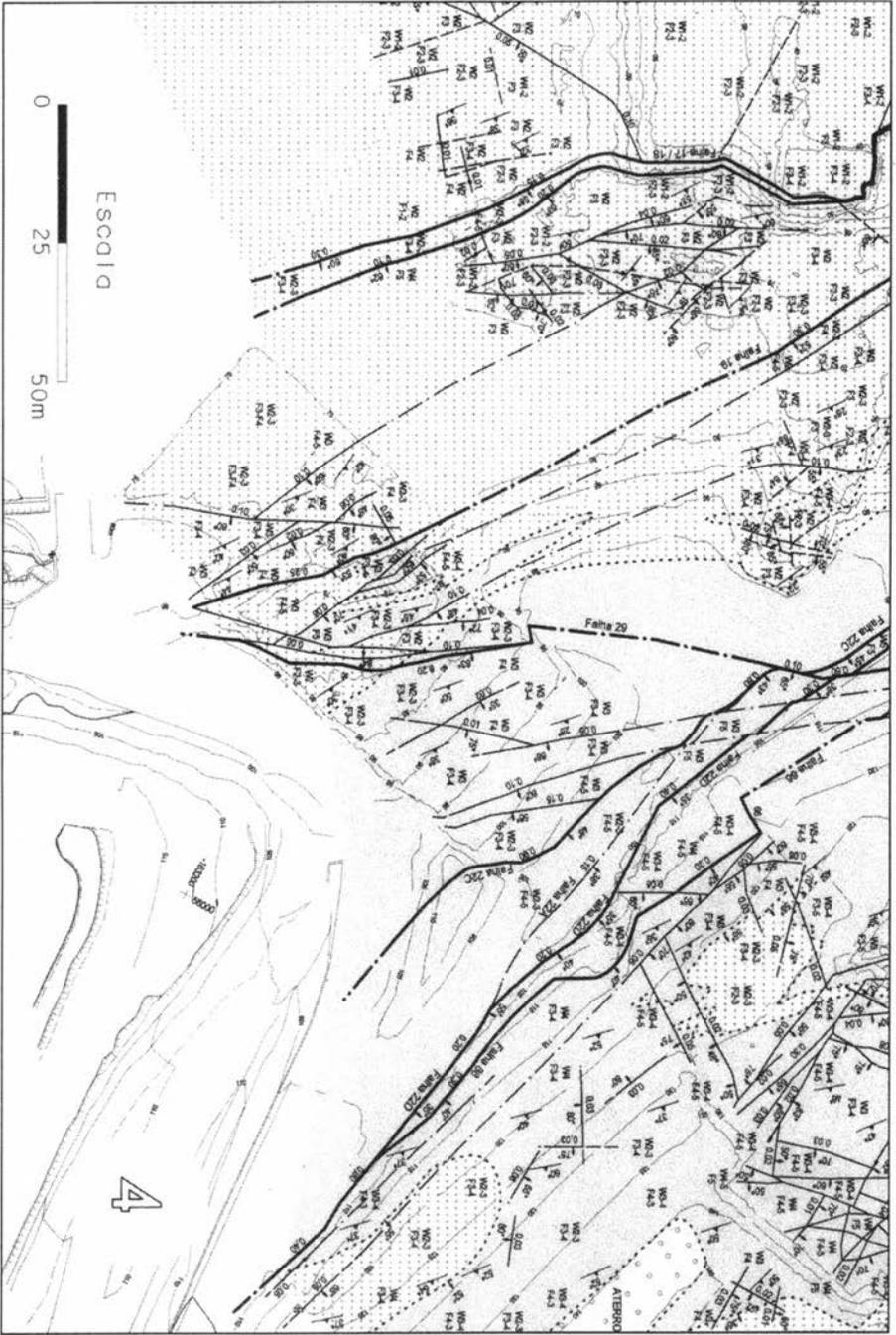
1	2
3	4





2





CONTRIBUIÇÃO DA GEOLOGIA DE ENGENHARIA NO EMPREENDIMENTO DE VENDA NOVA II

NADIR PLASENCIA¹ e CELSO LIMA²

PALAVRAS CHAVE: reconhecimento de superfície, prospecção, classificação do maciço, sustimento, monitorização.

KEY WORDS: geological survey, site investigation, classifications, lining, monitoring.

RESUMO

O aproveitamento hidroeléctrico de Venda Nova é constituído por uma barragem em abóbada, no rio Rabagão, um túnel na margem direita deste rio, conduta e central situadas a céu aberto na margem esquerda do rio Cávado. A sua construção foi concluída em 1951 e a sua exploração está a cargo da CPPE, empresa do grupo EDP, que como dono de obra, se propôs realizar um reforço de potência do actual aproveitamento. A opção integralmente enterrada para este reforço de potência traz a grande vantagem de minimizar os impactes numa zona natural da paisagem envolvente ao Parque Natural da Serra do Gerês. No final dos anos 70 e início dos anos 80, foram realizados pelo Prof. Doutor Coteló Neiva os primeiros trabalhos de cartografia geológica de superfície e as primeiras campanhas de prospecção. Esta cartografia foi a base de reformulação do traçado quando se retomaram os trabalhos em 1996. Estes trabalhos permitiram a identificação de diversas falhas de maior ou menor importância relativa, salientando-se a designada por falha da Botica, tendo sido determinantes na selecção dos traçados em planta, para a escolha da possível solução em perfil, e localização de elementos importantes como a caverna da central.

¹ EDP Produção – Engenharia e Manutenção, SA (Grupo EDP). Rua do Bolhão, 4000 Porto, Portugal. (nadir.plasencia@em.edpproducao.edp.pt)

² EDP Produção – Engenharia e Manutenção, SA (Grupo EDP). Rua do Bolhão, 4000 Porto, Portugal. (celso.lima@em.edpproducao.edp.pt)

ABSTRACT: Engineering Geology and its constraints on the Venda Nova II dam foundations

The Venda Nova Hydroelectric scheme is a arch-gravity dam, on the River Rabagão, a tunnel on this river's right bank, a pen-stock and powerhouse on the left bank of the River Cávado; its construction ended in 1951. The Portuguese Electricity Production Company - CPPE, in the EDP Group, decided to re-power the existing scheme. A full underground option has the big advantage of minimizing the impacts on a natural landscape area that surrounds the Natural Park of Gerês. At the latest 70's and early 80's, Professor Coteló Neiva conducted the first geological surface survey works and the first investigations. This cartography was the basis for the decision on the new alignment, when the works restarted in 1996. These works allowed the identification of several faults of major or minor relative importance, being possible to highlight the one afterwards named as Botica-Fault, and were determining in the selection of alignments in plant, in the choice between the possible solutions in longitudinal section, and the in the positioning of major elements such as the powerhouse cavern.

1. DESCRIÇÃO GERAL

O aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova localiza-se próximo desta povoação, a cerca de 55km da cidade de Braga. Constituído por uma barragem em abóbada, com cerca de 97m de altura, no rio Rabagão, um túnel na margem direita deste rio, conduta e central situadas a céu aberto na margem esquerda do rio Cávado. A construção foi concluída em 1951 e a sua exploração está a cargo da CPPE, empresa do grupo EDP, que como dono de obra, se propôs realizar um reforço de potência do actual aproveitamento, obrigando à construção de um novo circuito hidráulico e central.

A opção integralmente enterrada para este reforço de potência traz a grande vantagem de minimizar os impactes numa zona natural da paisagem envolvente ao Parque Natural da Serra do Gerês. Foram projectados um circuito hidráulico reversível e central subterrâneos, localizados na margem esquerda do rio Rabagão. A tomada de água em turbinamento foi localizada imediatamente a montante da barragem de Venda Nova, e a restituição para o rio Rabagão próximo da confluência com o rio Cávado, na albufeira de Salamonde. As obras do aproveitamento ficaram inseridas num maciço predominantemente granítico, tendo o traçado do circuito hidráulico sido fundamentalmente influenciado pelas características geológico-geotécnicas. Os túneis do circuito hidráulico apresentam secção em ferradura com diâmetro de escavação de 6,3m a 7,3m. O túnel em carga, com uma carga hidráulica de 420m, tem aproximadamente 2800m de comprimento e 15% de inclinação. A restituição, com inclinação de cerca de 2%, apresenta um comprimento aproximado

de 1400m. A central, com 320m de cobertura, tem dimensões aproximadas de 20m × 60m, com 30m de altura. Ligada à caverna da central por duas galerias, foi projectada uma caverna de menores dimensões para instalação dos transformadores. O acesso à central e ataque às escavações foi materializado num túnel com cerca de 1500m, inclinação predominante de 7%, vão de 8m e secção tipo ferradura.

2. CARTOGRAFIA GEOLÓGICA E RECONHECIMENTO DE SUPERFÍCIE

Tendo em vista a inserção do traçado do circuito hidráulico foram comparadas as duas margens. Dado que na margem direita se podiam observar contactos entre xistos e granitos cuja orientação poderia resultar em paralelismo e/ou proximidade com o eixo dos túneis, ou então em grande acréscimo do traçado das escavações, foi escolhida a margem esquerda do Rabagão para implantar este novo circuito hidráulico, tentando-se dessa forma evitar maiores dificuldades construtivas. Foram realizados no final dos anos 70 e início dos anos 80, os primeiros trabalhos de cartografia geológica de superfície, à escala 1:5000 (fig. 1). Nesta época não estava ainda publicada a folha “6A - Montalegre” da Carta Geológica de Portugal à escala 1:50000, e para a elaboração da cartografia de superfície foi necessário recorrer à observação dos afloramentos existentes. Na região existe um predomínio de formações graníticas, aflorando também rochas metamórficas. À superfície, um rico coberto vegetal e de solos protege todas essas formações, sendo no entanto, possível encontrar bastantes afloramentos, principalmente na proximidade dos rios. Os taludes das estradas e dos caminhos existentes foram fundamentais para a elaboração da carta geológica.

Quando se retomaram os trabalhos em 1996, para a realização de um novo estudo prévio e reformulação de traçado, foi possível consultar a carta geológica 1:50000, publicada em 1982. No entanto, a selecção do traçado foi essencialmente baseada na carta geológica 1:5000, acima referida, revista tendo por base investigação adicional de superfície. Foram então analisados todos os relatórios e sondagens realizados para a solução estudada em 1970-1980, tendo sido também reanalisada a fotografia aérea existente.

A região situa-se no flanco NNE da Serra da Cabreira, entre as povoações de Sidrós a N, Ferral a NNE, Botica a SW e Campo e Lamalonga a S. É atravessada pela maior parte do tramo final SE-NW do vale do rio Rabagão, de profundos meandros encaixados em grande parte em tramos de falhas NE-SW, NW-SE, N-S a NNE-SSW e NNW-SSE. Nesta região, a área mais elevada do maciço granítico culmina na pirâmide de Campos (889m), o que resta do relevo de planalto que é a Serra da Cabreira, e que se vai suavizando para as povoações de Lamalonga (824 - 835m) a SE e Campo (800 - 825m) a WSW, onde a erosão estabeleceu a vertente NE do tramo SE-NW do Rabagão.

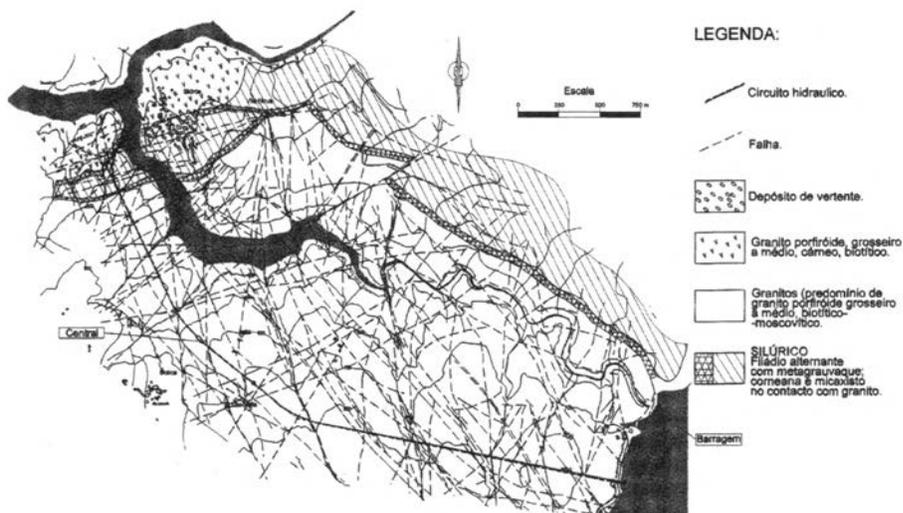


Fig. 1 – Carta geológica elaborada entre 1979 e 1980 à escala 1:5000. Implantado o circuito hidráulico actualmente construído (adaptado de NEIVA *et al.*, 2000).

Os trabalhos de cartografia geológica de superfície e a análise de fotografia aérea permitiram a identificação de diversas falhas de maior ou menor importância relativa, salientando-se a designada por falha da Botica. Estes trabalhos foram determinantes na selecção dos traçados, em planta, para a escolha de entre as possíveis soluções em perfil, e localização de elementos importantes como a caverna da central.

3. TRAÇADO DO CIRCUITO HIDRÁULICO

O traçado em planta foi seleccionado, a nível de estudo prévio, de entre um conjunto de diversas soluções, tendo em consideração a melhor orientação possível para os túneis, de forma a cortar com o maior ângulo possível as estruturas geológicas existentes. Do ponto de vista litológico, não seriam expectáveis grandes variações, sendo previsível encontrar na maior percentagem do traçado, formações graníticas com filões pegmatíticos e alguns encraves. As possíveis soluções em perfil foram estudadas em função de diversos factores: localização da central, extensão dos túneis de acesso, coberturas, consequente qualidade do maciço em profundidade e minimização da perturbação dos níveis freáticos, bem como, naturalmente, dos aspectos económicos e ambientais. As soluções estudadas foram divididas em dois grupos: um primeiro grupo de quatro soluções de revestimentos rígidos e um segundo grupo de três soluções não revestidas (isto é, revestimentos

preferencialmente flexíveis). Os aspectos geológicos assumiram maior relevo na escolha entre o segundo grupo de soluções. De entre as soluções não revestidas (revestimento flexível), que envolviam menores prazos de execução e menores custos globais, algumas das razões para a escolha da solução construída foram: apresentar maiores coberturas e, conseqüentemente, menores probabilidades de drenar o maciço escavado durante a construção; também, devido às coberturas, ter maiores probabilidades da escavação se realizar em maciço de boas características geológico-geotécnicas e possibilitar a criação de apenas um novo acesso, apoiado em traçados existentes.

4. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DO CIRCUITO HIDRÁULICO

Tendo em vista a caracterização do maciço para elaboração do projecto de execução da obra, foi realizada uma campanha de prospecção para complementar o conhecimento que se tinha adquirido do maciço nos anos 80, aquando do estudo da primeira configuração do circuito hidráulico.

O traçado final seleccionado no estudo prévio indicava que as escavações seriam predominantemente realizadas no granito da Borralha, intersectando, o fim da restituição, uma zona de formações metamórficas e, eventualmente granito róseo. Superficialmente estas formações apresentam-se heterogénea e intensamente meteorizadas, sendo o granito do Gerês o que atinge maiores espessuras de alteração. Aparentemente, a zona final da restituição seria a integrada em geologia mais complexa, por um lado devido aos contactos litológicos entre as três formações geológicas, por outro lado devido à alteração do granito do Gerês. Outra zona complexa seria a falha da Botica, necessitando de uma cuidada caracterização específica.

4.1. PROSPECÇÃO

Tendo por base as características geométricas do circuito hidráulico, o reconhecimento geológico de superfície e a necessidade de caracterização hidrogeológica do maciço, foi dimensionada a campanha de prospecção tendo em consideração: a campanha realizada nos anos 80 para o anterior estudo que coincidia nos 4km iniciais com as obras do reforço; as localizações das bocas, condicionadas por razões hidráulicas (condições de submergência) e geológicas; zonas particulares de falhas, âmbito de prospecção específica; outras zonas particulares, como as cavernas da central e da sala de transformadores, e chaminé de equilíbrio.

Os alinhamentos estruturais passíveis de causar maiores constrangimentos na realização da obra do circuito hidráulico, foram também sujeitos a prospecção

específica. Incidiram particularmente nas zonas de falha associadas a linhas de água mais pronunciadas, identificadas pela fotografia aérea e reconhecimento de superfície como as potencialmente mais importantes. Da campanha dos anos 80 tinham sido já realizadas 4 sondagens para prospecção das falhas potenciais, interessando parte da galeria em carga, ficando excluído o traçado do túnel de restituição. Seria também na restituição e túnel de acesso à central que se previa o atravessamento da falha mais importante (falha da Botica). Foram realizadas 8 sondagens à rotação com recolha contínua de amostra e ensaios de permeabilidade “tipo Lugeon”, ao longo do alinhamento do túnel da restituição, 4 das quais directamente na zona da falha da Botica. Dada a profundidade geral dos túneis, as sondagens só atingiram a zona de escavação do maciço do circuito hidráulico na proximidade das bocas.

As quatro sondagens realizadas na falha da Botica permitiram identificar, com alguma precisão, a geometria e as características desta estrutura geológica que veio a ser atravessada pelo túnel de acesso à central e pelo túnel de restituição. Durante a escavação destes túneis, foram ainda realizadas sondagens na frente de escavação para permitir uma melhor caracterização da estrutura a atravessar, por forma a adequar os processos de escavação e contenção. Dada a profundidade das escavações as sondagens em avanço permitiram obstar às dificuldades inerentes à profundidade dos terrenos.

No local da chaminé de equilíbrio foi realizada uma sondagem vertical com 200m, tendo como objectivo principal, além da caracterização mecânica dos primeiros metros do maciço, o conhecimento das características hidrogeológicas do local, visto ser esta uma das zonas de maior risco hidrogeológico (rebaixamento do nível freático) dado que a abertura da chaminé iria funcionar como um dreno num maciço que se previa superficialmente permeável, nos primeiros 100 a 200m próximos da superfície, com numerosas nascentes com poças na envolvente.

Sendo as cavernas os órgãos mais delicados em termos de escavação e contenção, e podendo a sua localização ter impacte económico muito relevante no empreendimento, seria também imperativo o investimento na prospecção. Foram assim realizadas quatro sondagens verticais com “wire-line”; entre esses furos de sondagem foi ainda realizada tomografia sísmica. Quando concluído o túnel de acesso à central, foi ainda realizada uma galeria de reconhecimento geológico que permitiu a realização de ensaios de caracterização mecânica e de determinação do estado de tensão *in situ* e confirmar os resultados da interpretação da restante prospecção.

As sondagens, em número de 29 na campanha de 1982 e de 13 na campanha de 1996, perfizeram, respectivamente, 2668m e 2312m, correspondendo a cerca de 60% do comprimento total dos túneis escavados.

4.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os ensaios realizados em amostras de sondagens, em furos de sondagem e na galeria de reconhecimento geológico permitiram a caracterização das zonas geológico-geotécnicas. A análise dos resultados das diversas fases de prospecção com ensaios de caracterização, em conjunto com todos os trabalhos de superfície anteriormente realizados, permitiram definir o modelo geológico-geotécnico global do circuito hidráulico.

A realização de estradas de acesso e escavações para plataformas de trabalho colocaram a descoberto formações litológicas que permitiram melhorar a carta geológica. A informação obtida durante a execução do túnel de acesso à central, galeria de reconhecimento, estradas de acesso e plataformas de trabalho foi também ponderada; todos esses dados contribuiriam para a actualização e pormenorização do zonamento do maciço (Quadro I).

Quadro 1 – Zonamento do maciço, tendo por base a observação das amostras das sondagens, prospecção geofísica, ensaios laboratoriais em amostras e ensaios de permeabilidade tipo “Lugeon”.

Zona	Rocha	Alteração e Fracturação	RQD (%)	Vel. prop. ondas sísm. (Vp) (m/s)	Er (GPa)	UCS (MPa)	Permeabilidade (U.L.)			
							> 10	10-2	2-1	< 1
ZG3	Granito	W5,F5 a W2-W3,F4	0-70	800-2800	< 15	—	36%	29%	9%	26%
ZG2	Granito	W2-W3,F3-F4 a W2,F1-2	70-95	3000-4600	15,5-25,4	25,7-47,8	1%	27%	9%	63%
ZG1	Granito	W1-2,F2-F3 a W1,F1	95-100	> 4800	24,6-78,8	54,0-89,0	2%	2%	4%	92%
	Migmatito	W1-2,F2-F3 a W1,F1	95-100	> 4800	26,6-78,8	43,2-66,1	—	—	25%	75%

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO NA FASE DE EXECUÇÃO

As escavações para o circuito hidráulico ocorreram numa extensão de cerca de 4,5km. A esta extensão há ainda a adicionar um total de cerca de 3,5km de túneis de acesso e ataque e ainda poços com 415m da chaminé de equilíbrio superior e 60m da inferior.

No decorrer da obra o método observacional permitiu grande flexibilidade no que respeita à escolha do suporte e dos métodos de escavação, através da sua adequação ao comportamento real do maciço, possível pelo controlo efectuado, quer pela observação das características do maciço escavado, quer pela monitorização. Teoricamente a contenção definitiva deveria aproximar-se da frente de escavação, podendo ser aplicada à medida do avanço do túnel. O sustimento primário deveria ser aplicado para o avanço em condições de segurança de forma a evitar comportamentos não desejados, fazendo, no fim, parte integrante do revestimento definitivo, desde que cumprisse as características especificadas para este último elemento estrutural.

A escavação dos túneis do circuito hidráulico foi genericamente realizada em secção plena, mesmo em zonas onde o maciço apresentou condições geológicas consideradas mais adversas, já a escavação e aplicação de sustimento das cavernas foi faseada.

No projecto de execução dos túneis foram preconizadas 5 secções tipo de sustimento /revestimento em função de intervalos de RMR (fig. 2). Tendo em vista a definição do tipo de secção de sustimento necessário para avanço em condições de segurança, foi sistematicamente realizada pelos geólogos em obra, a cartografia geológica e a caracterização da secção através do RMR e Q e ainda o GSI. O conjunto de todos estes elementos e a análise dos resultados da monitorização permitiram a definição da secção final de contenção. A aplicação do sistema Q foi de grande utilidade para indicação, em obra, do sustimento a aplicar principalmente nas zonas de falha e na intersecção de escavações.

A cartografia geológica das escavações foi uma das informações que permitiu tomar decisões relativas ao sustimento a aplicar, além de ser um registo fundamental a incluir nos elementos finais de arquivo da obra. As situações em que as estruturas geológicas assumiram um papel definitivo na adaptação do sustimento indicado pela classificação geomecânica podem ser resumidas em dois grupos: orientações de contactos litológicos e orientações de planos de falha. Relativamente à influência de contactos litológicos cita-se o exemplo da zona final do túnel de restituição. Na última centena de metros de escavação o contacto entre formações metamórficas e granitos previa-se que estivesse paralelo e muito próximo das superfícies escavadas (azimute próximo ao eixo do túnel), o que poderia condicionar a estabilidade da escavação. Apesar de nas superfícies escavadas não se observar indícios dessa situação, houve que ter em consideração essa situação na escolha do suporte a aplicar.

Na figura 3 apresenta-se o modelo geológico final, que representa o zonamento geológico-geotécnico das formações geológicas onde se realizaram as escavações. Este zonamento foi definido tendo por base toda a informação obtida ao longo dos estudos, mas também os dados relativos à cartografia geológica e classificação das escavações.

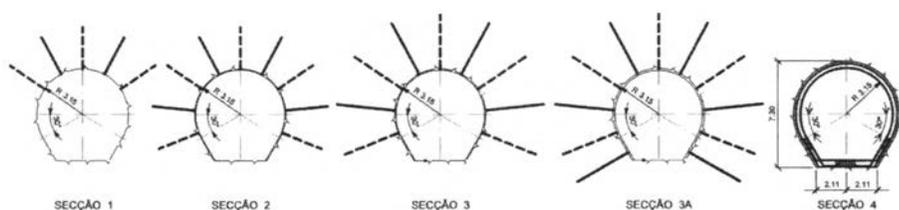


Fig. 2 – Secções tipo de sustimento/revestimento.

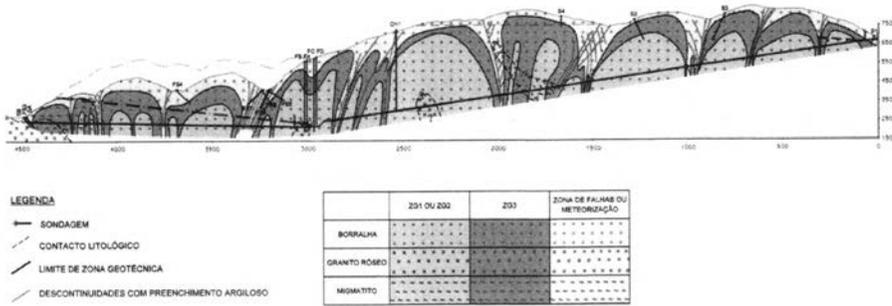


Fig. 3 – Perfil longitudinal com zonamento geológico-geotécnico do circuito hidráulico, com toda a informação que foi sendo obtida, nomeadamente a relativa à cartografia geológica das escavações.

5. MONITORIZAÇÃO

5.1. PLANO DE INSTRUMENTAÇÃO E COMPORTAMENTOS OBSERVADOS

O plano de instrumentação e controlo de deformações foi adequado a uma obra subterrânea localizada na sua maior extensão a profundidades superiores a 200m, com dois tipos principais de intervenção, em função do tipo de obra a ser observado. Devido à complexidade e dimensão das escavações na zona das cavernas, além das medições de convergência por meio de alvos ópticos e de fitas de invar, foram ainda instalados extensómetros de vara, de forma a analisar o comportamento da estrutura durante a redistribuição das tensões na sua envolvente, a partir da observação dos deslocamentos, permitindo avaliar as condições de estabilidade e eficiência do revestimento aplicado. Nos túneis o controlo das deformações do maciço envolvente da escavação e suporte instalado foi realizado por meio de medições de convergências entre marcas instaladas no interior da escavação, em secções normais ao eixo. Os perfis, afastados em média 25m, foram genericamente constituídos por um alvo reflector na abóbada, ao eixo, e mais um em cada hasteal, colados na extremidade de varões de aço, encastrados 0,30m no maciço ou soldados nas cambotas. Em condições geológicas adversas, o afastamento foi encurtado. Nas zonas de emboquilhamentos foram também instalados perfis a menores distâncias. Na leitura dos alvos foram realizadas medições tridimensionais por meio de um sistema óptico de leitura baseado na tecnologia da estação total, que se coloca automaticamente em estação. Este sistema permite grande flexibilidade, pois as leituras podem ser feitas afastadas da frente do túnel desde que visíveis os alvos de referência e as marcas das secções de convergência em observação, apresentando reduzidas interferências com a produção. Na falha da Botica foram ainda lidas cordas horizontais, com recurso a fita de invar. A frequência das leituras foi função da distância à frente de escavação e dos resultados que foram sendo obtidos.

Os resultados das leituras foram diariamente fornecidos por correio electrónico e semanalmente discutidos em reunião em obra. Sempre que surgiam situações particulares, os técnicos intervenientes entravam em contacto de forma a que fosse possível uma análise da situação e fossem tomadas decisões.

O controlo das vibrações induzidas pelos explosivos utilizados nas escavações nos betões das vigas da central foi efectuado com registos sistemáticos das velocidades de propagação, não se tendo atingido velocidades susceptíveis de lhes causar danos.

5.2. ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES REGISTADAS

De uma forma geral não foram observadas deformações elevadas. Na abóbada da central as deformações registadas coincidiram com as previstas pelo modelo de cálculo elaborado. As deformações registadas nas paredes da caverna da central foram inferiores às previstas.

Nos túneis as secções de convergência foram, de forma geral, aplicadas a 25m da frente de escavação. Nas secções de convergência que foi possível aplicar a menos de 20m, em maciços com RMR superiores a 40, foram lidas convergências da corda horizontal na ordem dos 2 a 3mm que rapidamente estabilizavam. Com RMR entre 30 e 40, foram lidas, para a mesma corda, deformações entre 4 e 5mm, com estabilizações atingidas algumas semanas após o início das leituras.

Algumas deformações de maior relevo foram registadas em zonas de condições geológicas adversas, como zonas de esmagamentos tectónicos. Situação muito particular foi a registada na zona do túnel de restituição, abrangida pela falha da Botica.

6. FALHA DA BOTICA

A falha da Botica foi a estrutura geológica de maior significado atravessada por todas as escavações. Identificada desde o estudo prévio, foi devidamente reconhecida por meio de prospecção mecânica. A amostragem das sondagens identificou um conjunto de falhas com preenchimentos argilosos, mais ou menos possantes, alternando com granito intensamente tectonizado e zonas menos alteradas. As suas características enquadraram-na num granito intensamente tectonizado constituído por um conjunto de falhas paralelas normais ao túnel e outras descontinuidades, com preenchimento de argila, e zonas de granito menos alterado. A caulinite e a illite foram as argilas identificadas nas diversas amostras ensaiadas tanto por difracção de Raios X, como por determinação da actividade.

A escavação foi realizada na direcção da pendente da falha, aparecendo água apenas no fim da zona tectonizada. Em termos de RMR, enquadra-se seguramente em valores inferiores a 20 (apesar da inexistência de água); 0,03 foi o valor atribuído pelo sistema Q; pelo GSI poder-se-á enquadrar esta zona entre 10 e 15 de valoração. Nos primeiros metros escavados na zona tectonizada, houve uma discrepância entre as classificações atribuídas ao maciço pelos geólogos envolvidos na obra (resultando na atribuição de secções distintas).

Na fase de definição dos critérios de alerta estabelecidos no projecto, para uma zona com características similares à da falha da Botica, foi usada uma análise numérica com o programa "PHASES", com parâmetros estimados a partir do RMR igual a 20 e assumindo um $K(\sigma_h/\sigma_v)$ de 1,5. Foi considerado o sustimento aplicado após 60% de desconfinamento, constituído por 10cm de betão projectado e pregagens aplicados na abóbada e hasteais (secção tipo S3). Nesse modelo, em pontos localizados a cerca de 1,5m acima da soleira, foram previstas deformações da ordem dos 65mm e os deslocamentos totais rondariam os 130mm (figura 4).

Nesta zona, escavada com cerca de 6,5m de diâmetro, foi genericamente aplicado um suporte com cerca de 15cm de betão projectado com fibras, sem soleira. Numa zona localizada foram, adicionalmente instaladas cambotas. Para o registo das deformações instalaram-se secções de convergência para leituras por meios ópticos (um alvo em cada hasteal e outro no tecto) e dois perfis para leituras de convergências horizontais por fita de invar. Os perfis junto às cambotas, estabilizaram ao fim de aproximadamente um ano. Decorridos cerca de dois anos, na restante zona da falha ainda se verifica convergia horizontal. Visto que as argilas existentes são pouco expansivas (caulinites e ilites), as deformações não estarão, em princípio, associadas a comportamentos expansivos.

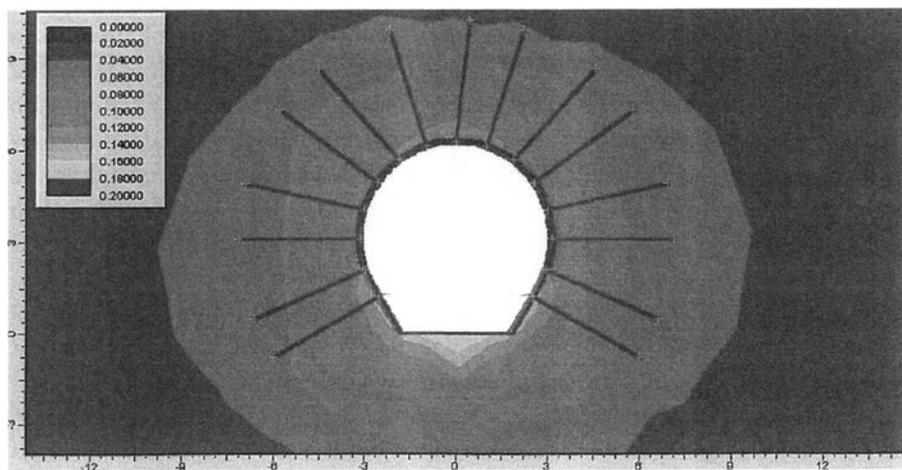


Fig. 4 – Modelo de secção do túnel do circuito hidráulico em "PHASES". Previsão dos deslocamentos totais para uma zona de RMR=20.

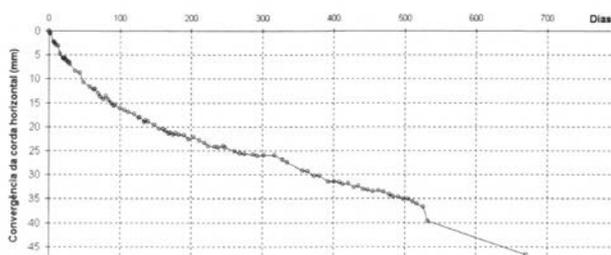


Fig. 5 – Evolução da convergência horizontal, no perfil ao pk 1152,8, da falha da Botica (dados de leituras realizadas pela Cêgê).

O gráfico apresentado na figura 5 traduz o comportamento da corda horizontal a cerca de 1,5m da soleira na secção ao pk1152,8, lida por meios ópticos. As cordas oblíquas apresentam convergências de menor importância. O perfil de monitorização começou a ser lido a cerca de 23m da frente de escavação, significando que não foram registadas as deformações mais significativas. Decorridos cerca de dois anos a secção em evolução evidencia que o maciço apresenta uma deformação dependente do tempo, ou seja, fluência, eventualmente um comportamento de “squeezing” reduzido.

Em função do comportamento apresentado pelo maciço, foi estimada uma deformação a longo prazo a partir da qual se efectuou o dimensionamento do revestimento definitivo em betão armado a aplicar nesta secção.

7. HIDROGEOLOGIA EM VENDA NOVA II

Venda Nova II insere-se numa região rica em recursos hidrogeológicos, com nascentes, poços e furos de captação de água. Tendo presente o risco de, durante o processo construtivo, se provocar rebaixamento do nível freático e interferir com captações, bem como o risco de aumento do gradiente hidráulico em determinados pontos pela comunicação entre falhas ou destas com a superfície, e tratando-se de um empreendimento subterrâneo de túneis não revestidos, foi elaborado um modelo hidrogeológico do local da obra. Nesse modelo, baseado na carta e no perfil geológicos, foram identificados os riscos e definidas zonas de distintos níveis de risco, realçando-se as bocas, chaminé de equilíbrio superior, e as linhas de água coincidentes com menores coberturas dos túneis. Foi dada particular importância à geologia estrutural, pois a percolação nos maciços cristalinos é favorecida pela existência de zonas de maior fracturação. Zonas de intensa fracturação poderiam ter um grande impacto tanto no rebaixamento do nível freático como nos caudais de infiltração durante a escavações, mas também facilitar a percolação entre os diversos túneis do circuito hidráulico em operação e, destes, com a superfície.

Tendo por objectivo a caracterização hidrogeológica do maciço correspondente à área de implantação da obra, foram realizados ensaios tipo “Lugeon” em todas as sondagens. De notar que cerca de metade dos ensaios realizados apresentou permeabilidade nula. A análise dos resultados dos ensaios e a comparação com a amostragem das sondagens permitiu concluir que o maciço é globalmente impermeável, e que as zonas de maior percolação estão associadas a fracturação e a cotas superiores de meteorização.

Os impactes associados à tomada de água em turbinamento e à tomada de água em bombagem poderão vir a ser minimizados com a entrada em operação do circuito hidráulico. Quanto ao túnel de acesso à central, galeria de ventilação e segurança (principalmente nas zonas das bocas, dado apresentarem menores coberturas) e chaminé de equilíbrio (nas cotas superiores) actuarão como drenos permanentes.

As zonas das bocas acima referidas, de pequena concentração de poças, poços, nascentes e furos, e onde é reduzido o aproveitamento dos terrenos para a agricultura, foram consideradas de risco moderado a grande. A zona da chaminé de equilíbrio foi considerada a de maior sensibilidade no conjunto de toda a obra, devido à existência de numerosos pontos de captação de água e de terrenos agrícolas na envolvente.

Tendo por objectivo minimizar este risco, além de outros aspectos, foi decidido revestir os 100 metros superficiais desta chaminé com um anel de betão moldado, em correspondência com a zona mais permeável do maciço. Adicionalmente, e com dois objectivos principais, foi feito o levantamento exaustivo de todos os pontos de água e trimestralmente registados os caudais e/ou níveis de água. Por um lado permitirá avaliar a justeza de futuras reclamações, por outro lado permite o controlo hidrogeológico do impacte causado pelas escavações e da entrada em carga do circuito hidráulico. Esse controlo teve início um ano antes de se iniciarem as escavações do circuito hidráulico e deverá ser prolongado durante, no mínimo, um ano em fase de operação desse circuito.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos de reconhecimento geológico e de prospecção foram exaustivos. A cartografia geológica e os trabalhos de reconhecimento de superfície permitiram identificar uma falha com características mais desfavoráveis que os restantes alinhamentos geoestruturais identificados à superfície. Tendo em conta esse dado, a prospecção foi dimensionada de forma a permitir uma identificação da geometria e características geológicas dessa zona tectonizada, posteriormente designada por falha da Botica.

De uma forma geral poder-se-á afirmar que os trabalhos de reconhecimento e caracterização foram proveitosos, dado que as condições geológico-geotécnicas encontradas não divergiram significativamente do modelo geológico previsto.

A monitorização foi fundamental para a análise do comportamento das escavações principalmente nas zonas de falhas e cavernas, permitindo adequar os suportes aplicados. Importa referir que, na prática, as distâncias entre perfis de monitorização e respectiva periodicidade de leitura foram também escolhidas em função das condições geológicas encontradas e dos processos executivos.

GEOLOGIA DE ENGENHARIA EM OBRAS SUBTERRÂNEAS

NADIR PLASENCIA ¹

PALAVRAS CHAVE: geoengenharia, geologia de engenharia, túneis urbanos, túneis não urbanos.

KEY WORDS: geoengineering, engineering geology, urban tunnels, non-urban tunnels.

RESUMO

Uma obra subterrânea distingue-se pela importância que o maciço envolvente assume no seu comportamento e, conseqüentemente, no dimensionamento estrutural. Este aspecto integra esse tipo de obra na Geoengenharia onde é fulcral o papel do Geólogo de Engenharia. Este trabalho terá como principal objectivo ilustrar a contribuição da Geologia de Engenharia e avaliar a influência da cobertura e do meio onde a obra se insere, nas actividades a desenvolver a nível desta disciplina. Apresentam-se quadros-resumo, onde se confrontam as obras subterrâneas em meio urbano e não urbano, e a abordagem no âmbito da geologia de engenharia.

ABSTRACT: *Engineering Geology and underground projects and structures*

The rock massif plays a fundamental role on the behaviour and on the design of underground projects, making this type of structure different from many others, thus emphasizing the importance of Geoengineering. The contribution of Engineering Geologists is of major importance. The present work aims to illustrate the Engineering Geology contribution and to evaluate the influence of overburden and location of

199

¹ EDP Produção – Engenharia e Manutenção, SA (Grupo EDP). Rua do Bolhão, 4000 Porto, Portugal. (nadir.plasencia@em.edpproducao.edp.pt).

underground structures on their activity. Summary-tables are presented, where urban and non-urban underground structures, as well as the respective engineering geology activities, are compared.

1. CONCEITO DE GEOENGENHARIA

A importância da obra subterrânea depende fundamentalmente das suas dimensões, das coberturas, da envolvente superficial da obra e das características geológico-geotécnicas dos terrenos em que esta está inserida. É na crosta terrestre, em conjunto ou não com um suporte, que se encontra o sistema que assegura a sua estabilidade. Entra aqui o conceito de Geoengenharia, área comum da geologia e da engenharia, onde as formações geológicas devem ser encaradas como um elemento constitutivo ou material de todo o projecto [1].

A Geologia, que se ocupa da constituição e propriedades da crosta terrestre, tem um papel preponderante no estudo das soluções subterrâneas. O grande desenvolvimento da sociedade, provocando a renovação de métodos construtivos com novas tecnologias, torna também fundamental um conhecimento cada vez mais aprofundado das características geológicas. O bom senso, a sensibilidade e as experiências adquiridas são fundamentais no dimensionamento de uma obra subterrânea. Estes projectos assumem características distintas das restantes áreas da engenharia, dado que apenas terminam após a conclusão da obra. Estas obras necessitam de uma conjugação plena entre projectista, fiscalização e construtor, resultando o projecto final de uma constante adaptação às condições geológico-geotécnicas encontradas ao longo das escavações. Estas condições e sua tectónica resultam da incerteza na caracterização dos terrenos, consequência de uma frequente heterogeneidade e, muitas vezes, dificuldades de acesso para prospecção (densidade urbana ou profundidade da obra), assim como da complexidade do comportamento da estrutura subterrânea.

No decurso das várias fases do Projecto, o geólogo de Engenharia assume distintos papéis. Durante os estudos preliminares e prévios, deverá acompanhar a análise dos esquemas alternativos e contribuir para a estimativa do custo da obra. Na fase de projecto, deverá preparar os elementos geológico-geotécnicos para lançamento do concurso para construção, tendo, com esse fim, realizado campanhas de prospecção e interpretação dos resultados. Durante a fase de construção, o geólogo deverá acompanhar a obra para classificação dos materiais encontrados, tendo em consideração as secções tipo de sustimento e os procedimentos construtivos especificados, bem como o necessário registo das características do maciço encontrado [2].

A construção de um túnel em meio urbano permite minimizar interferências com achados arqueológicos ou problemas relacionados com infra-estruturas ou

redes. Frequentemente as escavações em meio urbano são realizadas a pequena profundidade, condicionando a sua execução a maciços de menor resistência e mais heterogêneos, o que aumenta a probabilidade de induzir assentamentos à superfície. A pequena cobertura facilita o acesso de mais meios de prospecção às cotas de escavação e a aplicação de equipamento de instrumentação. Entretanto, o aumento das coberturas para algumas centenas de metros poderá minimizar problemas de propagação de vibrações e/ou ruídos para a superfície, assim como de subsidências. Os túneis longos e profundos, escavados em zonas montanhosas, necessitam muitas vezes de diversas frentes de ataque, sendo por vezes também condicionados pelos traçados e emboquilhamentos desses mesmos ataques. Por outro lado, a escavação de túneis profundos poderá ser dificultada pelo comportamento não elástico do maciço, onde a viscosidade e a plasticidade não são tão favoráveis à abertura de escavações. Poderão ainda dificultar a abertura de túneis profundos fenómenos de “rockburst” (explosões de rocha), queda de blocos, destaque de lascas ou “squeezing” (fecho da secção por efeito da pressão), o aumento da pressão de água ou o aumento da temperatura. Entretanto, os métodos de prospecção a grande profundidade são onerosos, demorados e complexos, e nem sempre facilitam a definição dos modelos geológico-geotécnicos e a caracterização dos maciços às cotas interessadas pelas obras em questão.

2. OBSERVAÇÃO DA SUPERFÍCIE E CARTOGRAFIA GEOLÓGICA

No projecto de um túnel, a primeira contribuição técnica é dada pela intervenção do geólogo, que, observando a superfície do local da futura obra subterrânea, poderá ajudar na redução das incertezas com que se parte para um projecto desta tipologia. Nas primeiras fases do projecto o engenheiro é, provavelmente, menos importante que o geólogo [3]. As observações da superfície permitem descrever as formações e estruturas geológicas ao longo do alinhamento do traçado em estudo. A fotografia aérea do relevo é um ponto de partida para a análise da complexidade morfológica das formações, sendo também as cartas geológicas elementos indispensáveis. Obviamente, quanto mais profunda a obra, mais difícil a correlação do que se observa à superfície com o que se prevê em profundidade e mais necessária se torna uma intuição psicologicamente colorida [1].

Nos projectos de túneis, são as cartas geológicas que informam sobre os diversos tipos de formações e estruturas geológicas aflorantes, assim como permitem a previsão da disposição, em profundidade, das formações e estruturas geológicas. Os levantamentos geológicos e estruturais de superfície, realizados com precisão adequada à fase de projecto, são sempre necessários. É na cartografia geológica que se pode obter o estilo tectónico regional; no entanto, não fornece toda a informação necessária a uma compreensão de pormenor do que se irá detectar em

profundidade e que permita a definição do modelo geológico-geotécnico e a caracterização do maciço local. Além da carta geológica, poderá também ser necessária a preparação de uma carta geotécnica que traduza a estabilidade, alteração e/ou resistência das formações geológicas cartografadas, principalmente para as bocas dos túneis. Tendo em vista uma nova obra subterrânea, deverá ainda ser elaborada uma carta hidrogeológica ou, no mínimo, deverão ser registadas na carta geológica as características particulares que possam conduzir a problemas causados pela influência de água nas escavações.

Além da análise de cartas geológicas existentes ou elaboração de carta geológica adequada, apoiada na fotografia aérea, aero-fotogrametria, cartografia por meio de satélite e topografia, serão entretanto necessários trabalhos de campo com vista à caracterização geológico-geotécnica do maciço, tendo por base os afloramentos existentes que, na maior parte dos casos se apresentam descontínuos e cobertos por depósitos ou pelo tecido urbano. Esta actividade pode e deve ser realizada em simultaneidade com os trabalhos de campo necessários para a elaboração da carta geológica e/ou geotécnica. Nesta fase, é possível a colheita de dados fundamentais para uma primeira abordagem a qualquer trabalho de geologia de engenharia. É importante a identificação, recolha e interpretação da informação geológica útil para o projecto pois, apesar da prospecção, a realizar numa fase posterior, ser, sem dúvida, uma informação fundamental na definição do modelo geológico, os primeiros dados procedentes dos afloramentos não deixam de ser a peça fulcral [4]. Os métodos para colheita dessa informação não mudaram muito nas duas últimas décadas, não se tendo ainda encontrado substituto para os trabalhos de campo, fundamentais para a elaboração de uma adequada caracterização geológico-geotécnica [5].

Nos projectos a desenvolver em meio urbano, a grande dificuldade na investigação de superfície prende-se, por vezes, na raridade de afloramentos resultante da proliferação da malha urbana [6]. Idêntica escassez pode, por vezes, também ocorrer em zonas não urbanas com grande cobertura de solos provenientes ou não da alteração das rochas locais e de vegetação densa. Taludes de estradas e pedreiras antigas ou actuais são as zonas ideais para a recolha de informação sobre os maciços que se pesquisam.

Uma contribuição importante da geologia de engenharia no estudo de traçado de túneis prende-se com o desenvolvimento do seu eixo e a variabilidade de formações e estruturas geológicas que poderá atravessar, assim como as suas relativas posições e orientações. Os possíveis traçados e características geológico-geotécnicas deverão ser ponderados de forma a permitir a escolha de uma ou mais soluções possíveis, a aprofundar, apoiada nos modelos geológicos, elaborados tendo em consideração a cartografia geológica e observação de superfície.

Em túneis pouco profundos em meios urbanos, é importante, quando possível, conhecer os alinhamentos estruturais e as famílias de descontinuidades existentes.

No entanto, os aspectos relacionados com a meteorização do maciço, que pode ser intensa no caso de coberturas reduzidas, ultrapassam por vezes a importância da geologia estrutural. Em túneis profundos, pelo contrário, é fundamental uma análise da compartimentação do maciço e a identificação das estruturas geológicas mais relevantes.

A identificação das zonas meteorizadas é importante nos emboquilhamentos e traçados próximos da superfície, onde as coberturas são menores, agravando as condicionantes geotécnicas associadas às zonas mais superficiais. No entanto, nem em todos os maciços se encontra a sequência típica de um perfil de meteorização e, portanto, há também bocas de túneis enquadradas em maciço rochoso são.

Os problemas de rebaixamentos dos níveis freáticos e subsidências estão fundamentalmente associados a túneis de coberturas mais reduzidas. Não é, no entanto, totalmente seguro que não originem impactes ambientais em traçados profundos.

Em túneis para circuitos hidráulicos com revestimentos flexíveis (geralmente túneis profundos) pressões internas excessivas de água e perdas de água do túnel poderão também causar deslizamentos à superfície. Para evitar estas situações, a localização dos circuitos hidráulicos terá que ser criteriosamente analisada em função das coberturas e estruturas geológicas relevantes.

Nestes circuitos hidráulicos, tendo em vista evitar fugas de água, deverá ser analisada a existência de estruturas geológicas que, de alguma forma, facilitem a percolação para a superfície, túneis de acesso ou restituição, principalmente nas zonas das bocas e de passagem por linhas de água coincidentes com menores coberturas [7]. Falhas e zonas de fraqueza requerem especial atenção nas escavações subterrâneas, dado que a sua estrutura, composição e propriedades podem ser muito diferentes do maciço envolvente, introduzindo alterações na rede de percolação teórica [8]. Tendo em vista esta preocupação, é relevante a definição do modelo hidrogeológico e de fracturação no projecto de circuitos hidráulicos, principalmente se não revestidos.

Resumem-se no Quadro I as actividades a desenvolver na fase inicial do projecto de obras subterrâneas, bem como as principais dificuldades associadas ao meio (urbano ou não urbano) onde estas se inserem.

3. PROSPECÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

“Um bom modelo geológico permite aos geólogos e engenheiros envolvidos no Projecto compreender as interacções dos diversos componentes que constituem a crosta terrestre e tomar decisões técnicas racionais baseadas nessa compreensão. Em empreendimentos em que não exista um modelo geológico adequado, apenas podem ser tomadas decisões “ad hoc” e o risco de problemas na construção devidos a condições geológicas não previstas é muito elevado.” [3]

Quadro I – Cartografia geológica e reconhecimento de superfície em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Observação da Superfície	Muito dificultada pela malha urbana. É fundamental a pesquisa de elementos cartográficos antigos. Alinhamentos estruturais de grande importância poderão ser detectados na observação de fotografia aérea que abranja região envolvente não urbana.	Dificultada pelas coberturas de solos e pelas coberturas vegetais, mas em geral é uma actividade com benefícios.
Cartografia Geológica	A existência de cartografia geológica antiga facilita o desenvolvimento destes trabalhos. É uma actividade de extrema complexidade a realizar neste meio. É útil a observação de qualquer talude ou de escavações em curso para implantação de novas estruturas.	Geralmente existem afloramentos que podem ser observados permitindo estudar a petrografia e a geologia estrutural. A fotografia aérea é muito útil. Em geral é uma actividade com proveito.
Reconhecimento de Superfície	Muito dificultada pela malha urbana. É útil a observação de qualquer talude ou de escavações em curso para implantação de novas estruturas.	Geralmente existem afloramentos que podem ser observados e estudados em pormenor permitindo apoiar a orientação final das escavações. Em geral é uma actividade com muito proveito.
Hidrogeologia	Dado que a generalidade das escavações se realizam em meios pouco profundos e alterados, é fundamental saber quais os graus de alteração e o tipo de formações mais superficiais.	Estas escavações terão um maciço envolvente quase impermeável. Torna-se, no entanto, imperativo o conhecimento pormenorizado das estruturas geológicas que poderão pôr em comunicação a superfície e as escavações.

Tendo em vista a definição dos traçados dos túneis, é recolhida informação fundamental nos trabalhos de cartografia geológica já referidos no capítulo anterior. No entanto, no decorrer e aprofundar dos conhecimentos e exigências do projecto, tornam-se necessários novos trabalhos que permitam obter indicações sobre o que se passa abaixo da superfície. Esses trabalhos, designados por prospecção, incluindo métodos geofísicos, sondagens, poços e galerias, devem ser encaminhados de forma a, por um lado, permitir completar o modelo geológico nos pontos onde existam dúvidas não esclarecidas pelo reconhecimento geológico de campo, e por outro lado, facilitar a realização de ensaios *in situ* e a obtenção de amostras para ensaios laboratoriais [4]. As campanhas de prospecção podem trazer grandes benefícios para a caracterização do maciço onde se pretende executar a obra, desde que não sejam impedidas por restrições ambientais, especificações ou complicadas condicionantes de execução. A cartografia geológica de superfície, com a inerente informação prévia do local e condições geológicas regionais, assim como os acessos e o objectivo do Projecto são condicionantes para o planeamento da campanha de prospecção [9].

Os objectivos principais dos trabalhos de prospecção, tendo em vista o projecto de uma obra subterrânea, são a obtenção de dados para apoio na definição e/ou pormenorização do modelo geológico, uma base para avaliação de potenciais problemas de instabilidade, obtenção dos parâmetros necessários para a análise

de estabilidade e dimensionamento dos suportes e revestimentos e uma base para avaliação do custo e preparação dos elementos para concurso.

Como referido por LOMBARDI (2001), a quantidade de trabalhos de investigação a desenvolver prende-se fundamentalmente por estabelecer uma aceitável relação benefício/custo. Este exercício pode-se tornar demasiado arriscado, não tanto por o custo dos trabalhos de prospecção estar subestimado, mas pelo facto de os benefícios da prospecção serem, por definição, indefinidos. Ou seja, com frequência só pode ser decidido se os benefícios dos trabalhos de prospecção foram ou não válidos após estar concluída a campanha de prospecção prevista. Existe contudo um limite razoável para os trabalhos a desenvolver na fase de projecto, que se prende com a necessidade da equipa projectista em obter conhecimento sobre as formações geológicas, de forma a não estar limitada na caracterização global das formações onde serão realizadas as escavações, bem como de forma a poder diminuir a quantidade de incertezas iniciais. A título de orientação a experiência parece indicar que, para um túnel de dificuldade média, se poderá aceitar, como valor orientador, que o comprimento total das sondagens seja superior a 50% da dimensão longitudinal do túnel [4]. Salienta-se, no entanto, que são mais frequentes os casos de obra em que após construção se considera que mais prospecção teria permitido uma diminuição dos custos e dos prazos do que o contrário, isto é, casos em que se considerou a prospecção excessiva [1].

Quadro II – Comparação entre os métodos mais utilizados na prospecção em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Geofísica por Métodos Sísmicos	Muito dificultada pela malha urbana e pelas infraestruturas. É mais proveitosa se realizada entre furos, com a possibilidade de obter parâmetros geomecânicos. Tem a grande condicionante do ruído urbano. O método de refração oferece melhores resultados que a reflexão.	Dificultada pelas coberturas vegetais mas, no geral, é uma actividade proveitosa. Pode ser realizada antes da prospecção mecânica, para apoio ao seu dimensionamento, e pode ainda ser utilizada entre furos, permitindo a caracterização do maciço nessa zona. Os métodos de reflexão possibilitam a prospecção a grande profundidade.
Sondagens e Poços	Os poços podem ser adequados principalmente nos emboquilhamentos. É facilmente exequível atingir com sondagens profundidades que ultrapassem a soleira dos túneis. A localização das sondas é dificultada pelo tecido urbano. Poderá ter interesse o uso da recente técnica de sondagens direccionadas.	Por vezes pode ser complicado o acesso das sondas a alguns locais. É dispendioso e moroso prospectar até às cotas de implantação das obras. As sondagens em avanço realizadas a partir das frentes de escavação permitem contornar esta dificuldade. O desenvolvimento das técnicas de sondagem direccionada poderá vir a ser útil para ultrapassar algumas dificuldades.
Galerias de reconhecimento	Não é frequente a realização de galerias de reconhecimento, a não ser, por vezes, em avanço, nos túneis.	As galerias de reconhecimento são principalmente realizadas para prospecção em locais de cavernas, no entanto, só é possível a sua realização após execução de túneis de acesso.

No âmbito das obras subterrâneas, o recurso a trabalhos de prospecção não se verifica apenas na fase de projecto. Muitas vezes é também necessário, já no decurso da escavação, o recurso a sondagens ou métodos sísmicos para aprofundar o conhecimento do maciço na frente de escavação e diminuir o grau de incertezas sobre o que se irá encontrar para lá dessa frente. O modelo geológico é uma ferramenta dinâmica que vai mudando à medida que aumenta a informação. Num empreendimento subterrâneo o maior volume de informação aparece no decurso da escavação. O modelo geológico é continuamente refinado à medida que se avança pelas diferentes fases do Projecto [3].

No Quadro II apresentam-se as dificuldades de aplicação dos principais métodos de prospecção em meio urbano e em meio não urbano.

4. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Em meio urbano, dada a reduzida profundidade dos traçados, é possível a realização de ensaios *in situ* e a obtenção de amostras para ensaios laboratoriais em fases precoces de projecto. Em obras subterrâneas profundas e quando não for viável obter amostras representativas com os métodos de prospecção, tais ensaios apenas são passíveis de realizar quando se atinjam as cotas de projecto, por meio de túneis de acesso. Na análise e interpretação dos resultados dos ensaios de laboratório e de campo é importante verificar se os resultados obtidos são representativos e se traduzem a realidade do maciço *in situ* (Quadro III).

Quadro III – Ensaios de caracterização em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Ensaios laboratoriais	Facilidade de recolha de amostras representativas do maciço onde se insere a obra.	Por vezes é complicada a obtenção de amostras do maciço à cota da obra, sendo necessário extrapolar parâmetros, a partir da caracterização de amostras mais superficiais.
Ensaios <i>in situ</i>	É exequível a realização de ensaios <i>in situ</i> em fases precoces dos estudos de caracterização.	São possíveis apenas após construção de túneis de acesso.

5. RELATÓRIOS E MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

O conjunto de actividades acima descritas, desenvolvidas no âmbito da Geologia de Engenharia, e seus resultados, deverão ser englobados num relatório.

De acordo com o EC7, o designado Relatório de Caracterização Geotécnica, que serve de base ao Relatório do Projecto Geotécnico, deverá incluir toda a informação de âmbito geológico relevante para a obra. Numa obra subterrânea, inserida nas categorias geotécnicas 2 ou 3, dada a grande componente geológica que constitui esse documento, considera-se que o relatório que serve de base ao Relatório de Projecto Geotécnico deveria ser designado por Relatório de Caracterização Geológica e Geotécnica.

Para que o dimensionamento geotécnico seja adequado, é importante dispor-se de um bom modelo geológico-geotécnico. Os modelos geológicos devem ser fáceis de assimilar e de interpretar por todos os que intervêm no dimensionamento e na obra. Nesse sentido as empresas de projecto deveriam investir em produtos que permitissem a construção rápida de blocos diagramas, processos já utilizados para a indústria petrolífera. Se a visão tridimensional é importante para entender o modelo geológico-geotécnico do maciço numa caverna, também, apesar do seu cariz linear, não deixa de ser relevante para túneis, onde os efeitos laterais são condicionantes para a estabilidade.

Quadro IV – Classificações de maciços em meios urbanos e não urbanos.

Obras subterrâneas	Urbanas Pouco profundas	Não Urbanas Médias a grandes profundidades
Formações Predominantes	Solos ou maciço rochoso com comportamento de solo.	Maciço rochoso com descontinuidades.
Classificação de Maciços	A profundidade e a meteorização do maciço condicionam a utilização das classificações. Poderão ou não ser usadas as classificações a título indicativo e no sentido de permitir o zonamento. O sistema Q entra em consideração com a cobertura. Estando perante um maciço intensamente meteorizado, cujo comportamento seja o de um solo, a classificação do NATM será a mais indicada.	São aplicáveis, de modo geral, todas as classificações abordadas: NATM, RMR, Q e GSI.
Condições Geológicas Singulares	Associadas à heterogeneidade do maciço; geralmente blocos resistentes em solos ou rochas alteradas. No caso de maciços ricos em argilas expansivas, poderão surgir fenómenos de expansibilidade. Não está excluída a presença de falhas.	Zonas de falha mais ou menos tectónicas, por vezes associadas a dobras e carreamentos. Fenómenos de expansibilidade devido a afluições de água e fenómenos de fluência devido à acção de tensões.

6. CLASSIFICAÇÕES DE MACIÇOS NO APOIO AO PROJECTO E CONSTRUÇÃO

As classificações de maciços, apesar da subjectividade associada, são muito úteis na fase de estudo prévio, tendo em vista o zonamento do maciço e orçamentação da obra. Em maciços cujas características se saiba não conduzirem a situações críticas de instabilidade, poderão inclusive ser usadas, em conjunto com a experiência adquirida, para a escolha de soluções de sustimento. Visto que em

meio urbano, e às profundidades a que se inserem as obras subterrâneas, o maciço apresenta, muitas vezes, comportamento de solo, nem sempre são aplicáveis as classificações que visam o zonamento do maciço.

A classificação utilizada no NATM (New Austrian Tunnelling Method), sendo descritiva do comportamento do maciço quando sujeito a uma escavação subterrânea, adequa-se a todos os meios; no entanto, na base do zonamento associado à classificação do NATM, para apoio à interpretação e conjugação da informação, é, muitas vezes, necessário o recurso a outras classificações (Quadro IV), como GSI, RMR ou Q (que se baseiam na análise dos elementos recolhidos nas fases antecedentes dos trabalhos), sendo, posteriormente, cada zona geomecânica enquadrada numa classe de comportamento. Esta classificação qualitativa pode também ser útil para a percepção do comportamento do maciço, mesmo quando usadas classificações quantitativas.

A utilização sistemática das classificações RMR (rock mass rating) e do sistema Q (index Q), e pontual do GSI (Geological Strength Index), nas frentes de escavação de Venda Nova II, mas também a experiência acumulada de outras obras subterrâneas — casos do Alto Lindoso, Caldeirão, Sabugueiro, Foz Côa e Cefra — levam a tecer as considerações que seguidamente se apresentam.

A utilização da classificação de Bieniawski (RMR) em zonas de falha ou zonas muito meteorizadas não se revela adequada; frequentemente há necessidade de optar por um tipo de suporte, considerado eficiente, que corresponderia a um valor de RMR mais baixo do que o somatório dos parâmetros do método. Para zonas de falha sem água, o valor mínimo de RMR é 23, recomendando Bieniawski que o suporte seja aplicado até 10m da frente de escavação; intuitivamente observa-se, com frequência, que esse afastamento não se afigura adequado para o comportamento que o maciço apresenta na escavação (ressalva-se, no entanto, que esta situação depende muito da secção de escavação). Quando o maciço evidencia fracas características geomecânicas, a classificação GSI, mais imediata e intuitiva, parece ajustar-se melhor ao comportamento real do maciço que a classificação RMR. Ainda em relação à classificação de Bieniawski, considera-se que as descontinuidades com direcção perpendicular ao eixo do túnel e pendor entre 20° e 45° a favor da escavação deveriam ter o mesmo peso para ajuste na classificação do RMR que as descontinuidades com o mesmo pendor, mas contra a escavação, ou seja, deveriam também ser consideradas desfavoráveis. Com efeito, a presença de tais descontinuidades num maciço de boas características geomecânicas implica a utilização de pregagem sistemática na abóbada, quer o pendor das diaclases seja a favor ou contra a escavação.

A classificação de Barton, apesar de numa primeira análise poder parecer complexa para aplicação na frente de escavação, revela-se relativamente expedita. É uma classificação que se enquadra num método muito versátil de construção de túneis, que para a escolha do suporte tem em consideração, além das características

do maciço, a secção de escavação, as tensões *in situ* e/ou presença de falhas e a função da obra.

Dada a subjectividade associada às classificações de maciços, é aconselhável utilizar e confrontar mais do que uma classificação. Devido à relação entre a dimensão da escavação e a geoestrutura, a rotura é frequentemente condicionada por esta última. A atribuição de um determinado tipo de sustimento/revestimento deverá ter em consideração não apenas a classificação da frente de escavação, mas também as características da envolvente, por exemplo, eventual proximidade de contactos litológicos, não visíveis nas superfícies escavadas.

7. OBSERVAÇÃO DE OBRAS SUBTERRÂNEAS

A monitorização tem um papel imprescindível, principalmente no acompanhamento de obras subterrâneas em meio urbano e/ou próximo da superfície, no caso de grandes secções de escavação, e/ou em condições geológicas singulares. A interpretação conjunta dos resultados da monitorização e das características geológicas locais permite adequar metodologias e sustimentos a aplicar. Em escavações realizadas em maciços de boas características geomecânicas, geralmente profundos, o método de escavação mais utilizado (explosivos) dificulta a utilização de instrumentação próximo da frente de escavação, onde se verificam as maiores deformações.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Geologia, como base de conhecimento da crosta terrestre, deverá sempre constituir o ponto de partida para um adequado dimensionamento de qualquer obra subterrânea. A observação de superfície é insubstituível e o reconhecimento de superfície imprescindível, apesar das dificuldades muitas vezes associadas a este tipo de actividades. Uma boa cartografia geológica revela-se fundamental para o arranque de um projecto de Geoengenharia.

A Geologia de Engenharia contribui, em conjunto com a Geotecnia, para a Geoengenharia. A Geologia detém o conhecimento profundo da crosta terrestre onde se desenvolverá a obra subterrânea e constitui a base do trabalho a desenvolver, sendo ao modelo geológico que se deverá recorrer para interpretar e esclarecer dúvidas. Existem actividades do âmbito da Geologia, como a cartografia, reconhecimento de campo, e as campanhas de prospecção, que, quando interpretadas à luz da Geologia de Engenharia e, em conjunto com a caracterização geotécnica do maciço, permitem definir o modelo geológico-geotécnico. A parametrização e a monitorização são actividades de colaboração entre a Geologia de Engenharia e

a Geotecnia. As actividades que envolvem o cálculo e o dimensionamento da escavação são da responsabilidade do geotécnico, que, obrigatoriamente, deverá ser crítico perante os resultados obtidos nos cálculos realizados, tendo presente que nos modelos numéricos se torna difícil a simulação de materiais naturais, muitas vezes com estruturas heterogéneas associadas.

Por último, salienta-se que num Projecto de Geoengenharia é fundamental a intervenção de Geólogos de Engenharia e de Geotécnicos, numa equipa indissociável, trabalhando como um todo e com o mesmo objectivo. Cada elemento deve constituir um elo imprescindível, perfeitamente conhecedor quer das suas funções e competências, quer das dos restantes intervenientes.

Dada a particularidade da Geoengenharia, que lida com materiais naturais, as empreitadas para a construção de obras subterrâneas deveriam ser âmbito de legislação específica.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] LOMBARDI, G., 2001 – “Geotechnical Risks for Project Financing of Tunnels in Non-Urban Areas”. *Tribune*, nº20, ITA-AITES, pp. 19-23.
- [2] GOODMAN, R.E., 1993 – “*Engineering Geology - Rock in Engineering Construction*”. John Wiley and Sons, New York.
- [3] HOEK, E., 1999 – “Putting Numbers to Geology - an Engineer’s Viewpoint”. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 32, pp. 1-19.
- [4] GALERA FERNÁNDEZ, J.M., 2000 – “Caracterización geomecánica de macizos rocosos”. *Manual de Túneles y Obras Subterráneas*. Carlos López Jimeno - UPM, Madrid, pp. 143-182.
- [5] HOEK, E., 2001 – “*Rock Engineering - Course Notes*”. www.rockscience.com.
- [6] CLAYTON, C.R.I., MATHEWS, M.C., SIMONS, N.E., 2000 – “Site Investigation”. Blackwell Science, Oxford, England.
- [7] BROCH, E., 1985 – “Development of Unlined Pressure Shafts and Tunnels in Norway”. *Norwegian Hydropower Tunnelling*. Tapir Publ., Trondheim, Norway, pp. 23-30.
- [8] BUEN, B., PALMSTRÖM, A., 1985 – “Design and Supervision of Unlined Hydropower Shafts and Tunnels with Head up to 590 meters”. *Norwegian Hydropower Tunnelling*. Tapir Publ., Trondheim, Norway, pp. 65-72.
- [9] QUIRALTE LÓPEZ, F., 1998 – “Investigaciones in situ”. *Ingeo Túneles - Libro 1*. Carlos López Jimeno - Entorno Grafico, Madrid, pp. 69-97.

RECONHECIMENTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO DO CANAL HIDROELÉCTRICO DO CONTADOR (REPÚBLICA DEMOCRÁTICA DE SÃO TOMÉ E PRÍNCIPE)

PAULO H. ALVES¹

PALAVRAS CHAVE: deslizamento, escorregamento, São Tomé, geologia, geotecnia, riscos naturais.

KEY WORDS: Landslide, mudflow, rockfall, São Tomé, natural hazards, geotechnics.

RESUMO

O Aproveitamento Hidroeléctrico do Contador está em operação desde 1967 mas, funcionando de forma deficiente, foi atribuído em 1988 à EDP o projecto da sua reabilitação. Descreve-se o reconhecimento geológico e geotécnico do canal de adução, destacando-se as características locais, bem como os métodos de trabalho seguidos.

Esse reconhecimento incidiu sobretudo sobre três troços do canal que apresentavam risco de rotura, onde a reparação do canal interfere francamente com o maciço rochoso: 1. A ponte-canal do Rebordelo, construída para substituir um troço responsável por um deslizamento que, em 1974, não só o destruiu mas soterrou uma aldeia. 2. A zona da Oca, em que o canal está assente num cone sedimentar recente, em fase de subsidência e que já protagonizou diversas roturas. 3. A captação Cascata, situada na base de uma queda de água que escavou um poço cilíndrico no seio da encosta de forte pendente e destruiu a captação. Dado o bom estado de conservação dos túneis existentes, a solução proposta para cada troço passa pela construção de um novo túnel. São referidas diversas características locais que afectam reconhecimentos e empreitadas, e salienta-se o contraste entre a dimensão

¹ Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT), Centro de Geologia, Alameda Dom Afonso Henriques, 41-4ºD, 1000-123 Lisboa, Portugal phalves@iict.pt, Geólogo da Electricidade de Portugal (EDP), em 1988.

da EDP, empresa vocacionada para grandes empreendimentos, entregue com sucesso ao projecto de reabilitação deste pequeno canal.

ABSTRACT: Geological and geotechnical surveying along the hydraulic channel of the Contador river (R.P.S. Tomé e Príncipe)

The headrace channel of the Contador hydroelectric scheme (2.4 MW; 1500 m³h⁻¹) presented several malfunctions generally related to natural hazards or due to inefficient maintenance. The 7.4 km long channel follows the 600m contour line on a remote mountain slope of the São Tomé island (oceanic sector, Cameroon Volcanic Line, Gulf of Guinea) where the pattern of precipitation registers an annual value of ~2500 mmy⁻¹.

The geotechnical assessment was conducted in 1988 to deliver the necessary data for the rehabilitation project, referring particularly to three sites of the channel where destruction seemed imminent (Rebordelo, Oca, Cascata). This danger was justified as disaster had already struck one of these sites, the village of Rebordelo and the nearby channel, both destroyed by a landslide with an official death toll of 33 victims. The cause of the mass movement was mainly external, related to polyphased and successive land-use interventions including the construction of the headrace channel that was related to the trigger mechanism, together with heavy rain causing preliminary fracturation.

As fieldwork was often carried out during heavy rain, several small slides, rockfalls and debris flow were observed first-hand; mass movement is a major component of this humid tropical morphogenetic system. To assess the situation on the main three areas at a site scale, colour prints made as stereo-pairs as seen from the opposite hillside were used, as well as preliminary mapping. The underground part of the channel totals 1.8 km, with 8 tunnels that are stable and generally well preserved. The assessment concluded that three new small tunnels are the best solution for the problems encountered.

1. INTRODUÇÃO

O Aproveitamento Hidroeléctrico do Contador está em operação desde 1967, constituindo desde então a principal central eléctrica da ilha de São Tomé (2,4 MW). O canal de adução de água tem uma secção quadrada de 0,7 m, uma extensão de 7,4 km e 6 captações. Está implantado na encosta da margem esquerda do rio Contador, à cota 600 m e drena uma das regiões de maior precipitação na ilha. Cerca de 2000 m do canal estão distribuídos por 18 pontes e 8 túneis, o maior destes com 550 m de extensão.

Este Aproveitamento funcionava desde 1974 com interrupções e avarias, frequentemente atribuídas ao canal de adução de água. A Electricidade de Portugal (EDP) foi encarregada da reabilitação da obra, no âmbito da cooperação entre os dois países. O canal foi assim objecto, em 1988, de uma peritagem com reconhecimento geológico e geotécnico, sendo as situações apresentadas neste texto referidas a esse ano. A sua apresentação é aqui feita, não numa perspectiva histórica, mas antes como relato de um reconhecimento *sui generis*, adoptando metodologias de trabalho básicas e simples, mas produtivas para a avaliação pretendida. Tratou-se de um trabalho de geotecnia curioso e muito distinto do praticado nas obras da EDP então em curso.

A afectação desta obra à EDP constituiu também um facto interessante, pelo contraste de dimensão entre esta grande empresa, representando uma capacidade técnica moderna e dinâmica vocacionada para grandes empreendimentos térmicos ou hidroeléctricos e, por outro lado, o seu envolvimento na reabilitação de uma simples levada, em zona de clima e ambiente agrestes nas montanhas de São Tomé, país sem infra-estruturas adequadas e onde o modo de estar e actuar apenas seria produtivo se adaptado aos condicionalismos locais.

A especificidade própria do reconhecimento que se descreve é assaz curiosa, decorrendo de uma realidade africana própria e que ainda hoje se mantém semelhante, passados 15 anos, sendo francamente distinta daquela em que decorreram quer a construção da obra, na década de 60, quer os levantamentos geológicos do Professor Coteló Neiva¹, empreendidos nos anos 50. A recolha de informação sobre a geologia local contou com o seu apoio, já que efectuara, então como investigador, estudos e cartografia geológica em São Tomé e Príncipe, tendo publicado diversos trabalhos sobre a geologia do Arquipélago.

2. ENQUADRAMENTO GERAL

A ilha de São Tomé situa-se no Golfo da Guiné e tem uma superfície de 857 km². Corresponde a um relevo que se ergue abruptamente, desde o fundo oceânico, a cerca de 3000 m de profundidade, até à cota máxima de 2024 m, situada apenas a 7 km da costa oceânica e a 8 km do Canal do Contador.

O Arquipélago está inserido no sector oceânico do alinhamento vulcânico dos Camarões (*Cameroon Volcanic Line*) e os dados geocronológicos existentes indicam uma idade de formação de *c.* 13 Ma (FITTON & DUNLOP 1985). A litologia predominante em S. Tomé é de composição basáltica a fonolítica, constituída por lavas e piroclastos, observando-se na área do Canal do Contador, situado no NW montanhoso

¹ Colaborador da EDP. Geólogo responsável pelo estudo geotécnico e apoio às fases de projecto e obra da maioria dos aproveitamentos hidroeléctricos explorados pela EDP.

da ilha, afloramentos de basaltos, traquifonólitos e fonólitos (Complexo Vulcânico de S. Tomé, < 1 Ma, CALDEIRA *et al.* 2003), brechas vulcânicas e outros depósitos brechóides, ocorrendo ainda solos espessos e depósitos de vertente mais ou menos consolidados ou tipo *lahar*.

O padrão de precipitação é caracterizado, consoante o local da ilha, por uma precipitação média anual que varia entre valores máximos e mínimos de 5200 e 700 mm y⁻¹, enquanto a precipitação diária máxima varia entre 322 e 140 mm. A zona abordada neste estudo regista um valor da ordem de 2500 mm y⁻¹, sendo caracterizada por floresta e vegetação densa, incluindo ainda zonas agrícolas, activas ou não, sobretudo de produção de cacau.

3. RECONHECIMENTO. OBSERVAÇÕES GERAIS

O acesso ao canal é feito a pé, situação esta que dificulta o transporte de equipamentos, sobretudo em troços com túneis ou pontes. Esta situação será de rever antes do início da obra de reabilitação, pois em 1988 e com jipe, apenas se atingia a própria câmara de carga, ou então um ponto localizado 5 km a montante, a uma distância de 800 m da ponte-canal do Rebordelo. Esta situação devia-se não só a aluimentos, mas também ao desenvolvimento da vegetação.

Os movimentos de massa nas encostas da região são frequentes. Tendo o trabalho de campo sido conduzido frequentemente durante chuvadas intensas, foi observada a ocorrência na região de pequenos *slides* e de quedas de pedras nas encostas, bem como de excesso de caudal no canal, com inundações da sua plataforma lateral e solos envolventes, facto este que está relacionado com a reduzida eficácia demonstrada pela equipa local de manutenção do canal.

Na observação de obras na região, constatou-se que é vulgar recorrer a taludes altos, verticais e sem contenção, sendo assumidos riscos impensáveis na Europa. Transitando na estrada marginal junto a Neves, após 6 horas de chuva foram observados, ao longo de cerca de 3 km, dez locais com quedas de blocos que chegavam a atingir 80cm de diâmetro. O caso oposto também se verifica, com taludes verticais e estáveis, de altura até 12 m, abertos em brechas vulcânicas, depósitos de vertente consolidados e conglomerados.

3.1. SITUAÇÃO GERAL DO CANAL DO CONTADOR

A avaliação geral de todo o traçado do canal permitiu tecer as seguintes observações, em que apenas o último ponto, referente à situação dos túneis, não penaliza a exploração do aproveitamento. As situações mais delicadas registam-se em três troços particulares que são apresentados mais adiante (3.2).



Foto 1 – Exemplo de um troço do Canal do Contador (a tracejado) coberto por depósitos de vertente. A zona encontra-se em desobstrução, vendo-se ao fundo a entrada de um dos túneis.

Depósitos de vertente e queda de pedras sobre o canal. Devido às características das encostas da região, verifica-se a formação de depósitos de vertente sobre o canal, os quais atingem, localmente, 6 m de espessura (foto 1). Estes materiais provocam a sobrecarga e eventual instabilização em zonas de aterro, impossibilitando, por vezes, a percepção do trajecto seguido pelo canal e assim a sua visualização e limpeza. Observam-se diversos blocos caídos sobre o canal, por vezes causando fracturação nas lajetas ou nas paredes do canal. Um bloco de 2 m³ caído sobre o canal, exactamente a jusante de uma chaminé fonolítica que aflora no topo da encosta do Rebordelo, atesta o risco a que o canal está sujeito, comprovado também pela designação de Curva do Soldado, dada a outro local em que uma queda de pedras matou um trabalhador.

Preenchimento do canal com raízes. O desenvolvimento rápido da vegetação não ocorre apenas nas encostas, verificando-se a penetração de raízes no canal, irrompendo pelas juntas existentes ou fracturando mesmo o betão. O desenvolvimento de raízes vegetais dentro de água é frequente, observando-se raízes e caules que atingem 40 cm de diâmetro (foto 2).



Foto 2 – Raiz retirada do interior do canal. (foto Soares Júnior)

Captações. Correspondem em geral a um dique-d Descarregador, com descarga de fundo e tomada de água. Como as descargas de fundo não eram abertas periodicamente, o assoreamento atingiu a crista dos descarregadores, com blocos que destruíram alguns órgãos de manobra das comportas, pelo que as captações estão subaproveitadas ou em ruína.

Túneis. Os túneis estão em geral bem conservados, constituindo os troços mais estáveis do canal, embora frequentemente inundados devido a drenagem insuficiente. Este facto dificulta a marcha na soleira lateral, raramente nivelada, onde a água atinge, por vezes, 50 cm de altura. Foram observadas algumas situações raras de fissuração ou de infiltração de água no betão do revestimento. A secção dos túneis é da ordem de 3,5 m², sendo revestidos apenas em cerca de 30% da sua extensão. A litologia observada na maioria dos túneis corresponde a rochas piroclásticas e a brechas vulcânicas, incluindo blocos que atingem 40 cm; esta última característica está relacionada com a sobrecavação notável que se observa e que atinge pontualmente um metro em relação à secção teórica.

3.2. AVALIAÇÃO DAS ZONAS CRÍTICAS: REBORDELO, CASCATA E OCÁ

Estes três troços do canal constituem os locais que apresentam maior risco de rotura, onde a reparação interfere com um maciço rochoso por caracterizar.

Métodos de trabalho. Para este reconhecimento não estava previsto o recurso aos métodos de prospecção geotécnica usuais (tais como sondagens e prospecção geofísica) devido, quer à urgência de completar o projecto e iniciar a obra, quer à dificuldade de transporte de equipamentos. O método de trabalho seguido no reconhecimento destes troços incluiu o levantamento topográfico expedito (feito na escala 1:250, com bússola, nível e fita), necessário para implantar e comparar em tempo útil diversas soluções, uma vez que a poligonal entretanto iniciada pela equipa de topografia só estaria disponível mais tarde. Também foram fotografadas diversas zonas do canal, a partir da encosta oposta, de forma a permitir estudos geomorfológicos por observação estereoscópica.

3.2.1. REBORDELO

Trata-se de uma zona com historial de movimentos de massa significativos, onde o Canal do Contador inclui actualmente uma caleira metálica em ponte, de aparência frágil, a exigir peritagem prioritária.

Em 1974 ocorreu aqui um deslizamento particularmente destrutivo (ALVES 2001, 2003), que teve como consequências o corte do canal e o desaparecimento da pequena aldeia de Rebordele, registando-se pelo menos 33 vítimas. O topo da área afectada foi a plataforma com o canal, ao longo de 60 m, a qual incluía ainda uma linha de vagonetas e o acesso ao túnel que se seguia a jusante; essa área apresentava um pendor suave, bem como os terrenos a jusante que incluíam o Rebordele, ao contrário da encosta a montante, de inclinação superior a 60°.

O troço destruído foi substituído em 1975 por uma ponte-canal, com fundação no basamento rochoso correspondente à cicatriz do deslizamento (foto 3; fig. 1). Esta ponte apresenta irregularidades várias, como é o caso do mau estado da caleira metálica e do seu passadiço, mas não há evidência de assentamentos.

Foto-interpretação. A avaliação da estabilidade histórica da zona recorreu a estudos de foto-interpretação. No levantamento aero-fotográfico existente, datado dos anos 50, são identificados nas proximidades dois escorregamentos, bem como cicatrizes de pequenos *slides*, alinhamentos de queda de pedras e ainda, na margem do rio Contador, ravinamentos e deslizamentos menores.

A geomorfologia e a estabilidade da encosta foram ainda estudadas recorrendo a fotografias em estereoscopia, obtidas em 1988 a partir da encosta oposta, o que permitiu evidenciar sobretudo os seguintes aspectos:

- a cicatriz de deslizamento, em forma de concha, é bem visível ao nível da ponte-canal, mas o relevo não denuncia devidamente, por si só, a área abrangida pelo movimento, bem marcada apenas pelo diferente estado de crescimento da vegetação, com árvores de grande porte apenas sobre a área não afectada;
- a ponte-canal está situada na concavidade morfológica correspondente ao topo da massa movimentada.

Características do deslizamento do Rebordelo. O deslizamento terá mobilizado a encosta numa área de 4 a 5 ha, constituída sobretudo por depósitos de vertente e rególitos, incluindo ainda o entulho proveniente da escavação do túnel. O volume transportado foi da ordem de $1,5 a 3 \times 10^5 \text{ m}^3$, numa distância e desnível máximos de, respectivamente 600 m e 200 m.

O escorregamento pode ser classificado como translacional e complexo (VARNES 1978), sendo devido a causas sobretudo externas, relacionadas com fases sucessivas de intervenção humana, que consistiram no abate da floresta, nos trabalhos agrícolas, na construção da plataforma e das infra-estruturas nela apoiadas. A causa imediata, também externa, foi a precipitação anormalmente elevada que se registou durante dois dias, induzindo assentamentos na plataforma e assim fracturação no canal, com inundação gradual e saturação do maciço subjacente pelo caudal transportado ($1500 a 1800 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$), seguindo-se a erosão e posterior rotura da encosta. Os dois únicos sobreviventes da aldeia referiram a ocorrência de *mudflows* pelo meio das casas durante cerca de um dia, o que sugere um intervalo de tempo dilatado entre a fractura do canal — com inundação da encosta — e a rotura da mesma.



Foto 3 – Ponte-canal com 47 m de extensão, vendo-se ao fundo a entrada do túnel já existente a jusante.

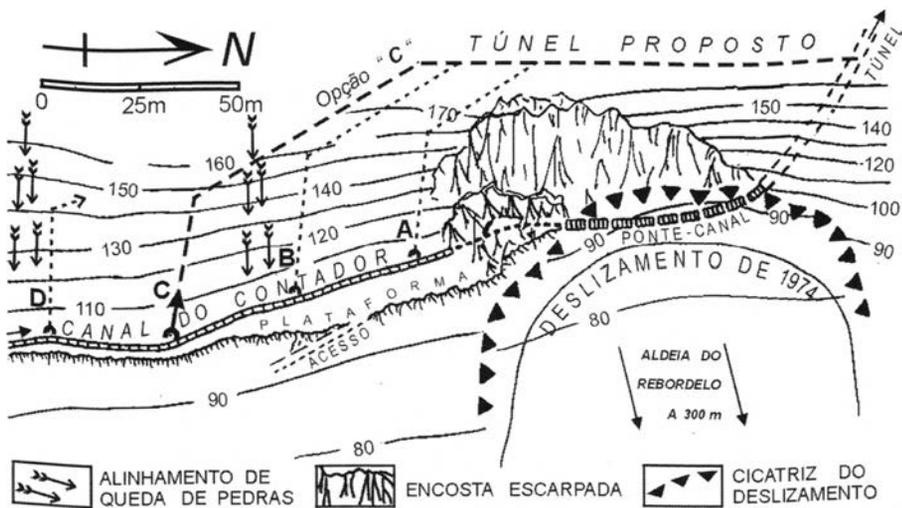


Fig. 1 - Canal do Contador no Rebordelo, com a cicatriz e topo da área abrangida pelo deslizamento de 1974, a ponte-canal construída em 1975, a plataforma não afectada pelo acidente, e o traçado recomendado para abertura de um novo túnel. Esboço extraído do levantamento topográfico expedito efectuado em 1988. Cotas não ligadas à rede geodésica nacional, atribuindo 100m à altitude do canal.

Recomendações. Propõe-se a abertura de um novo túnel, de forma a desactivar não só a ponte-canal, mas também o troço de canal em plataforma situado a montante desta; este troço tem 80 m de extensão e assemelha-se ao que foi destruído em 1974, pelo que pode estar sujeito a um acidente idêntico.

Na figura 1 estão representados vários traçados de túnel, sendo sugerida, como opção mais segura e económica, a hipótese C. Esta opção implica uma extensão de 212 m e está implantada num local em que a plataforma apresenta largura adequada para um estaleiro, situado fora de alinhamentos de queda de pedras.

Caso se opte por manter a obra como está, a sua segurança só ficará minimamente garantida verificando as fundações dos pilares da ponte-canal existente e fazendo uma revisão ao troço de canal em plataforma já referido. Neste troço será imperativo destapar o canal, para observar o estado das juntas e do betão, procurando também evidências de eventual assentamento do maciço.

3.2.2. CURVA DA OCA

Trata-se de um troço de 105 m, em que o canal descreve um semi-círculo com raio de 30 m (fig. 2), estando implantado numa formação branda, constituída por depósitos de vertente e, possivelmente, por materiais devidos a outros movimentos de massa. O traçado do canal a montante e a jusante desta curva é retilíneo, assente em rególito e rocha basáltica.

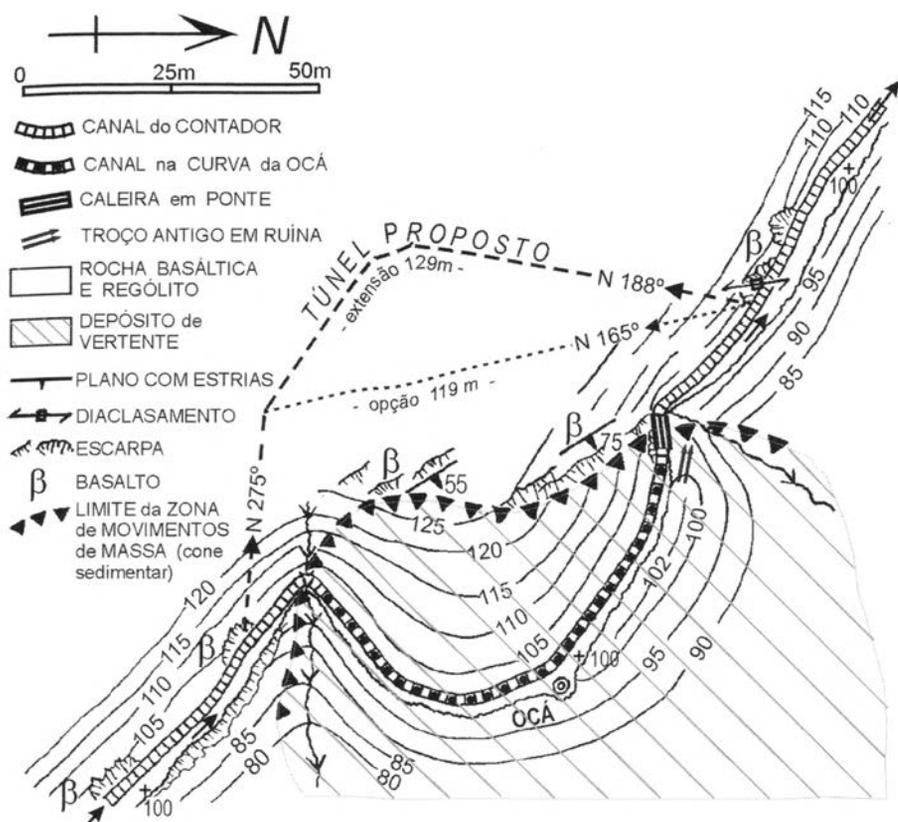


Fig. 2 – Canal do Contador na Curva da Ocá. No trecho em curva o canal contorna um cone sedimentar formado por depósitos de vertente, enquanto no trecho rectilíneo a montante e a jusante ocorrem rochas basálticas e rególito. Está indicado o traçado proposto para novo túnel. Esboço extraído do levantamento topográfico expedito efectuado em 1988; cotas não ligadas à rede geodésica nacional, atribuindo 100m à altitude do canal.

A meio da curva encontra-se uma imponente árvore – uma ocá com 2m de diâmetro – a qual está inclinada para o vale, o que denuncia *creeping* das camadas superficiais da encosta. Têm-se produzido assentamentos ao longo da curva, o que provocou fissuração no canal. Para evitar perdas de caudal foi inserido no canal um revestimento contínuo, constituído por caleira metálica.

Observam-se diversos aspectos que comprovam tratar-se de uma zona que pode sofrer assentamentos importantes ou rotura. O topo das paredes de betão do canal foi sucessivamente elevado, de forma a manter a cota do topo constante, sendo a altura destes “remendos” maior para jusante, atingindo 50 cm no fim da curva. Neste local encontram-se vestígios de dois antigos traçados que ruíram sucessivamente, estando parte do canal assente num muro de suporte que também

ruiu parcialmente em 1986; outra secção deste muro sofreu assentamentos graduais, pelo que tem sido aumentada no topo com pedra arrumada. O canal é aqui constituído apenas por uma caleira metálica em ponte, fissurada, com um vão de 4 m, onde se observam perdas de água.

A montante desta ponte observam-se afloramentos basálticos com estrias de movimento, desenhando, no seu conjunto, uma superfície ondulada secante aos dois extremos da Curva da Oca. Esta superfície corresponderá a uma cicatriz de movimentos antigos e separa as duas unidades presentes: – o maciço basáltico da encosta, e o cone sedimentar formado por movimentos de massa sucessivos.

Este cone sofreu um assentamento da ordem de 50 cm em 20 anos, bem como roturas periódicas e assentamentos maiores junto à ponte; os movimentos neste último local estarão relacionados com perdas de água que se têm aqui registado.

Recomendações. A substituição do traçado em curva por um túnel constituirá a solução mais segura, por evitar totalmente o cone sedimentar referido.

Na figura 2 estão representadas duas opções de traçado em túnel, vendo-se as direcções de emboquilhamento recomendadas, implantadas em rocha basáltica. Junto à boca de jusante observa-se, na falésia basáltica (foto 4), disjunção subvertical em placas e diaclasamento muito aberto. Embora se trate de túnel de secção reduzida, o traçado mais longo evitará que a obra seja paralela a essas descontinuidades.



Foto 4 – Canal do Contador, visto de jusante para montante. Falésia basáltica no local da saída do túnel proposto.

Foram apresentadas duas outras soluções para reabilitar a Curva da Ocá: – entubar o traçado actual, substituindo-o por uma conduta flexível; ou apenas nivelar e impermeabilizar a soleira do canal, colocando ainda no topo jusante da curva uma nova ponte-canal metálica. A impermeabilização do canal nesta zona é fundamental, pois a infiltração constante de caudais provenientes de fissuras no canal poderá inverter rapidamente o processo de consolidação do maciço.

3.2.3. CASCATA DO RIO DE ÁGUA ANGULAR

Constitui uma das principais captações do canal, incluída num maciço instável e sujeito a movimentos de massa, formado por rochas basálticas, piroclastos e brechas vulcânicas, estas últimas com blocos que atingem 60 cm.

Este afluente do rio Contador escavou, neste local da encosta, um troço em *canyon*, constituído por um “poço” com 25 m de altura e 20 m de diâmetro, onde o Rio de Água Angular forma uma cascata (fig. 3). Este “poço” prolonga-se até ao canal por um desfiladeiro, com 10 m de extensão, ao longo do qual foi construída uma derivação para transportar a água do dique, situado na base da cascata, até ao Canal do Contador; este canal atravessa o desfiladeiro por uma ponte, situada entre túneis. A cascata escavou o “poço” em depósitos de vertente, piroclastos e brechas, até atingindo basaltos, visíveis junto ao dique.

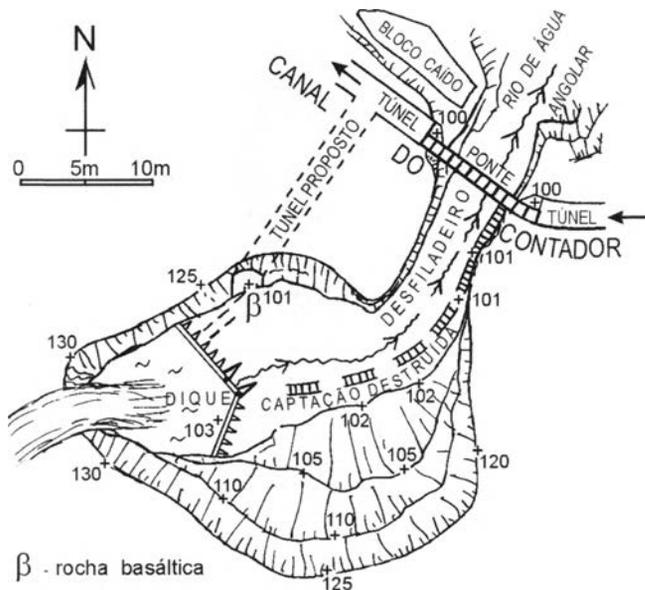


Fig. 3 – Canal do Contador na Cascata de Água Angular. Está representado o “poço” em que cai a cascata, bem como a localização dos túneis já existentes a montante e a jusante do desfiladeiro, e ainda o traçado aproximado do túnel proposto para ligar o dique ao túnel de jusante. Esboço topográfico expedito (cotas aproximadas, atribuindo 100m à altitude do Canal do Contador).

A fragilidade do troço deve-se, quer às paredes do desfiladeiro, uma das quais está profundamente erodida na base e apresenta uma fissura vertical que indicia a queda futura de um bloco, quer à derivação proveniente do dique, já destruída por deslizamentos e quedas de pedras, quer ainda ao assoreamento, com blocos que cobrem a crista do dique. A escarpa junto ao túnel de jusante está fissurada e também ameaça ruir, observando-se já um bloco caído com cerca de 250 m³.

Recomendações. Foi proposta a construção de um túnel com cerca de 15 m, com início em rocha basáltica, perto da base da cascata, terminando no túnel situado a jusante do desfiladeiro (fig. 3). A reabilitação deverá incluir uma nova descarga de fundo no dique, para substituir a que está destruída.

Como alternativa à construção do túnel, foi considerada a hipótese de refazer a obra à semelhança da destruída, mas substituindo a derivação em ruína por um canal ou conduta, enterrada na zona sujeita a queda de pedras. Outra alternativa considerada foi a construção de um açude no desfiladeiro, perto da ponte-canal, sendo a adução de água feita por um tramo de 2 m unindo as duas obras.

A obra de reabilitação deste troço será condicionada pela inexistência de acesso rodoviário próximo e pelo caudal, por vezes avassalador, da cascata.

4. NOTAS FINAIS

Dadas as características da zona em que está implantado, o Canal do Contador não ficará isento de problemas uma vez terminada a sua reabilitação. As actuais zonas críticas serão substituídas por outras, dado que se trata de uma obra que não ficará imune aos agentes externos.

O perigo de deslizamentos é uma constante, pois constituem uma componente importante do sistema morfogenético local, sendo frequentemente desencadeados por períodos de chuva intensa e prolongada. O caso trágico apresentado em 3.2.1., soterrando a única aldeia existente sob o canal e situada na zona mais modificada pelo homem ao longo de toda a margem esquerda do rio Contador, não foi mera coincidência, apontando ainda para deficiente monitorização da obra. Segundo THOMAS (1994), a ocorrência de movimentos significativos é praticamente certa com precipitação diária superior a 270 mm, sobretudo se associada a intensidades temporárias atingindo 70 mm h⁻¹.

As obras no canal apresentam perigos que não se verificam em obras clássicas da EDP e a escolha da melhor solução para cada zona deverá ter isso em conta, da mesma forma que a planificação dos trabalhos deverá atender às condições climáticas locais. Como exemplo, recomenda-se particular atenção nas seguintes situações: seleccionar bons condutores para viaturas que transitem em caminhos estreitos com ravinas, sobretudo em dias de chuva; evitar permanecer em zonas

de queda de pedras; exigir prudência ao desmatar locais de vegetação densa com cobras, evitando o uso apenas de simples catanas; promover a revisão do passadiço das pontes, sempre estreitas e sem condições para montar corrimão.

A manutenção e reparação constante do canal seria eficiente dispondo de pessoal motivado, apoiado por uma oficina eficiente e dotada de equipamento desmontável e fácil de transportar, única forma de eventualmente evitar, de forma sensata, as soluções aqui propostas. Mas a responsabilização das equipas locais de manutenção apenas poderia ser garantida praticando uma política de motivação adequada, viabilizadora dum nível de exigência superior. A realidade africana constatada em S.Tomé não indicia sucesso a esse nível.

A solução atrás proposta para cada caso, recorrendo basicamente à abertura de novos túneis, representa assim a opção mais segura e estável para a reabilitação do Canal do Contador, embora a mais dispendiosa a curto prazo.

AGRADECIMENTOS

À EDP, responsável pela missão de avaliação geotécnica realizada em 1988. Ao Professor Cotelo Neiva, não só pelas suas sugestões e pela cedência de dados geológicos inéditos, mas ainda pelo privilégio da sua companhia e orientação em projectos da EDP. Ao Eng. Soares Júnior, pela excelência da direcção dos trabalhos em São Tomé. Aos colegas do IICT, que actualmente finalizam a edição da Carta Geológica de São Tomé.

BIBLIOGRAFIA

- ALVES, P.H. (1988) – Avaliação da situação no canal do aproveitamento hidroeléctrico do rio Contador. Reconhecimento geológico. EDP, Porto, 28p. (rel.interno).
- ALVES, P.H. (2001) – Notes on a landslide event in São Tomé island (Dem. Rep. of São Tomé and Príncipe, Gulf of Guinea). 12th Conference, Geological Society of Africa, Yaoundé, Cameroun. *Journal Société Géosciences du Cameroun*, 1, 1A, 26-27.
- ALVES, P.H. (2003) – Notas sobre um deslizamento histórico ocorrido em São Tomé (Rep.Dem.S.Tomé e Príncipe). *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, n^oesp.V, G5-G7.
- FITTON, J.G. & DUNLOP, H.M. (1985) – The Cameroon line and its bearing on the origin of oceanic and continental alkali basalt. *Earth Planet.Sci.Lett.* 72, 23-38.
- CALDEIRA, R.; MADEIRA, J.; MUNHÁ, J.M.; AFONSO, R.S.; MATA, J.; TASSINARI, C.C. & NASCIMENTO, E. (2003) – Caracterização das principais unidades vulcano-estratigráficas da Ilha de S.Tomé. Golfo da Guiné. *Ciências da Terra (UNL)*, Lisboa, n^oesp.V, A15-A18.
- NEIVA, C. (1956) – Contribuição para o estudo geológico e geomorfológico da ilha de S.Tomé e dos ilhéus da Rolas e das Cabras. 6^oSess.Conf.Int.Afric.Ocid., 2, 147-153.

- VARNES, D.J. (1978) – Slope movement and types and processes. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J. (Ed.). Landslides: analysis and control. Transportation research board, Nat. Acad. Science, Washington, Special Report 176, pp.11-33.
- THOMAS, M.F. (1994) – *Geomorphology in the tropics*. John Wiley & Sons, 460p.

APLICAÇÃO DO MODELO HIPERBÓLICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE UM SOLO RESIDUAL GRANÍTICO

ANDRADE PAIS, LUÍS JOSÉ¹

PALAVRAS CHAVE: solo residual, estruturação, modelo hiperbólico.

KEY WORDS: residual soil, bonding, hyperbolic model.

RESUMO

Tenta-se aplicar o modelo de comportamento hiperbólico à deformação experimental de um solo residual por formulação matemática, mesmo considerando a forte heterogeneidade nas suas propriedades, com a aproximação através de métodos estatísticos. Tendo por base que o solo é um corpo contínuo e adoptando métodos próprios para a análise das distorções influenciadas por deformações volumétricas, torna-se necessário ter um sistema para a análise do comportamento do solo desde o início do carregamento até à rotura, assumindo que o comportamento plástico dos solos é muito complicado.

Adopta-se a lei hiperbólica, por meio de ajustamentos da escala das deformações à curva de tensão-deformação teórica, por via de formulações empíricas alternativas e através de parâmetros correctivos; a convergência é forçada em pontos singulares da curva experimental, com a combinação de valores de rigidez em vários estágios de deformação (JARDINE *et al.*; SHIBUYA *et al.*, 1991) citados por VIANA DA FONSECA (1988). A modelação hiperbólica permite reproduzir os valores dos módulos de deformabilidade tangente inicial, de modo consistente em condições $K_0 \leq 1$, mas assume dificuldades de ajustamento à curva experimental quando o provete conserva alguma estruturação.

¹ Universidade da Beira Interior – DEC, Edifício 2 das Engenharias, Calçada da Fonte do Lameiro; 6201-001 Covilhã.

ABSTRACT: The Hyperbolic modelling applied to the mechanical behaviour of a residual granitic soil

It is attempted to apply the hyperbolic model to the mechanical behaviour of a residual granitic soil, despite its heterogeneity, using a mathematical formulation with the support of statistical methods. Considering that the soil is a continuous body, adequate methods are used for the analysis of the distortion with its induced significant volumetric counterpart. It is considered necessary to have a system for the analysis of the behaviour of the soil from the beginning of the loading to the rupture assuming that the elasto-plastic behaviour of the soil is complex.

The hyperbolic law is used through adjustments of the deformations introducing corrective parameters to the theoretical stress-strain curve forcing the approximation of the theoretical and experimental curves. The convergence is forced in singular points of the experimental curve, with the combination of rigidity values in several deformation stages (JARDINE *et al.*; SHIBUYA *et al.*, 1991) as mentioned by VIANA DA FONSECA (1988). The hyperbolic modelling allows to reproduce the values of the modules of the initial deformability tangent in a consistent way, under the conditions of $K_0 \leq 1$. It is reported that this adjustments are more difficult if the sample keeps being structured.

1. MODELO HIPERBÓLICO

O modelo hiperbólico é de fácil utilização com parâmetros que, embora não reproduzam correctamente as condições in-situ por não satisfazerem as condições anisotrópicas, têm significado físico. É válido para tensões de pico do critério de rotura $(\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\text{máx}}$ (ALMEIDA e SOUSA, 1996) citado por VIANA DA FONSECA (1996). HARDIN e os seus colaboradores (1970) usaram para representar as curvas de tensões – deformações uma hipérbole do tipo:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\epsilon_a}{a + b\epsilon_a}$$

228

sendo $\epsilon_a/(\sigma_1 - \sigma_3) = a + b\epsilon_a$ uma recta cujos módulos de deformabilidade inferidos desta variação hiperbólica com a extensão axial (ϵ_a) dependem do grau de regressão dos troços de curva, para dedução dos parâmetros modeladores.

Atendendo que as curvas tensão – extensão axial ($\sigma - \epsilon$) se aproximam de uma hipérbole, considerando-se a rigidez dada por incrementos, temos:

$\sigma = \epsilon/a$, para pequenas deformações e $\sigma = 1/b$, para grandes deformações, com a tensão máxima de compressão a ser atingida antes da curva tender assintoticamente para a tensão desviatória última, para uma margem de 0,7 a 0,9, para o coeficiente de rotura (R_f) (fig. 1).

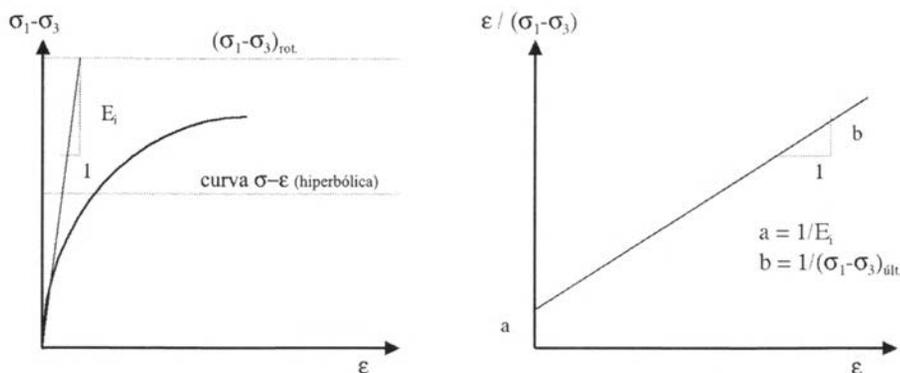


Fig. 1 – Representação hiperbólica da curva tensão – deformação, modelo hiperbólico (KONDNER *et al.*, 1963), citado por VIANA DA FONSECA em 1988.

Demonstra-se a aplicabilidade do modelo hiperbólico na análise de elementos finitos e estabelece-se uma metodologia para determinar os parâmetros a e b , relacionados com o módulo de deformabilidade e a tensão última ou assintótica, a partir dos resultados dos ensaios triaxiais, (ANDRADE PAIS, 1998). O valor $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}}$, determina-se a partir dos ensaios triaxiais por assimilação hiperbólica, relacionando-se com $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{rot}}$, por:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{rot}} = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{ult}},$$

sendo, R_f o coeficiente de rotura que pode variar entre 0,5 e 0,9, (VIANA DA FONSECA 1988).

2. MODELAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS SIMPLES “CID” E “CIU” EM AMOSTRAS ESTRUTURADAS DE SOLO RESIDUAL GRANÍTICO - LPC(I).

Trata-se os valores dos ensaios triaxiais de modo a obter uma relação entre o módulo de deformabilidade tangente e o estado de tensão em causa. Nos ensaios de corte não drenados em provetes saturados com medição da pressão de água nos poros (CIU), o volume do provete mantém-se constante, considerando os valores do coeficiente Poisson constantes e iguais a 0,5.

Neste tipo de solo residual granítico que preserva a estrutura da rocha original, pode haver três comportamentos distintos do alinhamento hiperbólico, devido à cedência da estruturação durante o corte a diferentes tensões efectivas de confinamento, tanto nos ensaios drenados como nos ensaios não drenados:

– E_{hi} (0-12 a 14%) de q_f – módulo deduzido a partir da zona de baixas tensões distorcionais aplicadas, pela baixa extensão axial ainda incrementada, pelo que a estruturação estará em grande parte ainda preservada.

– E_{hf1} (32-55%) de q_f – módulo deduzido a partir de um estado distorcional correspondente a $K_0=0,5$ (VIANA DA FONSECA, 1996), onde os valores alinham hiperbolicamente sobre a forma da recta $\epsilon_a/(\sigma_1-\sigma_3)=a + b\epsilon_a$.

– E_{hf2} (75-90%) de q_f – correspondente ao módulo de deformabilidade perto da rotura, impondo uma extensão axial em que os valores aqui deduzidos para a tangente inicial, estarão fortemente afectados pela desestruturação na fase de consolidação (caso de “CIU200”, “CIU400” e “CID300”), para os quais a tensão isotrópica de consolidação (σ_c) é superior à tensão de desestruturação do solo residual, que se situa neste caso para σ_c entre 120 e 200 kPa.

Recorreu-se à correlação linear do tipo da figura 1, através do método dos mínimos quadrados; os passos dados e resultados estão indicados na Tabela I.

Um melhor ajustamento final, de modo que a assíptota horizontal $q = (\sigma_1-\sigma_3)_{\text{último}}$ da hipérbole se ajuste à curva experimental na parte final, foi forçado com a utilização da resistência última correspondente à extensão axial de 16%. A rigidez estrutural é subestimada para tensões de consolidação baixas, quando se recorre à instrumentação externa e o crescimento do módulo de deformabilidade tangente inicial ($E_i=1/a$) é menos acentuado por este facto. A dependência da tensão efectiva de consolidação parece ser menos sensível ao tipo de instrumentação (VIANA DA FONSECA, 1996). A amostragem não garante a integridade estrutural neste tipo de solo, o que aliado à instrumentação externa no ensaio, leva a que o módulo de rigidez tangencial (E_i) seja determinado no ramo rectilíneo dos primeiros incrementos. A selecção deste ramo é importante na influência de E_i , pela resposta constitutiva (LADE, 1988).

Para as tensões efectivas de consolidação isotrópica superiores, e após se ter vencido a reserva estrutural, o ajustamento é melhor, verificando-se por vezes dificuldade para o ajustamento assíptótico para a tensão última $[(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{últ}}=1/b]$.

Tabela I – Parâmetros da modelação hiperbólica para os ensaios “CIU” e “CID” para a amostra LPC(I), estruturada.

σ'_c (kPa)	CIU (I)					CID (I)		
	50		100		200	400		600
	75-90% de q_f	75-90% de q_f	0-12% de q_f	75-90% de q_f	75-90% de q_f	32-55% de q_f	0-14% de q_f	75-90% de q_f
a (1/Pa)	8,48E-05	9,28E-05	3,81E-05	3,63E-05	2,31E-05	7,04E-05	1,69E-04	6,37E-05
b (1/kPa)	8,73E-03	5,18E-03	8,18E-03	3,38E-03	2,32E-03	6,71E-03	5,37E-03	1,64E-03
r	0,9984	0,9965	0,9979	0,9999	0,99945	0,998	0,978	0,986
$E_i=1/a$ (kPa)	11792,5	10775,9	26267,4	27548,2	43290,4	14204,5	5917,2	1598,68
$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{últ}}=1/b$ (kPa)	114,54	193,05	122,18	295,86	431,03	149,03	186,21	609,76
$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{últ}}$ (kPa)	98,79	157,11	141,32	225,35	310,02	121,57	97,35	423,86
ϵ_a (%)	16	16	16	15	15	16	16	16
$(\sigma_1-\sigma_3)_{\text{rot}}$ (kPa)	106,17	175,35	175,35	268,96	375,37	135,02	135,02	510,43
R_f	0,93	0,9	0,9	0,87	0,87	0,9	0,72	0,83

Deve-se tal facto, em grande medida, à não linearidade destes materiais residuais (VIANA DA FONSECA, 1996), particularmente para níveis distorcionais elevados. Seguem-se as curvas comparadas dos resultados dos ensaios triaxiais e as modeladas hiperbolicamente.

Para “CIU50” (fig. 2) é ténuo o efeito da estrutura, por defeitos ou erros de contrapressão e/ou heterogeneidade dos provetes, com distúrbios da amostra que a faz aproximar do comportamento mecânico de uma amostra do mesmo solo mas desestruturada, sendo contudo incipiente um primeiro ramo rectilíneo inicial para baixas extensões axiais, mais visível em “CIU100” e “CID60” (fig. 3 e 4). Na modelação hiperbólica verifica-se que a curva do ensaio realizado “CIU”, para a tensão efectiva de consolidação de 100 kPa, dá um mau ajustamento (fig. 3).

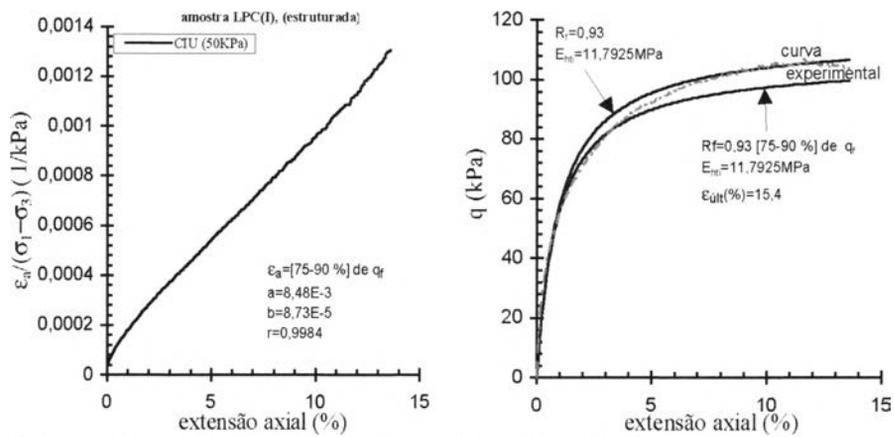


Fig. 2 – Variação de q , com a extensão axial e a modelação hiperbólica do provete ensaiado “CIU” para a tensão efectiva de consolidação isotrópica de 50 kPa.

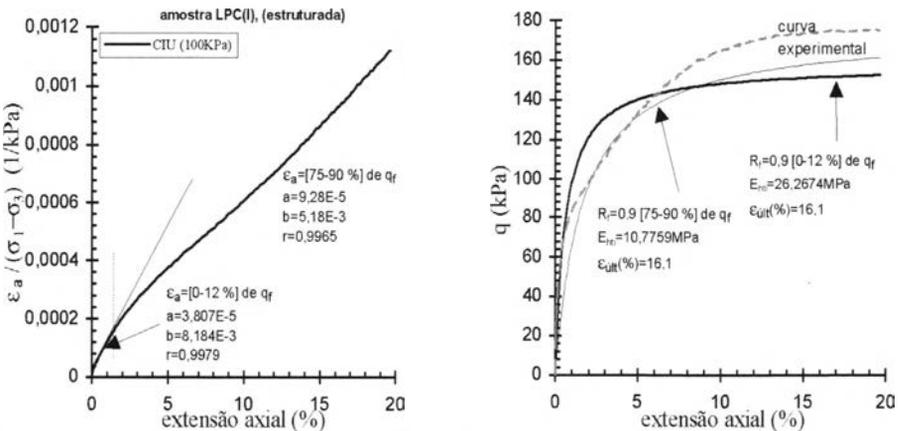


Fig. 3 – Variação de q , com a extensão axial e a modelação hiperbólica do provete ensaiado “CIU” para a tensão efectiva de consolidação isotrópica 100 kPa.

A não linearidade para os ensaios de corte, com tensões de consolidação isotrópica de $\sigma'_c=50$, $\sigma'_c=60$ (drenado-CID) e $\sigma'_c=100$ kPa, resulta do comportamento constitutivo destes materiais residuais, para níveis distorcionais mais reduzidos, enquanto a estrutura se encontra preservada (fig. 2 a 4).

Para as tensões efectivas de consolidação superiores a 100kPa, depois de vencida a resistência devida à estruturação, o ajustamento é melhor, verificando-se por vezes dificuldade no ajustamento para a tensão última ($(\sigma'_1-\sigma'_3)_{ult}$). Tal facto deve-se em grande medida à não linearidade do comportamento constitutivo destes materiais residuais, particularmente para extensões elevadas (fig. 5 a 7).

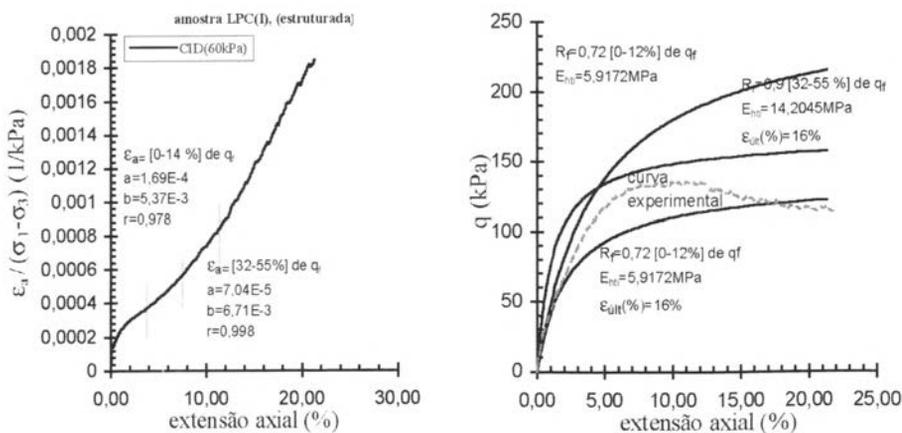


Fig. 4 – Variação de q , com a extensão axial e a modelação hiperbólica do provete ensaiado “CID” para a tensão efectiva de consolidação isotrópica 60 kPa.

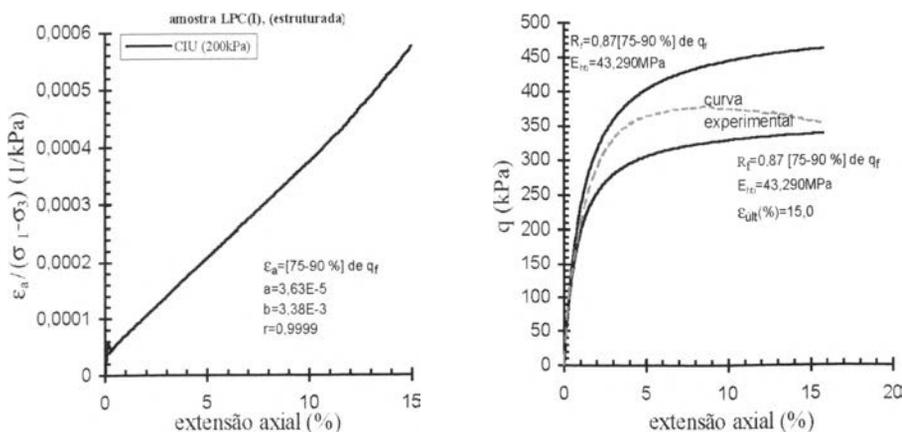


Fig. 5 – Variação de q , com a extensão axial e a modelação hiperbólica do provete ensaiado “CIU” para a tensão efectiva de consolidação isotrópica 200 kPa.

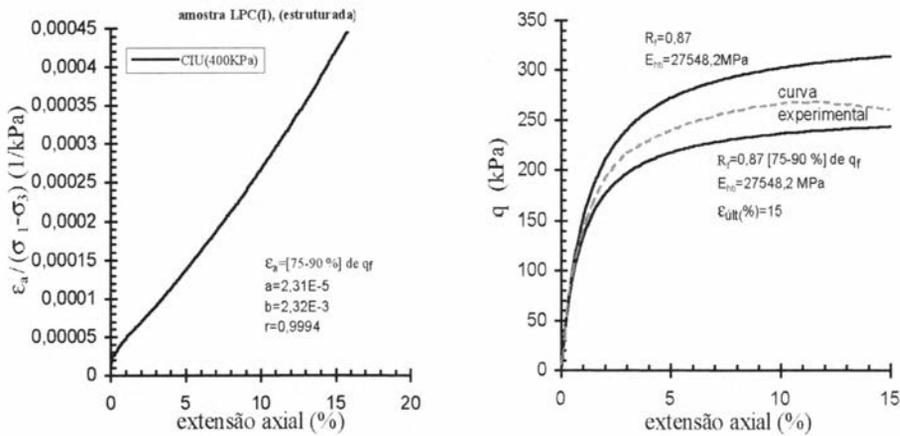


Fig. 6 – Variação de q , com a extensão axial e a modelação hiperbólica do provete ensaiado “CIU” para a tensão efectiva de consolidação isotrópica 400 kPa.

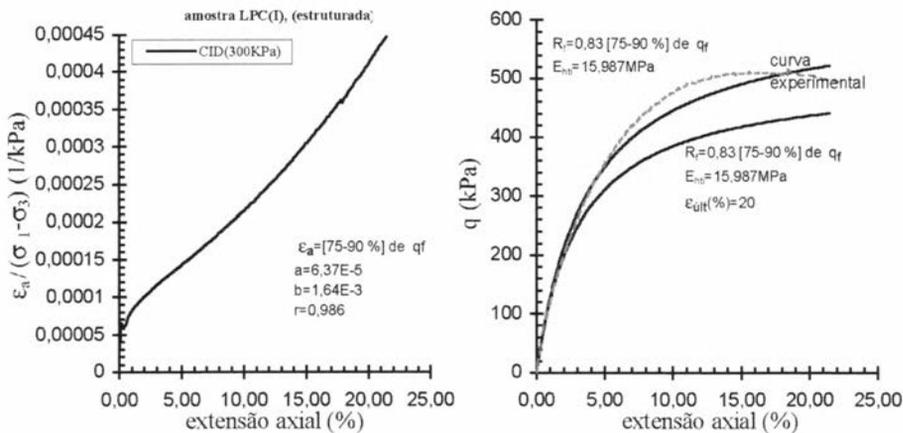


Fig. 7 – Variação de q , com a extensão axial e a modelação hiperbólica do provete ensaiado “CID” para a tensão efectiva de consolidação isotrópica 300 kPa.

3. MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE TANGENTE INICIAL NOS ENSAIOS TRIAXIAIS DEDUZIDOS PARA A FORMULAÇÃO HIPERBÓLICA

Verifica-se um grande incremento para o módulo de deformabilidade tangente inicial para os teste realizados a tensões de consolidação efectiva isotrópicas inferiores à tensão de cedência estrutural, baixando após a cedência do “cimento” estrutural. Os módulos de deformabilidade para os provetes desestruturados apresentam-se mais consistentes com um material mais homogêneo.

A determinação do módulo tangente inicial a partir da formulação do tipo hiperbólico de primeiro grau, quando se tomam os pontos de ajuste, na gama da tensão desviatória entre 75 a 90% de q_f (Tabela II), conduz a valores muito baixos de deformabilidade inicial para tensões de consolidação baixas, para as quais as ligações de “cimento” estrutural ainda estão parcialmente intactas; daí a dificuldade em modelar os solos estruturados com uma lei deste tipo. São necessários outros modelos (JARDINE *et al.*, 1984).

Tabela II – Módulos de deformabilidade para os provetes destruturado e estruturados (LPC), obtidos em testes triaxiais e por modelação hiperbólica.

Série	Referência	Módulos elásticos				Módulos pseudo-elásticos	
		σ'_c (kPa)	E_{ti} (MPa)	E_{seti}	E_{hti} [75-90]% deq_f	E_{hti} [0-12]% deq_f	E_{hti} [32-55]% deq_f
CIU (I)	CIU50	50	16,555	24,065	11,793 (MPa)	—	—
	CIU100	100	39,738	96,245	10,776 (MPa)	26,267 (MPa)	—
	CIU200	200	15,664	12,928	27,548 (MPa)	—	—
	CIU400	400	46,428	114,908	43,290 (MPa)	—	—
CID (I)	CID69	60	3,828	22,419	—	5,917 (MPa)	14,204 (MPa)
	CID300	300	12,398	29,453	15,987 (MPa)	—	—
CIU (D)	corde 0	50	10,837	23,35	—	—	—
	corde 1	100	21,842	22,101	—	—	—
	corde 2	200	15,003	76,371	—	—	—
	corde 3	400	13,579	31,338	—	—	—

Um incremento na tensão de confinamento isotrópica tende simultaneamente a levar as partículas a aproximarem-se entre si e quebrar algumas ligações entre elas. O primeiro efeito tende a incrementar o módulo de deformabilidade inicial e o segundo efeito, pelo contrário, provoca uma quebra na rigidez.

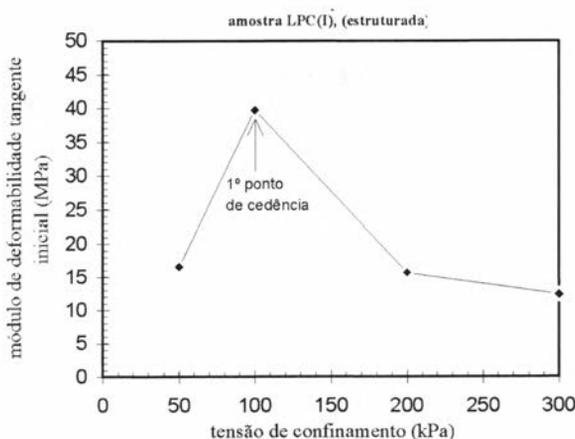


Fig. 8 – Variação do módulo de deformabilidade tangente inicial, para os diferentes testes “CIU” a diferentes tensões de consolidação efectiva isotrópica; amostra LPC(I), estruturada.

Para grandes tensões isotrópicas de compressão, a rigidez inicial depende da porosidade inicial. Para solos residuais densos, o aumento de contactos tende a compensar a diminuição de rigidez esperada pela quebra das ligações estruturais e assim tem-se um primeiro incremento na rigidez até à cedência do cimento e depois mantém-se constante. Esta compensação não ocorre para solos com estrutura aberta e moles, como é o caso do solo residual granítico ensaiado, diminuindo progressivamente a rigidez (fig. 8), após a cedência do cimento estrutural (MACCARINI, 1993). Foi observado o mesmo efeito em solos artificialmente estruturados (MACCARINI, 1987; LEROUEIL e VAUGHAN, 1990).

4. CONCLUSÃO

O modelo hiperbólico, de fácil programação e com parâmetros de significado físico, não reproduz correctamente as condições in-situ por não satisfazer as condições de cedência do corpo estrutural e pela existência de heterotropia no solo. Para tensões efectivas de consolidação isotrópica superiores, depois de vencida a “reserva estrutural”, o ajustamento da curva teórica à experimental é melhor, verificando-se por vezes dificuldade para o ajustamento assintótico na tensão última.

Na modelização hiperbólica, verifica-se que as curvas dos ensaios realizados “CIU” e “CID”, para as tensões efectivas de consolidação mais baixas, 50, 60 e 100 kPa, dão maus ajustamentos, notando-se um primeiro ramo rectilíneo inicial para baixas extensões axiais. Para as tensões efectivas de consolidação superiores a 100 kPa, depois de ultrapassada a reserva estrutural, o ajustamento é melhor.

Os efeitos da desestruturação são independentes do modo como se atinge a cedência, por compressão, corte ou expansão. Os efeitos são semelhantes: decréscimo da rigidez, decréscimo do pico de resistência, interligado ao decréscimo da tensão de préconsolidação virtual e decréscimo da compressibilidade.

Por outro lado os valores calculados pela modelização hiperbólica, consideram-se os valores E_{ht} algo conservadores, podendo em projecto ser considerados com um factor de segurança ainda que baixo, que subestimam os valores de rigidez encontrados nos provetes ensaiados com preservação do “cimento” estrutural e com tensões de consolidação (σ'_c) baixas.

AGRADECIMENTOS

O autor está bastante grato pela colaboração do Professor Luís J. Leal Lemos, do Professor Luís M. Ferreira Gomes e ao “Centro de Investigação de Engenharia Civil” do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra e ao DEC da Universidade da Beira Interior.

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE PAIS, Luís J.A (1998) – Comportamento Mecânico de um Solo Residual Granítico da Covilhã. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil no Departamento de Engenharia Civil da Faculdade Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- HARDIN, B.O.; DRNEVICH, V.P. (1970) – Shear modulus and damping in soils: I-measurement and parameter effects; II-design equation and curves. Technical Reports UK 27-70-CE-2 e 3. College of Engineering, university of Kentucky, Lexington, Kentucky
- JARDINE, R.J.; SYMES, M.J.; BURLAND, J.B. (1984) – The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus. *Géotechnique*, Vol. 34, Nº 3, pp. 323-340.
- LADE, P.L.; OVERTON, D.D. (1989) – Cementation effects in frictional material. *Jour. Geot. Eng. DIV*, Vol.115, GT10, pp. 1373-1387, ASCE.
- LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P.R.(1990) – The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique* 40, Nº3, pp. 467-488.
- MACCARINI, M. (1987) – Laboratory Studies of a Weekly Bonded Artificial Soil. Ph D Thesis, Imperial College of Science and Technology, London.
- MACCARINI, M.(1993) – A comparison of direct shear box tests with triaxial compression tests for a residual soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 11, pp. 69-80.
- VIANA DA FONSECA, A. (1988) – Caracterização Geotécnica de um Solo Residual do Granito da Região do Porto. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em estruturas de Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- VIANA DA FONSECA, A. (1996) – Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para Dimensionamento de Fundações Directas. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA AOS LIXIVIADOS CORRELACIONÁVEL COM PROPRIEDADES FÍSICAS DE SOLOS FINOS PORTUGUESES. SEU INTERESSE NA CONSTRUÇÃO DE BARREIRAS DE CONFINAMENTO

A. J. ROQUE ¹

PALAVRAS CHAVE: aterros de resíduos, barreiras de confinamento, correlação linear, condutividade hidráulica, propriedades geotécnicas, solos finos portugueses.

KEY WORDS: waste disposals, clay liners, correlation, hydraulic conductivity, geotechnical properties, Portuguese fine-grained soils.

RESUMO

Neste trabalho propõe-se a utilização de equações lineares obtidas a partir da correlação entre a condutividade hidráulica k e as propriedades físicas de solos finos portugueses para seleccionar, numa fase prévia dos estudos, os solos potencialmente mais adequados para construir as barreiras de confinamento. Sugere-se a utilização destas equações lineares em alternativa aos critérios semi-quantitativos actualmente disponíveis pelas razões principais seguintes: a) os valores de k utilizados na obtenção das equações lineares foram calculados a partir de ensaios de permeabilidade efectuados sobre provetes percolados directamente com água desmineralizada, provetes percolados com lixiviado após percolação inicial com água desmineralizada e provetes percolados directamente com lixiviado; b) os ensaios de permeabilidade foram realizados com solos cobrindo uma gama alargada de propriedades geotécnicas; c) a avaliação quantitativa de k , ainda que aproximada, é preferível à sua avaliação semi-quantitativa.

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa.

ABSTRACT: Correlation between the hydraulic conductivity of leachates and the physical properties of fine grained soils: usefulness for setting confining barriers

In this article, linear regression expressions obtained from correlations between hydraulic conductivity and some physical properties of Portuguese fine-grained soils are proposed for selecting appropriate soil properties that are likely to result in low hydraulic conductivity. These linear regression expressions are suggested as useful alternatives to guidelines in current use for the following main reasons: a) the hydraulic conductivity values were obtained in permeability tests carried out on specimens percolated directly with deionised water, with acid leachate after percolation with deionised water, and directly with acid leachate; b) the permeability tests were performed on natural fine-grained soils covering a wide range of mineralogical, physical and chemical properties. Based on the results obtained in this study, it is supposed that the linear regression expressions may be used in a satisfactory way in a large number of cases during the preliminary phase of the landfill study.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho hidráulico das barreiras de confinamento (basal, taludes e cobertura final) presentes nos aterros de resíduos joga um papel fundamental no controlo do transporte dos poluentes a partir destas infra-estruturas para o meio ambiente. A sua importância no caudal de lixiviado que se pode infiltrar através das barreiras minerais é ilustrada pelos valores que se apresentam em seguida: a) se $k = 1 \times 10^{-8}$ m/s, o caudal de lixiviado por hectare (ha) e por dia (d) é 10 m^3 ; b) se $k = 1 \times 10^{-9}$ m/s o caudal de lixiviado é $1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{d}$; c) se $k = 1 \times 10^{-10}$ m/s o caudal de lixiviado é $0,1 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{d}$ (admite-se gradiente hidráulico unitário).

Os solos finos ou argilosos são os materiais naturais mais indicados para construir as barreiras de confinamento e proteger os solos e os recursos hídricos. O procedimento mais utilizado na avaliação do desempenho hidráulico e da compatibilidade dos solos aos lixiviados é a realização de ensaios de permeabilidade. No entanto, em solos pouco permeáveis estes ensaios são complexos, longos e necessitam de recursos financeiros não desprezáveis.

É desejável, por isso, que na fase preliminar dos projectos de aterros de resíduos, existam procedimentos simples, rápidos, pouco dispendiosos e suficientemente fiáveis que possibilitem a selecção de solos potencialmente adequados para a construção das barreiras minerais.

Vários autores, fruto da experiência entretanto adquirida, estimaram as gamas de variação mais indicadas para as propriedades índice dos solos (granulometria e plasticidade) tendo em vista a construção de barreiras minerais de permeabilidade

reduzida ($k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s). A principal desvantagem dos critérios propostos na bibliografia resulta de não permitirem estimar um valor potencial para a condutividade hidráulica do material, mas apenas permitirem indicar semi-quantitativamente se a condutividade hidráulica é potencialmente superior ou inferior a 1×10^{-9} m/s (requisito exigido pelo Decreto-Lei n.º 152/2002 para os aterros de resíduos não perigosos e perigosos).

Um vasto programa experimental desenvolvido no LNEC (ROQUE, 2001) permitiu retirar importantes conclusões e pode contribuir para ultrapassar a limitação dos critérios semi-quantitativos. Face aos resultados obtidos, propõe-se que a avaliação preliminar da condutividade hidráulica dos solos finos ou argilosos se efectue a partir de equações lineares que resultaram da correlação entre a condutividade hidráulica k e a percentagem de finos dos solos estudados. As principais vantagens da sua utilização resultam: a) de os valores de k utilizados na obtenção das equações lineares serem obtidos a partir de ensaios de permeabilidade efectuados sobre provetes de solos finos naturais percolados directamente com água desmineralizada, percolados com lixiviado após percolação inicial com água desmineralizada e percolados directamente com lixiviado; b) de os ensaios de permeabilidade serem realizados com solos cobrindo uma gama alargada de propriedades geotécnicas; c) de uma avaliação quantitativa de k , ainda que aproximada, ser preferível a uma avaliação semi-quantitativa.

2. SELECÇÃO DE SOLOS COM BASE EM CRITÉRIOS SEMI-QUANTITATIVOS

Nesta secção apresentam-se os intervalos de variação recomendados por diferentes autores para as propriedades índice dos solos potencialmente favoráveis à construção de barreiras de confinamento com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

EKLUND (1985), DANIEL (1990), SHAKOOR e COOK (1990), BENSON *et al.* (1994) e DANIEL e KOERNER (1995) indicaram as percentagens mínimas ou máximas, ou ambas, mais adequadas para a composição granulométrica dos solos.

BENSON *et al.* (1994) colocaram em evidência a influência da percentagem da fracção argilosa na condutividade hidráulica dos solos. De acordo com a relação entre a fracção argilosa e k apresentada na figura 1a, a percentagem de fracção argilosa nos solos deve ser superior a 10-20% para permitir a construção de barreiras minerais com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. EKLUND (1985) mencionou, com base num estudo realizado em 1980 por MATRECON, que a percentagem de fracção argilosa deve ser superior a 25-28%.

A percentagem de elementos finos (fracção argilosa e silte) é igualmente um indicador da possibilidade, ou não, de se construírem barreiras de confinamento com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

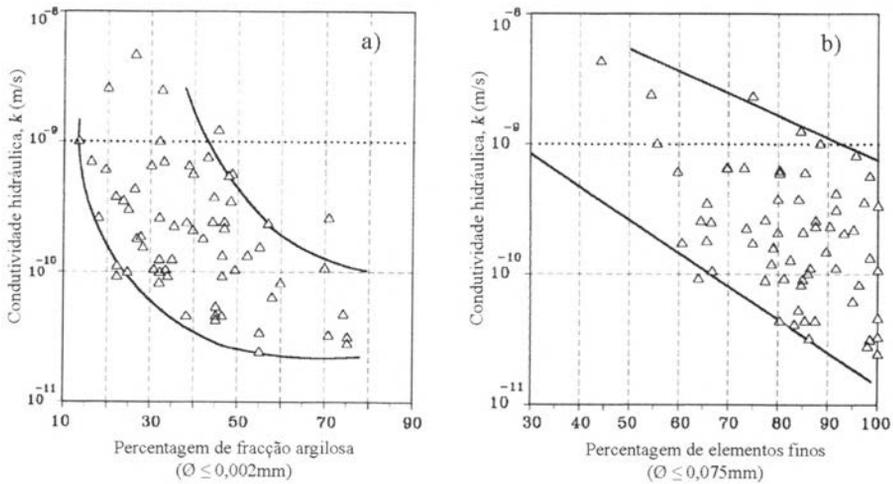


Fig. 1 – Relação entre a condutividade hidráulica e: a) a percentagem de fracção argilosa; b) a percentagem de elementos finos (BENSON *et al.* 1994).

BENSON *et al.* (1994) observaram que uma percentagem de elementos finos superior a 50% pode ser suficiente para a construção de barreiras com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s (fig. 1b). Por outro lado, DANIEL (1990) recomendou uma percentagem de elementos finos de pelo menos 30%.

SHELLEY e DANIEL (1993) colocaram em evidência a influência da percentagem de seixo na condutividade hidráulica da caulinite e de estéreis de mina. Foi observado que $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s quando as misturas seixo-caulinite e seixo-estéreis de mina, compactadas para diferentes teores em água, eram constituídas por uma percentagem de seixo inferior a cerca de 60%. Com percentagens de seixo superiores a 60% a condutividade hidráulica aumentava significativamente.

SHAKOOR e COOK (1990) compactaram misturas de solo pouco plástico com seixo, variando a percentagem de seixo e os teores em água (ligeiramente inferiores ao teor em água óptimo Proctor normal). Os resultados indicaram um ligeiro aumento de k quando a percentagem de seixo era inferior a 50% e um aumento significativo para percentagens maiores.

As investigações de SHELLEY e DANIEL (1993) e SHAKOOR e COOK (1990) sugerem que para percentagens de seixo inferiores a cerca de 50%, os elementos finos preenchem os vazios entre os seixos e controlam a condutividade hidráulica da mistura.

Outros autores (MATRECON, 1980; NRA, 1989; MURRAY *et al.*, 1992; DANIEL, 1990; BENSON *et al.*, 1994; DANIEL e KOERNER, 1995) procuraram definir os intervalos de variação dos limites de Atterberg dos solos mais indicados para a construção de barreiras de confinamento com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s.

LAMBE (1954) estudou a condutividade hidráulica de diferentes argilas e constatou a existência de uma relação directa entre k e a plasticidade. Os valores obtidos mostraram que para um índice de vazios determinado, a montmorilonite sódica tinha a condutividade hidráulica mais baixa, seguida sucessivamente da montmorilonite cálcica, da atapulgite e da caulinite. A plasticidade destas argilas diminui segundo a ordem seguinte: montmorilonite sódica > montmorilonite cálcica > atapulgite > caulinite. MESRI e OLSON (1971) determinaram a condutividade hidráulica de três argilas diferentes e obtiveram a sequência seguinte: caulinite ($k = 1,5 \times 10^{-8}$ m/s) > ilite ($k = 2,0 \times 10^{-11}$ m/s) > montmorilonite ($k = 1,0 \times 10^{-13}$ m/s).

DANIEL (1990) sugeriu que os solos cujo índice de plasticidade I_p é superior ou igual a 10% permitem, em princípio, a construção de barreiras de confinamento com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Este autor referiu, todavia, que alguns solos com $I_p < 10\%$ também permitiram construir barreiras com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Citou, para o efeito, ALBRECHT e CARTWRIGHT (1989) que obtiveram valores de k *in situ* iguais a 8×10^{-10} m/s com um solo de $I_p = 7\%$.

BENSON *et al.* (1994) colocaram em evidência as variações de k em função de w_L e I_p . A figura 2 mostra que k tende a diminuir quando w_L e I_p aumentam. Em particular, k diminui de uma forma significativa quando w_L aumenta de 20 para 50%, evidenciando em seguida um valor praticamente constante (fig. 2a). Também se observa que k diminui fortemente quando I_p aumenta de 10 para 30%. Para valores de I_p superiores a cerca de 30% o valor de k é praticamente constante (fig. 2b). Segundo estes autores, os solos com $w_L \geq 20\%$ e $I_p \geq 7\%$ são potencialmente adequados para construir barreiras de confinamento.

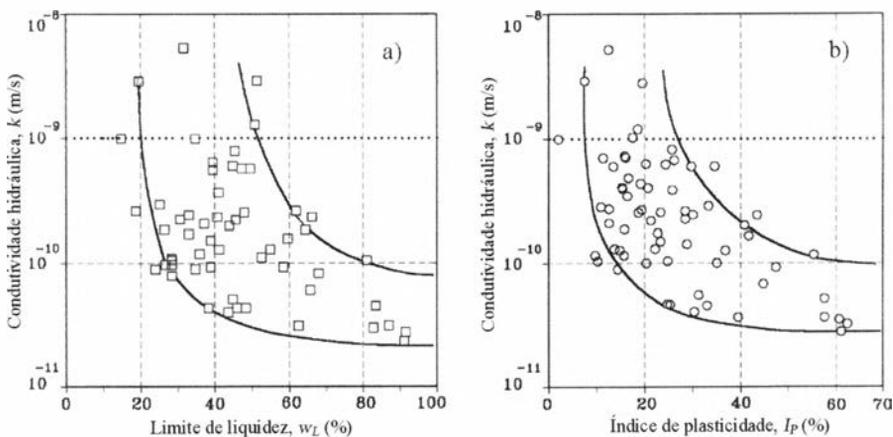


Fig. 2 – Relação entre a condutividade hidráulica e: a) o limite de liquidez; b) o índice de plasticidade (BENSON *et al.* 1994).

DANIEL e KOERNER (1995) concluíram que os solos cujo $7-10\% > I_p > 30-40\%$ não são indicados para a construção de barreiras de confinamento. Os solos com $I_p < 7-10\%$ contêm percentagens de fracção argilosa e de minerais argilosos pouco importantes e são pouco plásticos. A contribuição da compactação de camadas de solos desta natureza torna-se marginal para a construção de dispositivos de confinamento com $k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s. Os solos com $I_p > 30-40\%$ têm tendência para formar torrões rígidos quando estão secos e torrões moles quando estão húmidos, o que se traduz em problemas de trabalhabilidade nas operações de terraplanagem.

Segundo MATRECON (1980), os solos mais indicados para a construção de barreiras de confinamento apresentam $35\% < w_L < 60\%$ e $15\% < I_p < 30\%$.

NRA (1989) publicou igualmente alguns princípios gerais relativos à pré-selecção de solos com base nos valores dos limites de Atterberg. Para este organismo, w_L deve ser inferior a 90% e I_p inferior a 65%. Neste estudo, nenhuma referência aos valores mínimos de w_L e de I_p foram feitos. Contudo, MURRAY *et al.* (1992) introduziram na classificação desenvolvida por NRA o conceito de valor mínimo para I_p , recomendando que o seu valor deve ser superior a 12%. Observa-se, por um lado, que o valor máximo de I_p indicado por NRA é substancialmente superior aos recomendados por MATRECON (1980) e DANIEL e KOERNER (1995) e que, por outro, o valor máximo de w_L indicado por NRA é substancialmente superior ao recomendado por MATRECON (1980). Ao inverso, constata-se que os intervalos de variação de I_p recomendados por MATRECON (1980) e DANIEL e KOERNER (1995) são praticamente idênticos.

O Quadro I mostra uma síntese dos requisitos recolhidos na bibliografia para as propriedades índice dos solos por forma a pré-seleccionar os solos potencialmente adequados para a construção de barreiras de confinamento.

Quadro I – Critérios semiquantitativos para a selecção preliminar de solos potencialmente adequados para a construção de barreiras de confinamento.

Parâmetro	Critérios semi-quantitativos						
	1	2	3	4	5	6	7
Argila (%)	>25	—	>25 ^(c)	—	—	>20	>15
Finos (%)	—	—	>30-50	>20	>30	—	>30
Seixos (%)	—	—	—	<10	<10-20	<10 ^(d)	—
w_L (%)	>35 e <60	<90	>30	—	—	—	>20
I_p (%)	>15 e <30	>12 ^(b) e <65	>15	>10e<30-40	>7-10e<30-40	>10e<30-40	>7
A_c ^(a)	—	—	—	—	—	—	>0,3

1 - MATRECON (1980); 2 - NRA (1989); 3 - GORDON *et al.* (1990); 4 - MITCHELL e JABER (1990); 5 - DANIEL (1990), DANIEL e KOERNER (1995); 6 - MONJOIE *et al.* (1992); 7 - BENSON *et al.* (1994).

(a)-Coeficiente de actividade de Skempton; (b)-Adicionado por MURRAY *et al.* (1992); (c)- $\phi < 0,005$ mm; (d)- $\phi < 2,5$ mm.

3. SELECÇÃO DE SOLOS COM BASE EM CRITÉRIOS QUANTITATIVOS

3.1. BASES DO ESTUDO

O estudo da correlação entre a condutividade hidráulica e as propriedades geotécnicas de solos finos portugueses que se apresenta neste trabalho foi efectuado com base nos resultados obtidos num vasto programa experimental. O principal objectivo deste programa era contribuir para um melhor conhecimento do desempenho hidro-geoquímico dos solos (transporte por advecção, transporte por difusão e capacidade de retenção dos poluentes) considerados habitualmente como potencialmente adequados para a construção das barreiras de confinamento.

Visando a obtenção de uma amostragem alargada do desempenho hidro-geoquímico dos solos, procedeu-se:

- a) à preparação de lixiviados multiespécies em laboratório, um ácido (pH = 4,6) e o outro neutro a ligeiramente alcalino (pH = 7,2), com composições e concentrações químicas (condutividade eléctrica CE \cong 14 mS/cm) tanto quanto possível representativas das observadas nos lixiviados reais;
- b) à recolha de trinta amostras em diferentes formações argilosas portuguesas e ao estudo das suas características geotécnicas;
- c) à selecção de amostras representativas da população amostrada;
- d) à avaliação da integridade dos solos a longo prazo.

O estudo do desempenho hidro-geoquímico foi efectuado com sete amostras representativas da população recolhida, tendo a sua selecção sido efectuada a partir do tratamento estatístico dos resultados obtidos na caracterização geotécnica dos materiais pelo método da Análise em Componentes Principais.

No que se refere ao estudo do desempenho hidráulico e da condutividade hidráulica, em todas as amostras seleccionadas, procedeu-se à compactação de seis provetes: a) dois com teor em água 2% inferior ao teor em água óptimo Proctor normal ($w_{opt-2\%}$); b) dois com teor em água óptimo Proctor normal (w_{opt}); c) dois com teor em água 2% superior ao teor em água óptimo Proctor normal ($w_{OPN+2\%}$). Os três provetes de um primeiro conjunto foram percolados sequencialmente com água desmineralizada e lixiviado ácido (ou seja, os provetes foram percolados com lixiviado ácido após percolação inicial com água desmineralizada) e os três provetes de um segundo conjunto foram percolados sequencialmente com lixiviado ácido e lixiviado neutro a ligeiramente alcalino (ou seja, os provetes foram percolados com lixiviado neutro a ligeiramente alcalino após percolação inicial com lixiviado ácido).

Foi projectado pelo autor um permeâmetro, habitualmente designado por permeâmetro de parede rígida, para avaliar o desempenho hidráulico dos materiais. Ainda que as metodologias utilizadas nos ensaios sejam idênticas às dos ensaios clássicos de permeabilidade, existem algumas diferenças importantes, nomeada-

mente a necessidade de prolongar os ensaios até ao estabelecimento do regime químico permanente.

As condutividades hidráulicas médias k_{Ad} (percolação com água desmineralizada), $k_{La/Ad}$ (percolação com lixiviado ácido, no mesmo provete previamente percolado com água desmineralizada), k_{La} (percolação com lixiviado ácido) e $k_{Lb/La}$ (percolação com lixiviado neutro a ligeiramente alcalino, no mesmo provete previamente percolado com lixiviado ácido) foram calculadas depois de se verificarem, na ordem indicada, as condições seguintes:

- a) volume da solução efluente proporcional ao tempo;
- b) caudal da solução efluente proporcional ao gradiente hidráulico;
- c) pH e CE da mesma ordem de grandeza no lixiviado influente e na solução efluente (na fase de percolação com água desmineralizada a condição a observar era a eluviação total dos sais solúveis no solo natural);
- d) condutividade hidráulica aproximadamente constante.

É importante assinalar que nem sempre foi possível satisfazer todas estas condições, em particular no que respeita à relação linear positiva entre o caudal e o gradiente hidráulico (ponto b); à medição do mesmo pH na solução efluente e no lixiviado influente (ponto c); à completa eluviação dos sais solúveis no solo natural (ponto c).

3.2 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS

Na figura 3 apresenta-se a localização das trinta amostras recolhidas, tendo sido seleccionadas para o estudo do desempenho hidráulico as amostras identificadas pelas designações: Cs.3, SR.5, MP.8, MP.12, Ji.19, Js.28 e Ci.29. O Quadro II resume os principais elementos sobre a geocronologia e a distribuição geográfica das sete amostras seleccionadas.

As características mineralógicas, químicas, físicas e hidráulicas são apresentadas nos Quadros III a VI.

3.3. CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE A CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E AS CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DOS MATERIAIS

Dado o grande número de ensaios de permeabilidade efectuados e a gama alargada das propriedades geotécnicas dos materiais seleccionados, estudou-se a correlação linear entre a condutividade hidráulica e as propriedades geotécnicas seguintes: a) teor em montmorilonite; b) percentagem de fracção argilosa, de silte e de finos; c) limites de liquidez, plasticidade e retracção; d) índice de plasticidade; e) coeficiente de actividade de Skempton; f) índice de expansibilidade livre.

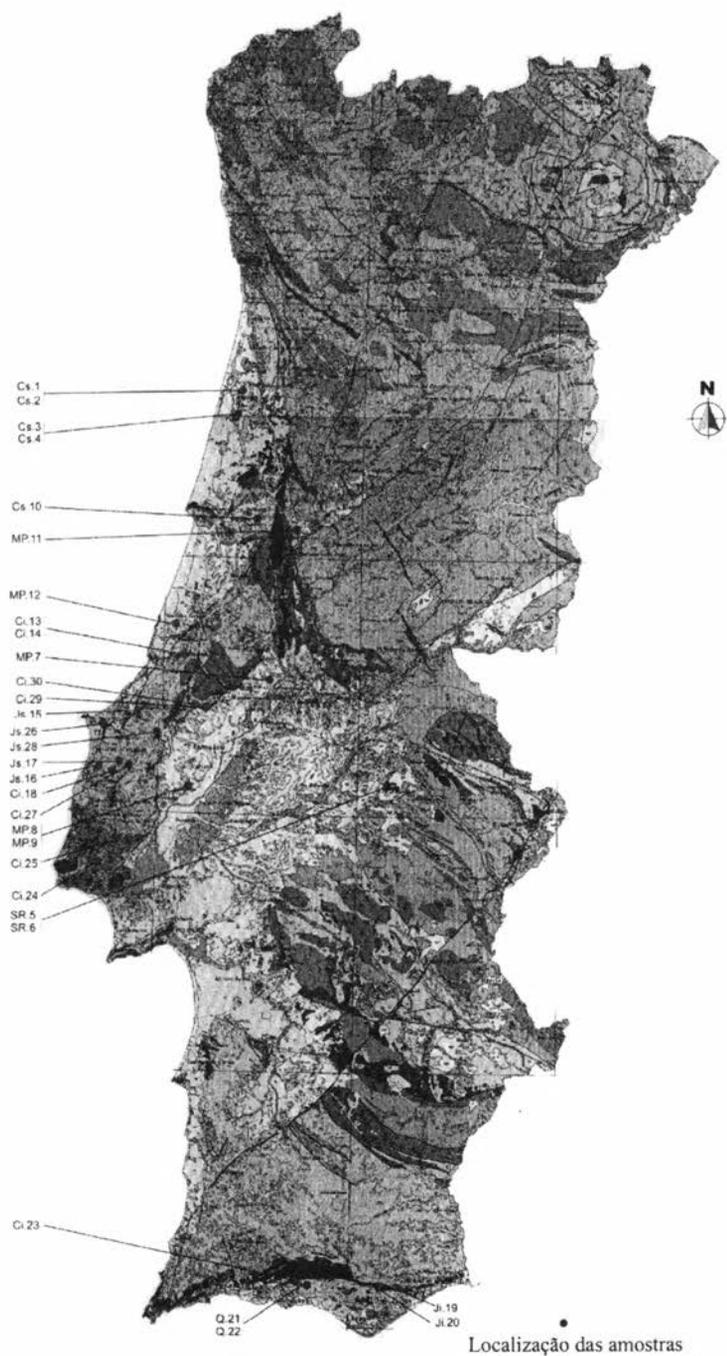


Fig. 3 – Localização das amostras estudadas (extracto da Carta Geológica à escala 1:1 000 000 do Instituto Geológico e Mineiro).

Quadro II – Elementos sobre a geocronologia e a distribuição geográfica das amostras

Amostra	Elementos sobre a geologia			Elementos sobre a geografia		
	Geocronologia		Carta geológica (1:50 000) Folha N.º	Concelho	Local	Carta topográfica (1:25 000) Folha N.º
	Era	Período				
Cs.3	Secundário	Cretácico sup.,Cs	16-C (Vagos)	O. do Bairro	Bustos	196
SR.5	Solo residual de rochas eruptivas, SR		Não publ.	Avis	Benavila	382
MP.8	Terciário	Mio-Pliocénico,MP	31-C (Coruche)	Azambuja	Quinta da Queijeira	377
MP.12	Terciário	Mio-Pliocénico,MP	22-D (M. Grande)	M. Grande	Martingança	296
Ji.19	Secundário	Jurássico inf.,Ji	Não publ.	Tavira	S. ^{ta} Cat. da Fonte do Bispo	599
Js.28	Secundário	Jurássico inf.,Ji	26-D (C. da Rainha)	C. da Rainha	Bairradas	339
Ci.29	Secundário	Cretácico inf.,Ci	27-C (T. Novas)	Santarém	Abbrã	328

Quadro III – Composição mineralógica semi-quantitativa dos materiais

Amostra	Fracção global (%)					Fracção argilosa (%)				
	Quar. ^{to}	Feldsp. ^{tos}	Calcite	Filossil. ^{tos}	Montm. ^{te}	Micas Musc.	Illite	Caulinite	Quar. ^{to}	Outros
Cs.3	20	1	—	79	71	9	—	7	13	—
SR.5	40	18	2	40	100	—	—	—	—	—
MP.8	47	4	—	49	45	22	—	20	12	1
MP.12	21	2	3	74	7	60	—	20	13	—
Ji.19	28	2	—	70	—	86	—	—	7	7
Js.28	69	14	1	16	—	51	—	29	20	—
Ci.29	41	1	—	58	21	13	—	55	11	—

Quadro IV – características químicas dos materiais

Amostra	pH do solo, 25°C (escala de Sorensen)	CE da solução do solo, 25°C (µS/cm)	S _T (m ² /g)	CEC meq/100g
Cs.3	8,1	475	283,18	58,43
SR.5	8,6	53	179,58	42,05
MP.8	7,7	818	117,00	21,95
MP.12	8,3	277	181,46	28,80
Ji.19	8,6	282	41,65	12,30
Js.28	9,4	153	27,00	6,50
Ci.29	5,1	51	102,56	20,55

S_T - Superfície específica total; CEC - Capacidade de troca catiónica.

O Quadro VII apresenta os valores do coeficiente de correlação linear R entre as condutividades hidráulicas k_{Ad} , $k_{La/Ad}$ e k_{La} e a percentagem de fracção argilosa (%argila), percentagem de finos (%finos), índice de plasticidade I_P e índice de expansibilidade livre I_e . A correlação entre k e a %finos foi quase sempre a mais elevada e a correlação entre k e I_P quase sempre a mais fraca. Os valores do

Quadro V – Características físicas dos materiais

Amostra	G_s	Limites de consistência			Granulometria			Classificação USCS	Compactação		I_e (%)
		w_L (%)	w_p (%)	w_S (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)		w_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	
Cs.3	2,80	51,2	31,1	12,9	—	47	53	MH	25,4	15,3	150
SR.5	2,66	47,7	37,2	21,8	50	32	18	ML	20,8	15,5	45
MP.8	2,77	39,3	21,2	15,4	2	71	27	CL	17,8	16,9	85
MP.12	2,78	55,0	29,5	14,7	5	41	54	MH	23,8	15,9	150
Ji.19	2,84	24,7	18,2	12,6	46	41	13	CL-ML	14,0	19,4	50
Js.28	2,73	25,7	17,1	12,7	22	66	12	CL	9,8	19,7	40
Ci.29	2,73	59,0	26,7	14,5	1	55	44	CH	18,4	16,8	140

G_s - Densidade das partículas sólidas; w_p - Limite de plasticidade; w_S - Limite de retração;

w_{opt} - Teor em água ótimo Proctor normal; γ_{dmax} - Peso volúmico seco máximo; I_e - Índice de expansibilidade livre.

Quadro VI – Condutividade hidráulica dos materiais

Amostra	Provetes percolados directamente com água desmineralizada (Ad) e posteriormente com lixiviado ácido (La)						Provetes percolados directamente com lixiviado ácido (La) e posteriormente com lixiviado neutro a ligeiramente alcalino (Lb)					
	$w_{opt-2\%}$		w_{opt}		$w_{opt+2\%}$		$w_{opt-2\%}$		w_{opt}		$w_{opt+2\%}$	
	k_{Ad} $\times 10^{-9}$	$k_{La/Ad}$	k_{Ad} $\times 10^{-9}$	$k_{La/Ad}$	k_{Ad} $\times 10^{-9}$	$k_{La/Ad}$	k_{La} $\times 10^{-9}$	$k_{Lb/La}$	k_{La} $\times 10^{-9}$	k_{La} $\times 10^{-9}$	$k_{Lb/La}$ $\times 10^{-9}$	
Cs.3	0,062	0,13	0,013	0,015	0,016	0,016	4,2	0,040	0,016	0,035	ne	
SR.5	5,3	16,0	2,3	11,0	0,53	0,92	50	48	13	2,5	1,8	
MP.8	0,092	0,13	0,048	0,05	0,042	0,053	0,47	0,42	0,17	0,047	0,053	
MP.12	0,018	0,015	0,012	0,013	0,022	0,028	0,018	ne	0,017	0,052	0,018	
Ji.19	0,43	1,5	0,38	0,53	0,33	4,7	33	40	0,55	0,68	ne	
Js.28	0,087	0,13	0,058	0,072	0,055	0,058	1,2	1,5	0,37	0,14	ne	
Ci.29	0,078	0,085	0,022	0,030	0,023	0,028	0,055	0,058	0,058	0,033	ne	
	1,5	$k > 1 \times 10^{-9}$ m/s; ne - Ensaio não efectuado.										

Quadro VII – Correlação linear entre k_{Ad} , $k_{La/Ad}$ e k_{La} e propriedades geotécnicas dos materiais (%argila, %finos, I_p e I_e)

	$w_{opt-2\%}$			w_{opt}			$w_{opt+2\%}$		
	k_{Ad}	$k_{La/Ad}$	k_{La}	k_{Ad}	$k_{La/Ad}$	k_{La}	k_{Ad}	$k_{La/Ad}$	k_{La}
% Argila	0,64	0,82	0,64	0,90	0,70	0,82	0,80	0,81	0,72
% Finos	0,85	0,87	0,79	0,90	0,91	0,87	0,97	0,96	0,98
I_p	0,58	0,79	0,81	0,82	0,64	0,68	0,76	0,76	0,75
I_e	0,68	0,86	0,69	0,93	0,75	0,85	0,85	0,85	0,79

0,97 - Coeficiente de correlação linear R muito elevado ($R \geq 0,95$).

0,97 - Coeficiente de correlação linear R elevado ($0,80 \leq R < 0,95$).

coeficiente de correlação linear R entre k_{Ad} , $k_{La/Ad}$ e k_{La} e as restantes propriedades geotécnicas já referidas não se apresentam dado não serem satisfatórias.

Para os provetes compactados com $w_{opt+2\%}$, os valores do coeficiente de correlação linear entre k_{Ad} , $k_{La/Ad}$ e k_{La} e a %finos foram superiores ou iguais a 0,96. Estes resultados são ilustrados sobre as figuras 4a a 4c e estes resultados sugerem que a condutividade hidráulica dos solos finos pode ser estimada durante as fases preliminares dos estudos a partir das expressões apresentadas nas figuras 4a a 4c.

Tendo por base o funcionamento de um aterro de resíduos considera-se conveniente utilizar a expressão apresentada na:

- Fig. 4a para estimar a condutividade hidráulica da camada mineral que integra o sistema de encerramento ou cobertura final, dado que a situação mais provável é a percolação directa desta pela água de precipitação atmosférica;
- Fig. 4b para estimar a condutividade hidráulica da barreira de confinamento que integra o sistema de protecção ambiental passiva nos taludes, dado que a situação mais provável é ocorrer a percolação da água de precipitação atmosférica na fase inicial da exploração e do lixiviado na fase final da exploração;
- Fig. 4c para estimar a condutividade hidráulica da barreira de confinamento que integra o sistema de protecção ambiental passiva na base, dado que a situação mais provável é a percolação directa desta pelos lixiviados (o emprego das expressões indicadas nas figuras 4a e 4b podiam conduzir a uma sobrestimação do desempenho hidráulico dos materiais).

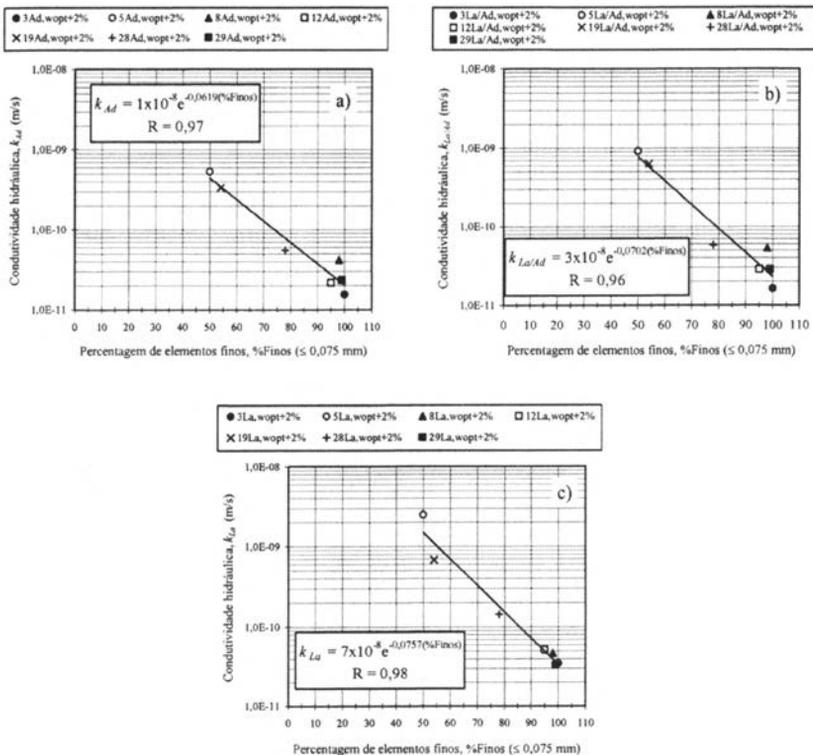


Fig. 4 – Correlação linear entre a condutividade hidráulica k obtida nos provetes compactados a $w_{opt}+2\%$ e a percentagem de finos: a) condutividade hidráulica k_{Ad} dos provetes percolados com água desmineralizada; b) condutividade hidráulica $k_{La/Ad}$ dos provetes percolados com lixiviado ácido, no mesmo provete percolado com água desmineralizada; c) condutividade hidráulica k_{La} dos provetes percolados com lixiviado ácido.

4. APLICAÇÕES PRÁTICAS

A avaliação laboratorial do desempenho hidro-geoquímico dos solos é um processo muito longo e que necessita de importantes recursos humanos e financeiros. Torna-se, por isso, interessante e desejável dispor de ferramentas que permitam, de uma forma simples, rápida, pouco dispendiosa e suficientemente fiável, proceder rapidamente à selecção dos solos potencialmente mais favoráveis à construção de barreiras de confinamento na fase preliminar dos projectos dos aterros de resíduos. A principal vantagem desta selecção prévia traduz-se numa redução, maior ou menor, dos solos a caracterizar através dos ensaios de permeabilidade e de difusão.

Em função dos resultados apresentados na secção anterior, propõe-se a substituição dos critérios semi-quantitativos utilizados na selecção dos solos pelos critérios quantitativos materializados pelas equações lineares obtidas entre a condutividade hidráulica dos provetes compactados com $w_{opt+2\%}$ e a %finos. Este procedimento parece mais indicado porque: a) diferentes estudos mostraram que a menor condutividade hidráulica de um solo se atinge quando este é compactado com teor em água cerca de 2% superior ao teor em água óptimo Proctor normal; b) estima-se um valor potencial de k e não uma indicação semi-quantitativa de que k é potencialmente superior ou inferior a 1×10^{-9} m/s; c) os parâmetros necessários à aplicação das relações são menos numerosos que para os critérios semi-quantitativos: a percentagem de elementos finos para a relação proposta e a percentagem da fracção argilosa, de finos e de seixos, o limite de liquidez, o índice de plasticidade e o coeficiente de actividade para os critérios de selecção.

O facto de as equações lineares resultarem de ensaios de permeabilidade efectuados com solos argilosos naturais com uma gama importante de propriedades geotécnicas e com soluções de percolação puras (água desmineralizada) e muito concentradas (lixiviado ácido) leva a admitir que possam ser aplicadas de maneira satisfatória num grande número de casos.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALBRECHT, K.A., CARTWRIGHT, K. (1989) – Infiltration and hydraulic conductivity of a compacted earthen liner. *Ground Water*, vol. 27, nº 1, p. 14-19.
- BENSON, C.H., ZHAI, H., WANG, X. (1994) – Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 120, nº 2, p. 366-387.
- DANIEL, D.E. (1990) – Summary review of construction quality control for compacted soil liners. In: *Waste containment systems: construction, regulation and performance*, *Geotechnical Special Publication nº 26*. Edited by R. Bonaparte, New York: ASCE. p. 175-189.
- DANIEL, D.E., KOERNER, R.M. (1995) – *Waste containment facilities: guidance for construction, quality assurance and quality control of liner and cover system*. New York: ASCE. 354 p.

- EKLUND, A.G. (1985) – A laboratory comparison of the effects of water and waste leachate on the performance of soil liners. *In Hydraulic barriers in soil and rock, ASTM STP 874*. Edited by A.I. Johnson, R.K. Frobel, N.J. Cavalli *et al.*, Philadelphia: ASTM. p. 188-202.
- GORDON, M.E., HUEBNER, P.M., MITCHELL, G.R. (1990) – Regulation, construction and performance of clay-lined landfills in Wisconsin. *In Waste containment systems: construction, regulation, and performance, Geotechnical Special Publication n° 26*. Edited by R. Bonaparte, New York: ASCE. p. 14-27.
- LAMBE, T.W. (1954) – The permeability of compacted fine-grained soils. *In ASTM STP 163*. Philadelphia: ASTM. p. 56-67.
- MATRECON (1980) – *Lining of waste impoundment and Disposal Facilities*. Cincinnati: U.S. Environmental Protection Agency.
- MESRI, G., OLSON, R.E. (1971) – Mechanisms controlling the permeability of clays. *Clays and Clay Minerals*, vol. 19, p. 151-158.
- MITCHELL, J.K., JABER, M. (1990) – Factors controlling the long-term properties of clay liners. *In Waste containment systems: construction, regulation, and performance, Geotechnical Special Publication n° 26*. Edited by R. Bonaparte, New York: ASCE. p. 84-105.
- MONJOIE, A., RIGO, J.M., POLO-CHIAPOLINI, C.I. (1992) – *Vade-mecum pour la réalisation des systèmes d'étanchéité – drainage artificiels pour les sites d'enfouissement techniques en Wallonie*. Liège: Université de Liège. pagination multiple.
- MURRAY, E.J., RIX, D.W., HUMPHREY, R.D. (1992) – Clay linings to landfill sites. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, vol. 25, n° 4, p. 371-376.
- NRA. (1989) – *Earthworks to landfill sites*. North West Region: National Rivers Authority.
- ROQUE, A.J. (2001) – *Transfert advectif et diffusif de polluants inorganiques dans les barrières d'étanchéité minérales présentes dans les Centres de Stockage de Déchets. Application aux sols fins portugais*. Thèse Génie Civil – Sols: Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 697 pp.
- SHAKOOR, A., COOK, B. (1990) – The effect of stone content, size, and shape on the engineering properties of a compacted silty clay. *Bulletin of Association of Engineering Geologists*, vol. 27, n° 2, p. 245-253.
- SHELLEY, T.L., DANIEL, D.E. (1993) – Effect of gravel on hydraulic conductivity of compacted soil liners. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 119, n° 1, p. 54-68.

AVALIAÇÃO DA ESCAVABILIDADE DE UMA FUNDAÇÃO NO GRÉS DE SILVES, COM BASE NAS VELOCIDADES SÍSMICAS

MÁRIO QUINTA FERREIRA ¹ e FERNANDO PEDRO FIGUEIREDO ²

PALAVRAS CHAVE: velocidades sísmicas, escavabilidade, geologia de engenharia.

KEY WORDS: seismic velocities, excavability, engineering geology.

RESUMO

Durante as escavações para implantar um grande edifício em Coimbra verificou-se grande variação da resistência ao desmonte dos arenitos da formação do *Grés de Silves*. Procurando quantificar e justificar as variações nas condições de escavação encontradas, procedeu-se à medição das velocidades das ondas sísmicas primárias (ondas P). Como as superfícies que melhor permitiam a caracterização dos volumes escavados eram os taludes sub-verticais resultantes das escavações, deixadas nos limites exteriores do terreno e entre os blocos das sapatas, houve necessidade de utilizar uma técnica pouco comum, recorrendo a geofones específicos para a determinação das ondas S, cravados na posição horizontal, o que permitiu registar com rigor as ondas P. No local o *Grés de Silves* apresenta variações muito grandes de cimentação, quer no tipo de cimento (silicioso ou ferruginoso) quer em particular na sua quantidade, conferindo ao terreno desde um comportamento muito próximo do terroso, até ao de uma rocha resistente que requer a utilização de explosivos para o seu desmonte. Os resultados das velocidades sísmicas mostram que apenas um dos locais ensaiados apresentou valores de velocidade sísmica considerada marginal, de acordo com a tabela de ripabilidades, sendo a generalidade do terreno escavável com meios mecânicos.

¹ Geólogo de Engenharia. Universidade de Coimbra, Dep. Ciências da Terra. (mqf@ci.uc.pt)

² Engenheiro de Minas. Universidade de Coimbra, Dep. Ciências da Terra. (fpedro@ci.uc.pt).

ABSTRACT: Assessment the excavability of the Grés de Silves with seismic velocities

During the excavation for the construction of a large building in Coimbra, it was found a wide variability of the excavation resistance of the sandstones of the *Grés de Silves* formation. In order to quantify and to understand the variability in the excavation conditions the seismic velocity of the P waves was measured. As the outcrop surfaces that allowed the better measurement conditions were the vertical ones, resulting from the excavation for the foundation and walls of the building, it became necessary to use an unusual technique, with the geophones specific for the determination of the S waves, staked to the ground in the horizontal position, allowing to measure the P waves. The sandstone shows great variations in cement type (siliceous or ferruginous) and quantity, conferring to the ground a behavior from a soil to a rock that required the use of explosives to blast the excavation. The analysis of the seismic velocities showed that only one of the tested places could be considered marginal, according with the rippability chart, while the rest of places could be excavated by mechanical equipment.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho teve por objectivo avaliar as características de escavabilidade dos terrenos através das velocidades sísmicas, a partir das superfícies de escavação existentes, localizados na proximidade de um edifício de grandes dimensões situado na zona sul de Coimbra. A partir das características dos terrenos expostos pelos trabalhos de escavação procurou-se avaliar as condições de escavabilidade dos terrenos que foram removidos, ou que se encontravam em continuidade com as superfícies observadas.

A implantação do edifício foi efectuada em vários níveis, acompanhando em parte a topografia da colina, existindo diversos volumes de terreno que ficaram “in situ”, entre os locais de implantação das fundações.

Em diversos locais, foi possível efectuar uma análise pormenorizada dos volumes ainda intactos, permitindo uma interpretação fiável das características dos terrenos escavados, adjacentes às superfícies expostas.

Durante os trabalhos de escavação foram essencialmente utilizados meios mecânicos e esporadicamente explosivos. A designação de escavação com “meios mecânicos” engloba a utilização de quaisquer equipamentos de escavação que permitam remover os terrenos sem o recurso a explosivos. Inclui-se nesta designação genérica a utilização de pás mecânicas, incluindo giratórias e a utilização de *rippers* com a finalidade de soltar o terreno, facilitando o trabalho dos outros meios mecânicos de escavação.

Por vezes recorre-se à utilização de martelos demolidores de elevada energia, quando ocorrem zonas com materiais resistentes, não ripáveis, que pelas suas características de heterogeneidade e/ou reduzido volume, não justificam o recurso a explosivos, apesar do terreno possuir características adequadas ao seu uso.

A designação de escavação com “explosivos” refere-se às situações em que o desmonte apenas pode ser realizado com eficiência recorrendo à utilização de explosivos, por não ter sido conseguido o desmonte com os equipamentos referidos para a escavação com “meios mecânicos”.

2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DOS TERRENOS COM IMPORTÂNCIA NA ESCAVABILIDADE

Nos projectos de engenharia é vulgar haver uma insuficiente avaliação das características de escavabilidade dos terrenos, recorrendo-se, como alternativa, a fórmulas contratuais do tipo “escavação em terreno de qualquer natureza”. Esta situação gera, por vezes, graves problemas em obra, quando as dificuldades de escavação ultrapassam níveis correntes, ou seja quando os terrenos possuem volumes rochosos importantes ou, quando mesmo em pequena quantidade, a rocha possui elevada resistência ou grande variabilidade das condições de desmonte. A escavabilidade dos terrenos depende essencialmente da litologia, do estado de alteração e da estrutura geológica do maciço.

No que se refere ao caso em estudo, a geologia do local é constituída por duas unidades principais: solos de cobertura e arenitos. Os arenitos são do Triásico e pertencem à formação dos *Grés de Silves* (SOARES *et al.*, 1985).

Os solos de cobertura são materiais recentes (do Quaternário) resultantes quer da alteração e remobilização superficial dos *Grés de Silves* quer da remobilização dos depósitos existentes no cimo da colina do Pinhal de Marrocos. Apresentam essencialmente cor acastanhada e espessura variável, desde algumas dezenas de centímetros até poucos metros. A granulometria é essencialmente arenosa, com percentagens variáveis de silte, muito pouca argila, e elementos grosseiros dispersos, constituídos por seixos e alguns blocos, essencialmente de quartzito. Os solos de cobertura podem ser facilmente observados no perímetro da escavação apresentando espessuras entre 1 e 4 m.

A espessura dos sedimentos de cobertura é pouco significativa em relação à altura total de escavação, que ronda um valor máximo da ordem dos 15 m pelo que a generalidade da escavação foi efectuada na unidade dos arenitos do Triásico.

Os arenitos são rochas sedimentares, formadas em ambiente continental, constituídas essencialmente por partículas da dimensão das areias, por vezes com seixos, possuindo níveis com abundância de silte. As variações granulométricas são mais notórias na vertical, possuindo camadas com pouca regularidade, com

sequências de materiais mais finos intercalando com mais grosseiros. A espessura das camadas é variável desde alguns centímetros até vários metros. A variação granulométrica na horizontal é pouco significativa, sendo possível definir os estratos com algum rigor.

A tonalidade predominante é nos tons avermelhados, podendo variar desde o esbranquiçado até ao acastanhado. Aglutinando os grãos encontramos essencialmente cimento silicioso (incolores a esbranquiçados) e/ou ferruginoso (avermelhado, acastanhado ou amarelado) com distribuição heterogênea. De um modo geral o cimento silicioso confere maior resistência aos arenitos do que o cimento ferruginoso.

A escavabilidade dos arenitos depende essencialmente do tipo e quantidade do cimento, pelo que apresentam condições de escavabilidade muito variáveis. A natureza siliciosa dos grãos associada ao cimento também silicioso dificultam o desmonte e tornam os arenitos bastante abrasivos.

As sondagens mecânicas à percussão executadas para este projecto descrevem os arenitos (grés) como sendo areia, podendo induzir em erro quem desconheça a geologia local. É de ter presente a importância e significado da terminologia geológica utilizada em geotecnia que, sem margem para dúvidas, coloca todos os arenitos no grupo das rochas sedimentares detríticas, enquanto que as areias são classificadas como solos.

3. MÉTODO SÍSMICO

A impedância sísmica é o produto da velocidade de propagação das ondas pela densidade dos materiais onde se propagam. Sempre que os solos e rochas evidenciem contraste de impedância ocorrem nas interfaces fenómenos de reflexão e refração de ondas (ALMEIDA, 1999). Uma onda sísmica é uma perturbação mecânica que se propaga num meio a partir de um foco, diminuindo a sua intensidade por espalhamento e atenuação à medida que se afasta da sua origem. As ondas volumétricas são designadas por ondas primárias, P, quando são compressivas, ou designadas por ondas secundárias, S, quando são de corte (MOONEY, 1984).

Como o mecanismo da propagação da deformação (velocidade de onda) está dependente dos parâmetros elásticos do meio e da sua continuidade, o método sísmico tem grande aplicação em geotecnia. Uma aplicação corrente consiste em utilizar as velocidades de propagação das ondas P para estimar as características de desmonte de um terreno. Assim é possível avaliar se um terreno será escavável, ripável ou se deve ser desmontado com explosivos. Existem técnicas aplicáveis a partir da superfície (reflexão e refração) e em furos de sondagem (sísmica directa e tomografia sísmica). O método de reflexão sísmica a pequena profundidade e a tomografia entre furos está nos limites da investigação pelo que será uma técnica de utilização corrente num futuro próximo.

Ao nível das técnicas de elevada resolução espacial, a que geralmente é mais utilizada, é a da refração sísmica. A geometria de aquisição de dados para um perfil de refração sísmica implica a colocação de geofones segundo um alinhamento à superfície do terreno. Nos extremos e, eventualmente no centro desse perfil o operador gera um impulso, com um maço metálico ou com explosivos, que se propaga a partir do foco, atingindo por um lado cada geofone sucessivamente mais afastado e por outro a interface entre as várias unidades geotécnicas (solo ou rocha), onde se decompõe em ondas refractadas e em ondas reflectidas (TELFORD *et al.*, 1976). Num registo tempo-distância determinam-se as primeiras chegadas, nas quais se apoia a interpretação do modelo de terreno. Pode-se considerar que a aplicação deste método é útil no projecto de vias de comunicação, túneis, obras de arte e edifícios de grande porte no sentido de definir a geometria do substracto rochoso e as velocidades sísmicas nos terrenos, possibilitando também a avaliação das características de desmonte dos terrenos.

4. DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES SÍSMICAS

Antes da topografia do terreno ter sido alterada em resultado das escavações, poderia ter sido feita uma campanha de prospecção geofísica com a realização de perfis de sísmica de refração para a caracterização do maciço e a definição das condições de desmonte.

Como a morfologia conferida ao terreno, após a execução das escavações para a implantação das fundações do edifício, não permitia a realização dos perfis de sísmica de refração, optou-se por uma técnica não convencional, pois que os melhores locais para a implantação dos geofones eram os taludes semi-verticais resultantes das escavações (fig. 1). Além disso parte da estrutura do edifício já tinha sido construída, limitando a área disponível para caracterização do maciço. A técnica aplicada permitiu caracterizar dos locais ensaiados, tendo sido utilizada a tabela de ripabilidades (fig. 2) para análise da aptidão do terreno ao desmonte.

Foram definidos sete perfis em zonas previamente seleccionadas de modo a cobrir os diversos tipos de terrenos encontrados durante a escavação. Para a realização destes perfis foram utilizados geofones para medir ondas S, embora eles tenham lido a chegada das ondas P, visto que foram instalados nos taludes sub-verticais, ao contrário da técnica tradicional em que os geofones são implantados na superfície do solo, em planos horizontais ou semi-horizontais. Para a colocação dos geofones na superfície da rocha houve necessidade de efectuar pequenos furos, perpendiculares ao talude, com cerca de 10 cm de profundidade, utilizando um berbequim com uma broca de 7 mm de diâmetro. Este procedimento permitiu uma boa cravação dos geofones nos taludes, utilizando um maço de borracha, assegurando um bom contacto físico com o maciço rochoso.

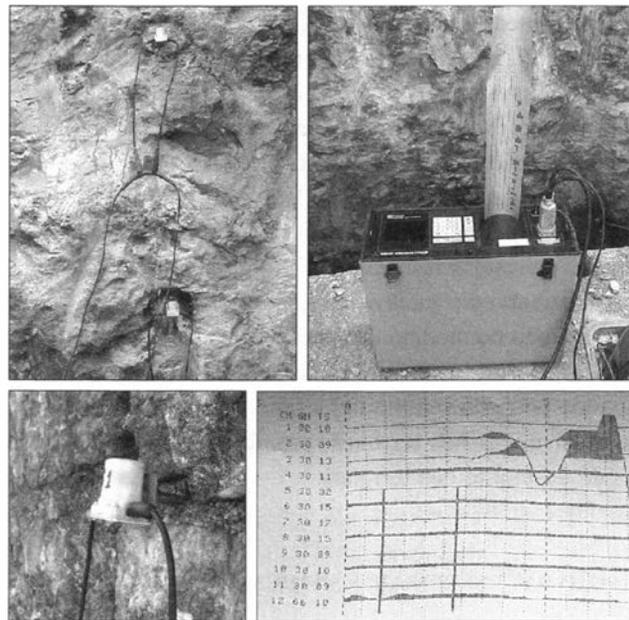


Fig. 1 – Equipamento utilizado para a determinação das velocidades das ondas sísmicas. Em cima, à esquerda: geofones cravados no talude vertical. Em cima, à direita: o sísmógrafo utilizado. Em baixo: Pormenor de um geofone utilizado e um exemplo de registo sísmico obtido.

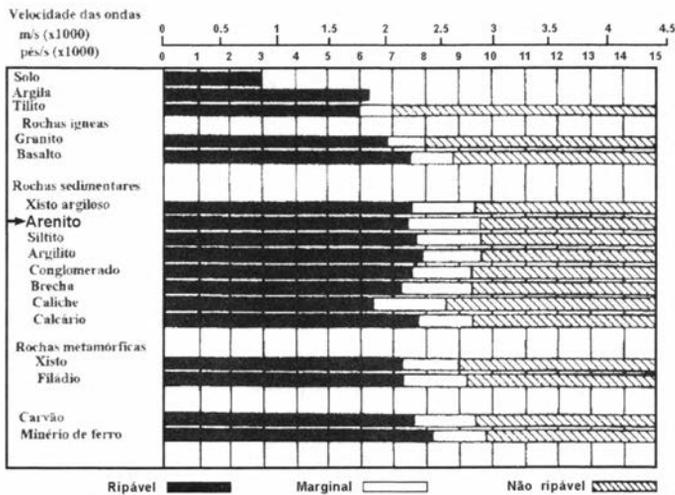


Fig. 2 – Tabela de ripabilidade para o *ripper* D8L da Caterpillar (modificado de CATERPILLAR, 1992).

Como o objectivo do trabalho era a caracterização pontual do maciço foram feitos perfis curtos, com um comprimento adequado, mas sempre com a preocupação de cada perfil estar localizado numa zona representativa do maciço.

Na execução de cada perfil foram usados quatro geofones, com uma frequência de 14 Hz, tendo sido efectuado os tiros directo e inverso. Em cada ponto de medida foram implantados dois geofones espaçados 1 m na vertical (fig. 1), o que permitiu efectuar quatro medições das velocidades por perfil e verificar a fiabilidade dos resultados obtidos individualmente.

Os resultados obtidos na prospecção geofísica, em conjunto com o reconhecimento geológico e geotécnico, permitiram estimar as características de escavabilidade dos terrenos. Com efeito, o conhecimento dos valores das velocidades de propagação das ondas sísmicas longitudinais, nos diferentes tipos de terreno, constitui um bom índice para essa avaliação.

Este procedimento é amplamente utilizado nas grandes obras rodoviárias, tal como o demonstram os cadernos de encargos do IEP ou da BRISA. No essencial baseia-se na determinação das condições de desmonte do terreno, conhecendo a natureza geológica dos terrenos e a velocidade de propagação das ondas primárias, utilizando como referência, por exemplo, a tabela desenvolvida para o *ripper* D8L da Caterpillar. Definem-se então três campos em que o terreno é considerado ripável recorrendo a “meios mecânicos”, marginal, ou não ripável para diversos materiais geológicos (fig. 2).

Será de ter em conta que os critérios em que se baseia a atribuição dos meios de escavação, mecânicos ou com explosivos, utiliza informação que é obtida indirectamente, não sendo exaustiva, pelo que é usual também utilizar os elementos obtidos nas observações efectuadas à superfície, em cortes existentes no terreno, e os dados obtidos com a prospecção e caracterização mecânica.

6. ENSAIOS REALIZADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Os ensaios realizados estão localizados na Figura 3 e identificados com pares de letras (AB, CD, EF, GH, IJ, KL e MN).

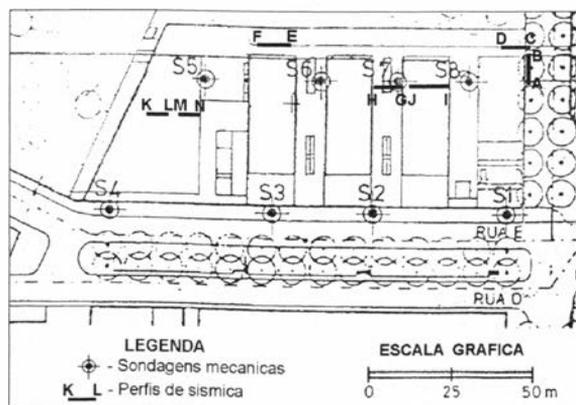


Fig. 3 – Planta de localização dos ensaios realizados.

Em todos os perfis foram medidas as velocidades segundo os dois sentidos, e determinado o valor médio das velocidades sísmicas nestes locais.

Na Tabela I são apresentados os comprimentos dos perfis e os tempos medidos, o que permitiu determinar a velocidade das ondas sísmicas no volume de rocha entre os pontos extremos dos perfis.

Tabela I – Resultados das medições das velocidades de propagação das ondas sísmicas nos diversos perfis.

Locais (e sentido da medição)	Tempos (ms)	Distâncias (m)	Velocidades (m/s)	Vel. média (m/s)	Dificuldade de Escavação	Ripabilidade	Obs.
AB	3,338	5,27	1579	1582	Difícil	Ripável	Arenitos finos, vermelhos com intercalações siltsosas
BA	3,325	5,27	1585				
CD	3,675	6,75	1837	1732	Difícil	Ripável	
DC	4,150	6,75	1627				
EF	3,375	7,40	2193	2280	Muito Difícil	Marginal*	
FE	3,125	7,40	2368				
GH	14,875	6,10	410	413	Fácil	Ripável	Arenitos médios a grosseiros, claros, mal cimentados por óxidos.
HG	14,650	6,10	416				
IJ	13,925	10,80	776	777	Fácil	Ripável	
JI	13,875	10,80	778				
KL ₁	2,750	1,40	509	732	Variável (moderada)	Ripável	
LK ₁	4,125	3,94	955				
KL ₂	4,250	4,12	969	786	Variável (moderada)	Ripável	
LK ₂	2,625	1,58	602				
MN ₁	6,500	3,04	468	452	Variável (moderada)	Ripável	
NM ₁	11,500	5,01	436				
MN ₂	6,125	2,65	433	535	Variável (moderada)	Ripável	
NM ₂	7,250	4,62	637				

*Marginal, significa que o terreno necessita do uso de explosivos, podendo ser ripável, em função das características locais.

₁ ou ₂ correspondem a ensaios com locais de geração da onda sísmica diferentes.

Na figura 4 apresentam-se aspectos dos locais de execução dos perfis AB e CD, localizados respectivamente no talude de escavação nascente e no talude de escavação norte, no canto noroeste do edifício. Os arenitos são finos, de tons avermelhados a esbranquiçados, com intercalações de níveis mais siltsosos de cor vermelha. As velocidades médias obtidas para os perfis AB e CD foram respectivamente de 1582 m/s e de 1732 m/s. Apesar de elevadas, estas velocidades ainda se situam dentro do domínio dos materiais ripáveis segundo a carta de ripabilidade para o *ripper* D8L da Caterpillar, apresentada na figura 2.

O perfil EF foi realizado no talude de escavação norte, na metade ponte, correspondendo à zona onde foram efectuados 3 desmontes com explosivos. A figura 5 mostra o aspecto do local de execução do perfis EF.

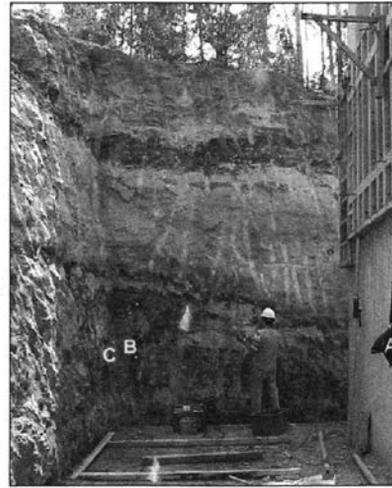
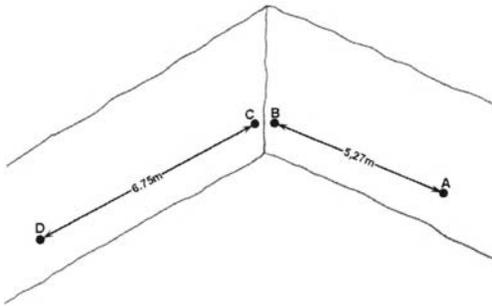


Fig. 4 – Esboço do local de implantação dos geofones e aspectos dos locais de execução dos perfis AB e CD.

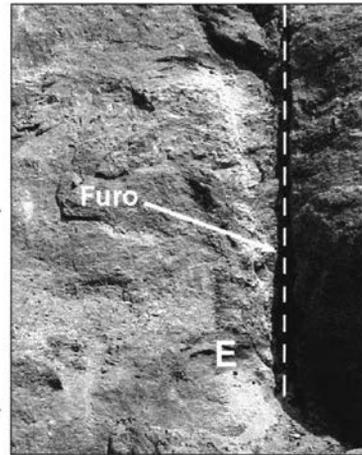
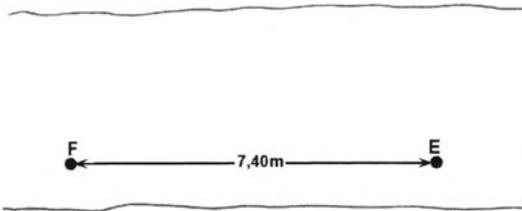


Fig. 5 – Esboço do local de implantação dos geofones e aspecto do local de execução do perfil EF. Neste local foram utilizados explosivos, sendo visível, à direita, vestígios do furo utilizado.

Os arenitos são de grão médio, com cimento silicioso, apresentando tons claros, amarelo-acastanhados. A velocidade média de propagação das ondas sísmicas foi 2280 m/s, com um valor máximo de 2368 m/s. Estes valores de velocidades correspondem à zona marginal da carta de ripabilidade para o *ripper* D8L da Caterpillar (figura 2).

A zona designada como marginal significa que o terreno necessita do uso de explosivos, podendo no entanto ser ripável, dependendo das características locais

e da potência do *ripper* utilizado. Como nesta zona o maciço praticamente não apresenta descontinuidades e as bancadas são muito espessas, não é possível executar a ripagem do terreno com eficiência. Outro equipamento possível de utilizar nestas condições seriam os martelos demolidores de elevada energia, que no entanto têm rendimentos bastante baixos, a crescer à elevada abrasividade e dureza dos arenitos quartzosos e ao impacte ambiental provocado pelas vibrações e ruído contínuo.

Para caracterizar a zona central da escavação foram efectuados ensaios “in situ” no patamar mais elevado, locais GH e IJ, junto ao degrau para o patamar intermédio, tal como se observa nas Figura 6. Na zona encontramos arenitos de grão médio a grosseiro, pouco cimentados, essencialmente por óxidos de ferro, apresentando tons acastanhados. As médias das velocidades obtidas atestam bem a facilidade de escavação destes materiais, que foi executada com meios mecânicos, apresentando valores de 413 m/s no perfil GH e de 777 m/s no perfil IJ.

No interior do edifício, na cave ao nível do arruamento principal, foram realizados dois ensaios para cada um dos perfis KL e MN. Para a realização deste perfil foram utilizados os pontos K', L' e M', N' para geração da onda sísmica (figura 7), pois verificou-se que a proximidade das sapatas do edifício influenciava os resultados, ao criar caminhos preferenciais de maior velocidade sísmica.

Localmente os arenitos são de grão médio a grosseiro, com cimentação muito heterogénea, apresentando tons acastanhados.

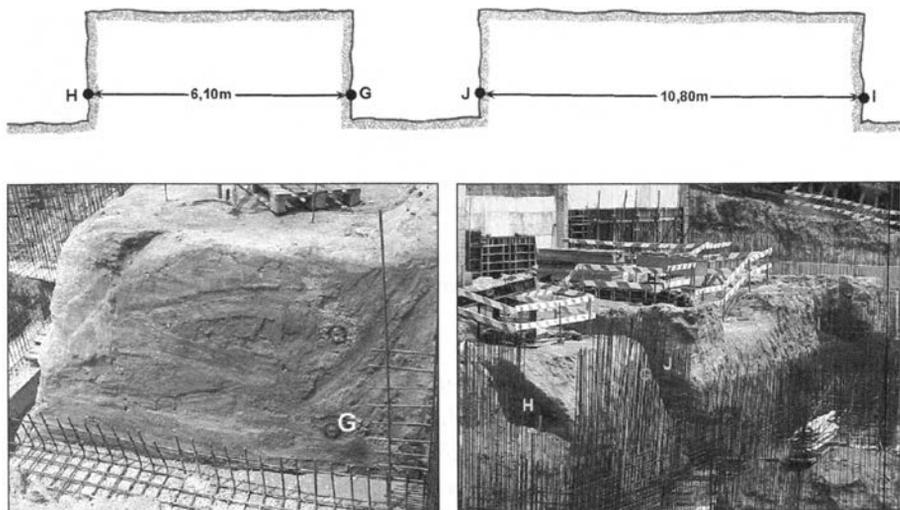


Fig. 6 – No topo da figura está representada a planta de localização dos perfis GH e IJ. Em baixo à direita vista geral do local de implantação destes dois perfis. Em baixo à esquerda, pormenor do maciço e do local de medida G.

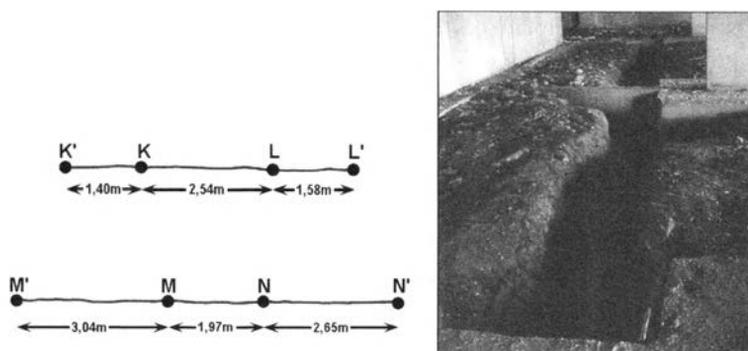


Fig. 7– Esboço da localização dos geofones e dos locais de geração da onda sísmica dos perfis KL e MN. Aspecto do local no interior do edifício onde foram efectuados os perfis.

Os resultados das médias das velocidades sísmicas para o perfil KL variam entre 732 m/s e 786 m/s. Para o perfil MN as médias das velocidades sísmicas variam entre 452 m/s e 535 m/s. Qualquer dos valores obtidos para estes perfis confirma a facilidade de escavação no local em que a escavação foi executada com meios mecânicos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As sondagens mecânicas à percussão executadas para este projecto, descrevendo os arenitos como sendo areia, terão levado a considerar que se trataria de uma escavação em solos, o que não se veio a confirmar em obra.

A interpretação da estrutura geológica local mostrou que as camadas inclinam suavemente para SW. Os resultados das velocidades sísmicas mostram que as camadas superiores, aflorantes no patamar mais elevado das fundações e na face norte da escavação, exibem maiores valores de velocidades sísmicas que nas camadas inferiores aflorantes no patamar intermédio e ao nível do arruamento.

A realização de perfis de sísmica de refração, numa fase anterior às escavações efectuadas, não teria fornecido bons resultados devido à inversão de velocidades sísmicas em profundidade, o que poderia ter induzido a erros na interpretação e na selecção do método de desmonte.

A técnica utilizada para medir as ondas P nos taludes sub-verticais das fundações do edifício, recorrendo aos geofones das ondas S, mostrou-se perfeitamente adequada para a determinação das velocidades de propagação das ondas sísmicas. Os resultados das velocidades sísmicas mostraram que apenas um dos locais ensaiados, o local correspondente ao perfil EF, apresenta características de escavabilidade que não são possíveis de desmontar com meios mecânicos correntes, sendo necessário recorrer a explosivos ou a martelos demolidores.

Os valores das velocidades das ondas sísmicas obtidas neste trabalho, para os arenitos com velocidades sísmicas mais elevadas, são idênticos aos valores obtidos por SEABRA (1989) num trabalho efectuado para caracterização de maciços rochosos por sísmica de refração e ultra sons, na região de Coimbra.

Os restantes locais apresentam características compatíveis para serem efectuadas através do desmonte com meios mecânicos, ou seja são possíveis de desmontar recorrendo a equipamentos do tipo pás mecânicas, eventualmente após a utilização de um *ripper* para soltar o terreno, nos locais com velocidades mais elevadas.

AGRADECIMENTOS

À empresa de construção OPCA, S.A. pelas facilidades concedidas na aquisição de dados e realização do trabalho, ao Gabinete Técnico da Reitoria da U.C. e ao Instituto Pedro Nunes. Este trabalho foi realizado no âmbito do Centro de Geociências da Universidade de Coimbra.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F., 1999 – Geofísica aplicada no desenvolvimento de projectos. *Actas da 6ª Conferência Nacional Sobre a Qualidade do Ambiente*, vol. nº 2, pp. 685-694. Lisboa.
- CATERPILLAR, 1992 - *Caterpillar performance handbook*. Caterpillar.
- FERREIRA, M. Q. e FIGUEIREDO, F. P., 2002 – Avaliação da escavabilidade dos terrenos de implantação da Unidade Pedagógica Central do Polo II - Universidade de Coimbra. Relatório interno. Instituto Pedro Nunes, Coimbra.
- MOONEY, H. M., 1984 – *Handbook of Engineering Geophysics*. Volume 1: Seismic. Bison Instruments, Inc. U.S.A..
- SEABRA, A. E. R. O., 1989 – Contribuição para o conhecimento das características de elasticidade dinâmica do Grés de Silves em Coimbra. *Memórias e Notícias* nº. 107, Publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da U. C.
- SOARES, A. F., MARQUES, J. F. e ROCHA, R. B., 1985 – Contribuição para o conhecimento geológico de Coimbra. *Memórias e Notícias* nº. 100, Publicação do Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. e KEYS, D. A., 1976 – *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Nova York, E.U.A.

GRANITOS ORNAMENTAIS DO NORDESTE DE PORTUGAL – INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

L. M. O. SOUSA ¹

PALAVRAS CHAVE: granito, rocha ornamental, propriedades físico-mecânicas, fissuração, meteorização.

KEY WORDS: granite, dimension stone, physico-mechanical properties, fissuration, weathering.

RESUMO

Observações efectuadas com o auxílio do microscópio electrónico de varrimento permitiram a identificação do tipo de fissuras (intergranulares, intragranulares e transgranulares). Com base nestes dados foi calculado um índice de fissuração, designado densidade linear de fissuração, definido como o número de fissuras por unidade de comprimento.

Neste tipo de rochas os vazios são essencialmente do tipo microfissures e observa-se uma boa relação entre a porosidade aberta e densidade linear de fissuração. A resistência à compressão uniaxial e a velocidade de propagação das ondas longitudinais diminuem com o aumento da fissuração. A resistência à meteorização é mais elevada nos granitos com maior porosidade e/ou maior densidade de fissuração.

Os resultados obtidos mostram a importância do conhecimento das características físico-mecânicas de modo a evitar usos inapropriados dos granitos ornamentais.

¹ Departamento de Geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 1013, 5000-911 Vila Real, Portugal, lsousa@utad.pt.

ABSTRACT: The ornamental granites of Northeast Portugal: microfissure index versus geomechanics

Observations under scanning electron microscopy allows the identification of the type of fissures (intergranular, intragranular and transgranular ones). Based on collected data, a fissuration index, called linear crack density, defined by the number of fissures per length unit, was calculated.

In this kind of rocks the voids are mainly microfissures and a good correlation between the open porosity and the linear crack density was found. The uniaxial compressive strength and the velocity of compressional waves decrease as the linear crack density increases. The weathering resistance is higher in granites with high porosity and/or high linear crack density.

The results show the importance of the knowledge of the rock physico-mechanical properties to avoid inappropriate applications of the ornamental granites.

I. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades físico-mecânicas das rochas é fundamental para avaliar a sua aptidão ornamental, incluindo a durabilidade. Estes dados deverão permitir concluir sobre o melhor uso dos diferentes materiais: pavimento, revestimento interior ou exterior, etc.

Os vazios que as rochas apresentam, sobretudo as fissuras, afectam as suas propriedades físico-mecânicas e são responsáveis pela anisotropia verificada em muitas delas (MCWILLIAMS, 1966; ENGELDER and PLUMB, 1984; ALMEIDA *et al.*, 1998). A determinação da densidade de fissuração pode ser efectuada através de observações no microscópio óptico ou no microscópio electrónico (SCHIEDL *et al.*, 1986; MONTOTO *et al.*, 1994).

As condições ambientais, a composição mineralógica, a textura e as características dos vazios são os principais factores que controlam a intensidade dos danos físicos que as rochas apresentam (HUDEC, 1998). As rochas evidenciam uma meteorização mensurável devido às condições ambientais (HALSEY *et al.*, 1998), contudo ela é mais difícil de observar em granitos pouco porosos. O objectivo dos ensaios de alterabilidade é a reprodução acelerada em laboratório dos lentos processos naturais de meteorização (DEARMAN, 1982; MARTIN *et al.*; 1992; ASLAM, 1992; GROSSI *et al.*, 1997; RIVAS *et al.*, 1998; PARK *et al.*, 1998).

Neste trabalho foram determinadas algumas propriedades de alguns granitos utilizados para fim ornamental ou com possibilidade para tal. A quantificação da fissuração permitiu avaliar a importância da fissuração natural nas propriedades físico-mecânicas e na resistência aos agentes meteoricos (cristalização de sais e choque térmico).

2. GRANITOS ESTUDADOS

Os granitos estudados localizam-se no nordeste de Portugal e pertencem a dois tipos: sin-tectónicos e pós-tectónicos em relação à terceira fase da Orogenia Hercínica (fig. 1). Estes granitos são rochas de grão médio a grosseiro, alguns deles com textura porfiróide (SOUSA, 2000).

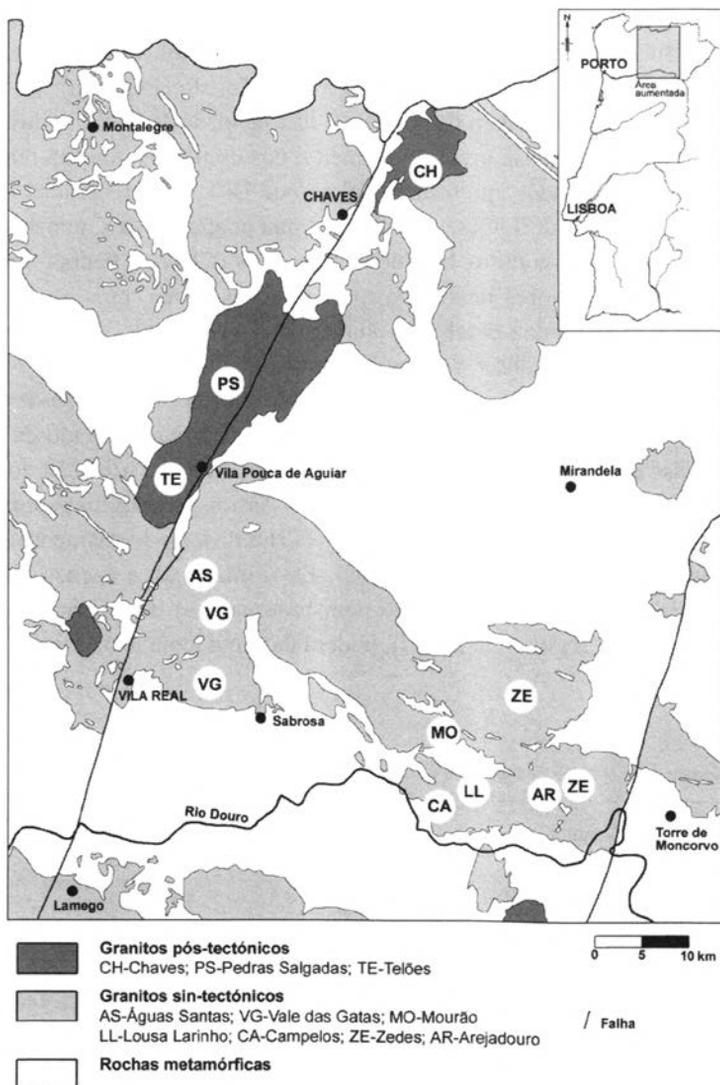


Fig. 1 – Localização dos granitos (geologia adaptada dos Serviços Geológicos de Portugal, 1992).

3. ESTUDO DA FISSURAÇÃO

A estimação da densidade linear de fissuração – DLF (número de fissuras por milímetro) foi efectuada por observação no microscópio electrónico de varrimento, por contagem do número de fissuras em algumas linhas de observação com o comprimento total de 50 mm.

As fissuras intragranulares são as mais observadas, com valores entre 62,9% e 82,3% da fissuração total. As fissuras intragranulares nos feldspatos constituem, em geral, mais de metade do total de fissuras. ÁLVAREZ-CALLEJA *et al.* (1993) também verificaram a preponderância da fissuração nos feldspatos em relação às outras fases minerais no granito de El Berrocal (Toledo, Espanha). As fissuras intergranulares, que representam menos de 1/3 da totalidade das fissuras dos granitos estudados, estão localizadas preferencialmente nos contactos quartzo-feldspato.

Os granitos estudados apresentam valores de DFL compreendidos entre 1,4 fissuras/mm, no granito de Telões, e 5,9 fissuras/mm no granito de Campelos (Tabela I). Como esperado, os granitos biotíticos mais são (Chaves, Pedras Salgadas e Telões) apresentam valores baixos do índice de fissuração, pois a presença de descontinuidades é fundamental para aumentar a velocidade de meteorização. Os valores mais elevados observam-se nos granitos de Lousa-Larinho (4,8 fissuras/mm) e Campelos (5,9 fissuras/mm); o granito de Águas Santas, apesar de ser o mais meteorizado dos estudados, não apresenta o valor mais elevado de DLF.

Com base nos dados de fissuração apresenta-se uma classificação do grau de meteorização dos granitos estudados (Tabela II). Assim, os granitos estudados são classificados como são (TE), pouco alterados (CH e PS), moderadamente alterados (VG, ZE, MO) e alterados (LL, CA e AS). Esta ordenação é apenas indicativa, pois o uso de um índice de fissuração com base na área das fissuras, tal como proposto por AL-QUdami *et al.* (1997), poderá dar uma ideia mais precisa do grau de microfissuração.

Tabela I – Índice de fissuração dos granitos estudados.

Granito	Densidade linear de fissuração (fissuras/mm)
Chaves (CH)	1,9
Pedras Salgadas (PS)	2,6
Telões (TE)	1,4
Águas Santas (AS)	4,6
Vale das Gatas (VG)	3,0
Mourão (MO)	4,3
Lousa-Larinho (LL)	4,6
Campelos (CA)	5,6
Zedes (ZE)	3,1

Tabela II – Classes de alteração dos granitos com base na densidade linear de fissuração.

Classe de alteração do granito	Grau	Densidade linear de fissuração (fissuras/mm)	Granito
São	I	< 1,5	TE
Pouco alterado	II	1,5 – 3,0	CH, PS
Moderadamente alterado	III	3,0 – 4,5	VG, ZE, MO
Alterado	IV	4,5 – 6,0	LL, CA, AS
Muito alterado	V	> 6,0	

4. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Apresentam-se aqui os valores de algumas propriedades determinadas: porosidade aberta, resistência mecânica à compressão uniaxial e velocidade de propagação das ondas longitudinais. Para a execução dos ensaios e obtenção dos dados foram seguidas as normas R.I.L.E.M. (1980) e as sugestões da I.S.R.M. (1981); para mais informações consultar SOUSA (2000).

Os granitos estudados possuem baixa porosidade, como é comum neste tipo de rochas quando sãs (Tabela III). O granito de Águas Santas, com o valor mais elevado de porosidade (3,7%), é o mais meteorizado; este valor elevado pode tornar inviável a sua utilização em revestimentos exteriores, pelo menos em zonas húmidas e/ou de clima continental. Os granitos sãs apresentam uma elevada resistência mecânica à compressão, com o granito de Pedras Salgadas (197,0 MPa) a evidenciar-se em relação aos restantes granitos sãs (Chaves e Telões); esta diferença pode ser atribuída à menor dimensão do grão do primeiro e à heterogeneidade dos últimos dois, tal como já foi observado por WONG *et al.* (1996) noutros granitos. No outro extremo o granito de Águas Santas destaca-se com um valor muito baixo (62,4 MPa), devido à elevada meteorização que pode restringir o seu uso em determinadas situações.

Tabela III – Valores médios da porosidade aberta (n_0), resistência mecânica à compressão uniaxial (RMC) e velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p).

Granito	n_0 (%)	RMC (MPa)	V_p (m/s)
Chaves	0,76	158,5	5753
Pedras Salgadas	0,94	197,0	4516
Telões	0,64	153,0	4338
Águas Santas	3,72	62,4	2339
Vale das Gatas	0,88	107,4	3787
Mourão	1,00	126,2	4258
Lousa-Larinho	1,00	140,1	3916
Campelos	1,30	87,0	3700
Zedes	1,00	99,3	3877

Os valores da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p) variam entre 5735 m/s (granito de Chaves) e 2339 m/s (granito de Águas Santas). Com a exceção do granito de Águas Santas, todos os restantes apresentam valores de V_p superiores a 3700 m/s de acordo com os valores obtidos por vários autores em rochas graníticas não muito alteradas (SUÁREZ DEL RÍO, 1982; DELGADO RODRIGUES, 1983; CALLEJA, 1985; EZE, 1997; BEGONHA, 1997; NEIVA *et al.*, 2000).

5. ENSAIOS DE ALTERABILIDADE

Foram realizados dois ensaios de alterabilidade: cristalização de sais e choque térmico.

O ensaio de cristalização de sais foi executado de acordo com as normas R.I.L.E.M. (1980) e as sugestões de ALONSO *et al.* (1987). Para avaliar a evolução dos provetes procedeu-se à determinação de V_p segundo os três eixos. No final do ensaio os provetes foram lavados em água corrente para remoção do sal acumulado no interior. De um modo geral observa-se um aumento de peso dos provetes nos primeiros 15-20 ciclos, devido à acumulação de sal (MARTÍNEZ HERNANDO and SUÁREZ DEL RÍO, 1989; IHALAINEN and UUSINOKA, 1994), e de seguida verifica-se uma diminuição de peso, sendo esta mais acentuada no granito mais poroso (Águas Santas) (Tabela IV).

A metodologia para a realização do ensaio de choque térmico não seguiu nenhuma norma pré-estabelecida, e foi concebido para avaliar a influência de uma variação abrupta de temperatura. Para a execução do ensaio foram definidas duas etapas: aquecimento a 105°C durante duas horas e imersão em água a 20°C durante duas horas.

Tabela IV – Variação de peso após o ensaio de cristalização e sais.

Granito	Variação de peso (%)	
	com sal	após lavagem
Chaves	-0,06	-0,16
Pedras Salgadas	-0,07	-0,25
Telões	-0,06	-0,14
Águas Santas	-3,14	-3,74
Vale das Gatas	-0,15	-0,29
Mourão	-0,19	-0,32
Lousa-Larinho	-0,16	-0,33
Campelos	-0,53	-0,71
Zedes	-0,40	-0,54

Tabela V – Diminuição de V_p no ensaio de choque térmico.

Granito	Diminuição de V_p (%)	
	ciclo 54	ciclo 125
Chaves	10,2	10,8
Pedras Salgadas	12,5	12,7
Telões	12,9	14,0
Águas Santas	5,9	8,1
Vale das Gatas	9,3	10,2
Mourão	10,2	12,1
Lousa-Larinho	9,6	11,3
Campelos	5,1	7,2
Zedes	5,9	7,4

Os danos induzidos foram avaliados pela variação da velocidade de propagação das ondas longitudinais. Todos os granitos sofrem uma diminuição de V_p ; este decréscimo é mais significativo nos primeiros ciclos. Esta diminuição estará relacionada com as alterações físicas que ocorrem na zona exterior dos provetes, como são o desenvolvimento de fissuras intergranulares e o alargamento das pré-existentes (SUZUKI *et al.*, 1995; SUZUKI *et al.*, 1998). Os danos maiores, avaliados em termos de velocidade de propagação das ondas longitudinais, verificam-se nos granitos menos alterados (CH, TE e PS) (Tabela V).

6. INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Apresentam-se de seguida os gráficos que relacionam as propriedades obtidas e os resultados dos ensaios de alteração com os dados de fissuração. Os ajustes e os valores de R^2 são apenas indicativos, porque a distribuição dos valores de porosidade não permite a generalização das equações matemáticas.

Há uma boa correlação entre a porosidade aberta e a densidade linear de fissuração, com excepção do granito de Águas Santas (fig. 2); neste tipo de rochas os vazios são constituídos essencialmente por fissuras, logo esta relação é considerada normal. Devido à sua elevada meteorização, o granito de Águas Santas não segue a linha de tendência dos outros granitos.

A resistência mecânica à compressão pode ser relacionada com a densidade linear de fissuração, apesar do ajuste pouco significativo (fig. 3). Na figura 4 apresentam-se os valores de V_p e DLF; pode ser inferido uma diminuição de V_p com o aumento da fissuração, tal como observado por RICHTER and SIMMONS (1977).

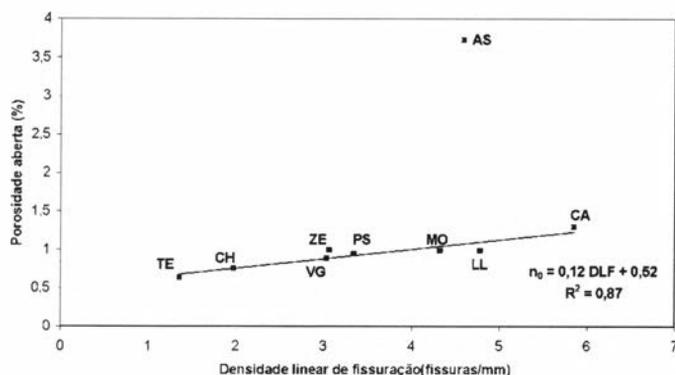


Fig. 2 – Relação entre a porosidade aberta (n_0) e a densidade linear de fissuração (DLF); ajuste sem o granito AS (significado das letras na figura 1).

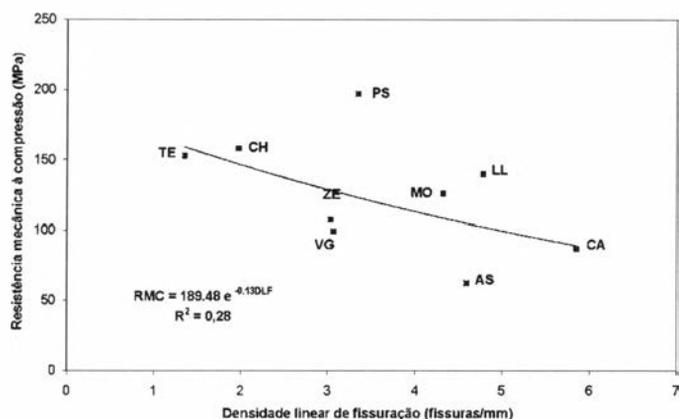


Fig. 3 – Relação entre a resistência mecânica à compressão uniaxial (RMC) e a densidade linear de fissuração (DLF) (significado das letras na figura 1).

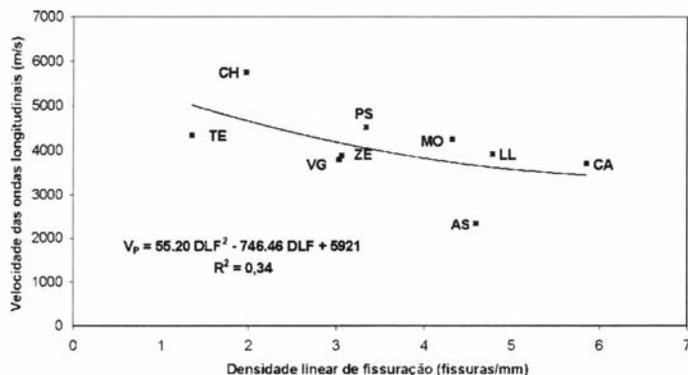


Fig. 4 – Relação entre a velocidade das ondas longitudinais (V_p) e a densidade linear de fissuração (DLF) (significado das letras na figura 1).

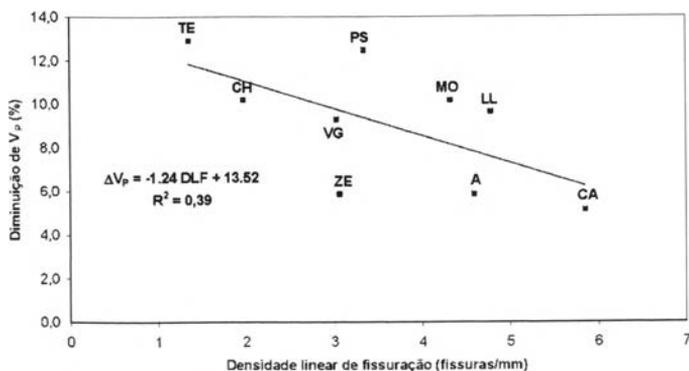


Fig. 5 – Relação entre a diminuição da velocidade das ondas longitudinais após o ensaio de choque térmico (ΔV_p) e a densidade linear de fissuração (DLF) (significado das letras na figura 1).

A diminuição de V_p no ensaio de choque térmico está relacionada com a DLF; os granitos mais porosos e fissurados apresentam as maiores variações e vice-versa (figura 5). Os granitos alterados possuem espaço livre para a expansão e contracção; nos granitos menos alterados a rápida contracção leva à formação de novas fissuras. Contudo, a qualidade dos granitos são após o ensaio de choque térmico, avaliada em termos de V_p , é maior do que a dos granitos alterados antes do ensaio.

7. CONCLUSÕES

A maioria das propriedades físico-mecânicas dos granitos usados como rocha ornamental é influenciada pelas características dos vazios. Como nos granitos são os vazios são constituídos por essencialmente por microfissuras, obtiveram-se relações significativas entre a densidade linear de fissuração e: porosidade aberta, resistência mecânica à compressão, velocidade de propagação das ondas longitudinais e resistência à meteorização. Com base nas propriedades físico-mecânicas e nos resultados dos ensaios de alteração concluiu-se que não é recomendável a utilização do granito de Águas Santas como rocha ornamental, em especial em aplicações externas devido à sua alta porosidade e baixa durabilidade, e em pavimentos devido à sua provável baixa resistência ao desgaste.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, L.C.R., MARQUES, E.A.G., VARGAS Jr, E.A., BARROS, W.T. (1998) – Characterization and utilization of tensile strength and toughness of granitic and gneissic rocks of Rio de Janeiro City – A proposal for optimizing rock blasting processes. Proc.

- 8th Int. Cong. of IAEG (Moore, D.P and Hungr, O., eds.), Vancouver, Balkema, vol. 1, pp. 351-357.
- ALONSO, F.J., ORDAZ, J., VALDEÓN, L., ESBERT, R.M. (1987) – Revisión crítica del ensayo de cristalización de sales. *Materiales de Construcción* 206, 53-60.
- AL-QUdami, D. SHEHATA, W.M. AL-HARTHI, A.A., SABTAN, A.A. (1997) – On the weathering of syenite under arid conditions. *Bulletin of IAEG* 56, 3-8.
- ÁLVAREZ-CALLEJA, A., RODRÍGUEZ-REY, A., MONTOTO, M., MENÉNDEZ, B., DUBOIS, C. (1993) – Cuantificación mediante estudio esterológico del sistema microfisural del granito de El Berrocal (Sistema Central, Toledo, España). *Acta Geológica Hispánica* 28(4), 63-69.
- ASLAM, M. (1992) – Studies on conservation of marble in Agra monuments. *Proc. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone* (Delgado Rodrigues et al., eds.), Lisbon, vol. 2, pp. 1507-1515.
- BEGONHA, A.J.S. (1997) – Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edificios da cidade do Porto. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Portugal.
- CALLEJA, L. (1985) – Variación de propiedades físicas en rocas sometidas a gradientes térmicos. Tesis Doctoral. Dpto. de Petrología, Fac. de Geología, Universidade de Oviedo, España, 252 pp.
- DEARMAN, W.R. (1982) – Selection of sandstone for architectural purposes. *Proc. 4th Cong. IAEG*, vol 6, pp. 333-344.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1983) – Laboratory Study of thermally-fissured rocks. *Memória* 583, LNEC.
- ENGELDER, T., PLUMB, R. (1984) – Changes in in situ ultrasonic properties of rock on strain relaxation. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* 21(2), 75-82.
- EZE, E.O. (1997) – Geotechnical assessment of some charnockites from Nigeria as construction materials. *Quart. J. of Eng. Geology* 30, 231-236.
- GROSSI, C. M., ESBERT, R. M., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., MONTOTO, M., LAURENZI-TABASSO, M. (1997) – Acoustic emission monitoring to study sulphate crystallisation in monumental porous carbonate stones. *Studies in Conservation* 42, 115-125.
- HALSEY, D.P., MITCHELL, D.J., DEWS, S.J. (1998) – Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Quart. J. of Eng. Geology* 31, 359-367.
- HUDEC, P.P. (1998) – Rock properties and physical processes of rapid weathering and deterioration. *Proc. 8th International Congress of IAEG* (Moore, D.P and Hungr, O., eds.), Balkema, vol. 1, pp. 335-341.
- I.S.R.M. (1981) – Rock characterization testing and monitoring. I.S.R.M. suggested methods (Brown, E.T., ed.).
- IHALAINEN, P.E., UUSINOKA, R.P.J. (1994) – Comparison of weathering resistance of some building stones based on treatments simulating different external conditions. *Proc. 7th Inter. Cong. of IAEG* (OLIVEIRA, R. *et al.*, eds.), Lisboa, Balkema, vol. 5, pp. 3613-3618.
- MARTIN, L., BELLO, M.A., MARTIN, A. (1992) – Accelerated alteration tests on the stones used in the cathedral of Granada (Spain). *Proc. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone* (Delgado Rodrigues et al., eds.), Lisboa, vol. 2, pp. 845-850.
- MARTÍNEZ HERNANDO, A., SUÁREZ DEL RÍO, L.M. (1989) – Alterabilidad de algunos materiales graníticos de la Comunidad de Castilla y León utilizables como rocas ornamentales. *Simposio sobre Rocas Industriales y Ornamentales, Mieres del Camino* (Asturias), 11 pp.
- MCWILLIAMS, J.R. (1966) – The role of microstructure in the physical properties of rock. *Testing techniques for rock mechanics, ASTM STP* 402, 175-189.

- MONTOTO, A.M., RODRÍGUEZ-REY, A., MENÉNDEZ, B., MARTÍNEZ-NISTAL, A., RUIZ DE ARGANDOÑA, V.G., SUÁREZ DEL RÍO, L.M., CALLEJA, L. (1994) – Microfractography of “El Berrocal granite”. Proceedings of an international workshop “Nuclear science and technology” (Maravic, H e Smellie, eds.), pp 353-358.
- NEIVA, J.M.C., PLASENCIA, N., LIMA, C. (2000) – Características geológico-geotécnicas do maciço rochoso do circuito hidráulico do empreendimento de Venda Nova II. Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia, vol 1, pp 113-121.
- PARK, H.D., KIM, S.S., CHON, H.T. (1998) – Durability of ornamental stone exposed to various weathering environments in Korea. Proc. 8th International Congress of IAEG (Moore, D.P and Hungr, O., eds.), Vancouver, Balkema, vol. 4., pp. 2953-2955.
- R.I.L.E.M. (1980) – Essais recommandés pour mesurer l’altération des pierres et évaluer l’efficacité des méthodes de traitement. *Matériaux et Constructions* 75, 175-253.
- RICHTER, D., SIMMONS, G. (1977) – Microcracks in crustal igneous rocks: microscopy. *The Earth’s crust: its nature and physical properties* (Heacock, J.G., ed.), Geophys. Serv. vol. 20, pp 149-180.
- RIVAS, T., SILVA, B., PRIETO, B. (1998) – Medida de durabilidad de dos tratamientos de hidrofugación aplicados a rocas graníticas. *Materiales de Construcción* 250, 5-14.
- SCHEDL, A., KRONENBERG, A.K., TULLIS, J. (1986) – Deformation microstructures of Barre granite: an optical SEM and TEM study. *Tectonophysics* 122, 149-164.
- SERVIÇOS GEOLÓGICOS DE PORTUGAL (1992) – Carta Geológica de Portugal. Scale 1:500000.
- SOUSA, L.M.O. (2000) – Estudo da fracturação e das características físico-mecânicas de granitos da região de Trás-os-Montes com vista à sua utilização como rocha ornamental. Tese de Doutoramento, Departamento de geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 358 pp.
- SUÁREZ DEL RÍO, L.M. (1982) – Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes. Tesis Doctoral. Departamento de Petrología, Universidad de Oviedo, España.
- SUZUKI, K., Oda, M., KUWAHARA, T., HIRAMA, K. (1995) – Material property changes in granitic rock during long term immersion in hot water. *Eng. Geology* 40, 29-39.
- SUZUKI, K., Oda, M., YAMAZAKI, M., KUWAHARA, T. (1998) – Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 35(7), 907-921.
- WONG, R.H.C., CHAU, K.T., WANG, P. (1996) – Microcracking and grain size effect in Yuen Long marbles. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* vol 33(5), 479-485.

EFEITOS DA CONTAMINAÇÃO SALINA EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

C. A. SIMÕES ALVES¹, A. S. GONÇALVES ANTUNES¹ e J. M. S. MATIAS¹

PALAVRAS CHAVE: contaminação salina, deterioração, materiais de construção.

KEY WORDS: salt contamination, decay, building materials.

RESUMO

Os sais solúveis são um agente frequentemente presente em diversas obras, contribuindo para a deterioração de património antigo e recente e afectando todo o tipo de materiais, naturais e artificiais, porosos (com uma importante acção física pela cristalização dos sais, existindo ainda indicações de alterações químicas em argamassas) ou metálicos (acção predominantemente química). Os efeitos dos sais solúveis em materiais de construção são exemplificados, ilustrando o impacto que a contaminação salina pode ter pela erosão da superfície (que em algumas situações pode implicar o desaparecimento dos materiais, como é o caso das pinturas) ou por alterações cromáticas. São ainda mencionados, baseados no conhecimento das características da contaminação salina, exemplos de possíveis estratégias de prevenção, que podem passar pela selecção de materiais menos contaminantes (com menor conteúdo de componentes reactivos), ou pelo melhoramento dos materiais com a finalidade de os tornar menos susceptíveis aos efeitos da contaminação salina, sendo também referidas possíveis estratégias de remediação para objectos contaminados, entre as quais estratégias baseadas na remoção dos sais (dessalinização) e no controlo climático.

275

¹ Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, 4710-057 Braga.

ABSTRACT: The effects of salt contamination on building materials

Soluble salts are a frequent weathering agent in architectural works, contributing to decay of ancient and new patrimony, affecting all kind of materials, both natural and artificial, both porous (with important decay associated with physical process resulting from salt crystallization and hydration and possible chemical reactions with mortars) and metallic (decay mostly associated with chemical reactions). Effects of salt contamination on ancient and new constructions are exemplified, illustrating the impact of soluble salts by erosive processes (that in some situations, like paints, can imply the total disruption of the material) and by chromatic alterations. Possible prevention strategies are also mentioned, aiming to avoid the impact of recognized salt contamination, like the selection of less contaminant (or reactive) materials or the improvement of materials to made them less susceptible to salt weathering. Remediation strategies for objects already polluted are also referred, being mainly based on the removal of salt contamination (desalination) and climatic control measures.

INTRODUÇÃO

Os sais solúveis são um factor ubíquo nas construções, contribuindo para a deterioração de património antigo e recente e afectando todo o tipo de materiais (DELGADO RODRIGUES, 1979; WINKLER, 1994; AIRES-BARROS, 2001). Os exemplos de contaminação salina encontrados no património arquitectónico apresentam uma diversidade de características geoquímicas que reflecte as inúmeras potenciais fontes de poluição, entre as quais se incluem: precipitação atmosférica (húmida e seca), águas do solo e subterrâneas, dejectos orgânicos e os próprios materiais de construção, incluindo as pedras (como as rochas sedimentares formadas em ambiente marinho – WÜST & SCHLÜCHTER, 2000), argamassas (com ligantes, aditivos, inertes e águas de preparação com composições variáveis), tijolos, etc.

No presente trabalho pretende-se ilustrar efeitos da contaminação salina em diversos materiais de construção no património histórico e recente, mas, tendo em consideração a formação e experiência dos autores, será dado particular destaque à deterioração da pedra granítica. A caracterização da origem da contaminação salina e dos processos de deterioração associados será utilizado para a indicação de possíveis estratégias de prevenção e remediação dos efeitos desta contaminação. Se bem que muitos dos estudos seguidamente apresentados dificilmente poderão ser incluídos no campo clássico da geologia, eles devem ser vistos como trabalhos em que o geólogo pode prestar contribuições desde a selecção de materiais e na orientação e definição de programas analíticos e de conservação de materiais com valor patrimonial.

MATERIAIS POROSOS

Os efeitos da contaminação salina nos materiais de construção mais frequentemente referidos estão maioritariamente associados com acções físicas, resultantes de neoformações no meio poroso (ou na interface entre componentes, no caso do betão). Para tal é necessário a migração das soluções no meio poroso por capilaridade (ensaio de absorção de água ilustrado na fig. 1a) e a cristalização dos sais no interior do meio poroso resultante da secagem (ensaio ilustrado na fig. 1b).

O coeficiente de absorção de água por capilaridade não traduz, no entanto, unicamente a cinética de imbibição mas também a porosidade do meio, pelo que ALVES *et al.* (1996) propõem um coeficiente de capilaridade de variação de massa corrigido pela porosidade. Durante os ensaios de secagem interessa sobretudo a determinação da saturação crítica, correspondente ao momento em que acaba o troço linear de secagem e que indica que a evaporação das soluções passa a ser feito do interior do meio poroso. Para além das características do meio poroso, as condições climáticas afectam o valor da saturação crítica, observando-se o aumento deste parâmetro pela diminuição da humidade relativa (HAMMECKER, 1993; ALVES, 1997) ou pela acção da circulação de vento (HAMMECKER, 1993), condições que, desta forma, favorecem os processos da deterioração.

A cristalização dos sais pode traduzir-se frequentemente em formas de deterioração (patologias) erosivas da superfície da pedra (que podem atingir vários centímetros), como sejam desagregação granular, placas, escamas, etc. Algumas dessas patologias, em pedras graníticas da cidade de Braga, são ilustradas na figura 2. Para além destas transformações da superfície da pedra, GAMA (2001) menciona a contribuição dos sais solúveis para o descolamento de placas de rochas ornamentais. Em algumas situações o avanço da erosão poderá levar mesmo ao desaparecimento de elementos arquitectónicos.

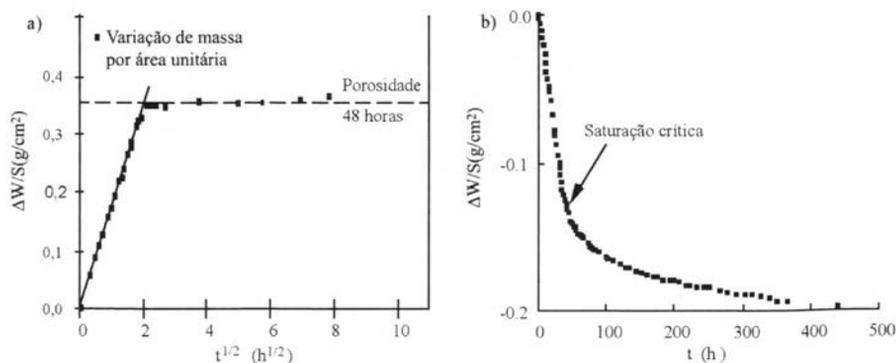


Fig. 1 – Ensaio de imbibição capilar (a) e secagem (b), com indicação do ponto de saturação crítica.

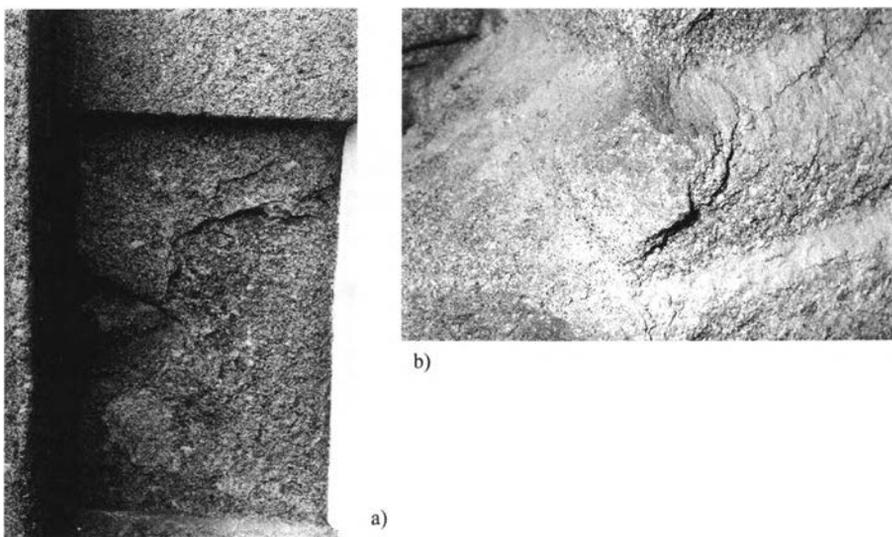


Fig. 2 – Aspectos da deterioração erosiva associada com contaminação salina em pedras graníticas de monumentos da cidade de Braga: a) placas e erosão de pormenores decorativos (Museu dos Biscainhos); b) desagregação granular (Edifício da Assembleia Distrital).

Entre as características que influenciam a intensidade da deterioração física dos materiais porosos pela cristalização dos sais são referidas a pressão de cristalização, associada com o tipo de sal (GOUDIE & VILES, 1997; LA IGLESIA *et al.*, 1997; SCHERER, 1999) e com a sua morfologia (SCHERER, 1999; THEOULAKIS & MOROPOULOU, 1999); as pressões associadas com a distribuição dimensional dos poros (SCHERER, 1999) e ainda as condições que controlam o balanço hídrico (HAMMECKER, 1993; TAKAHASHI *et al.*, 1994). RODRIGUEZ-NAVARRO & DOEHNE (1999) salientam a importância das estruturas de porosidade por ser nos poros mais pequenos que vão ocorrer as situações de maior sobressaturação das soluções. THEOULAKIS & MOROPOULOU (1999) observaram a associação da deterioração erosiva com a formação de cristais colunares de halite nos poros das rochas nas zonas com menores teores de humidade. Existem ainda investigações que sugerem que a presença de soluções salinas no meio poroso das rochas pode provocar uma diminuição da resistência mecânica destas (FENG *et al.*, 2001) por reacções químicas que implicam a redução da energia superficial associada com o início e propagação das fracturas.

As argamassas e tijolos, como materiais porosos que são, são também afectados pela cristalização dos sais. A deterioração das argamassas pode provocar a degradação dos rebocos e, conseqüentemente, ter efeitos fortemente penalizantes quando, por exemplo, as argamassas são suporte de painéis de azulejos (fig. 3).

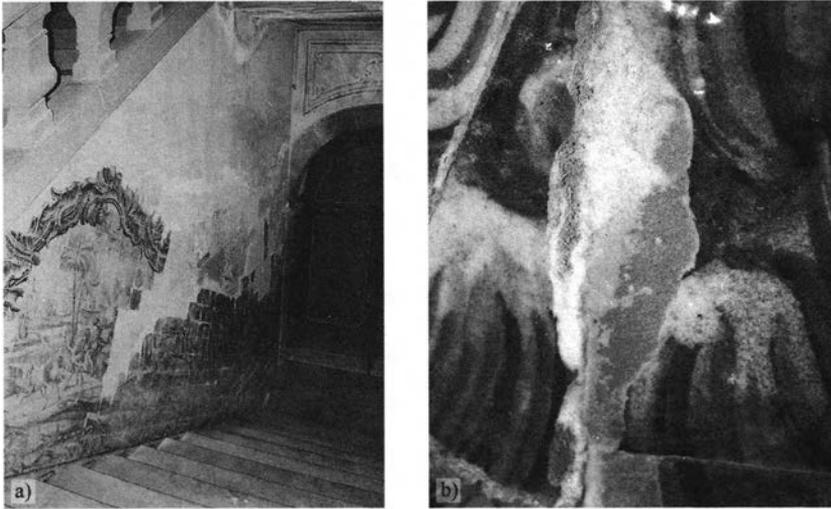


Fig. 3 – Deterioração de painéis de azulejos no Palácio do Raio (Braga) associada com contaminação salina: a) erosão da argamassa de suporte de azulejos associada com eflorescências de niter (KNO_3); b) erosão do vidrado e eflorescências de niter.

Um dos problemas mais frequentes nos betões (LEA, 1970) é a formação de ettringite – $Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$, associada com a contaminação do betão com sulfatos exteriores (ou interiores) ao mesmo. A cristalização de sais pode provocar acções físicas mais extremas, como por exemplo o levantamento e fracturação de lajes de betão resultante da cristalização de sulfatos (gesso e ettringite) por alteração de aterros com sedimentos enriquecidos em pirite (BALLIVY *et al.*, 2002). A contaminação alcalina contribui frequentemente para a deterioração do betão através das famosas reacções álcali – agregado (LEA, 1970; SILVA, 1996).

Dentro dos efeitos da contaminação salina em argamassas é ainda possível admitir possíveis efeitos químicos de transformação, nomeadamente a formação de sais pela reacção entre soluções salinas e os compostos das argamassas (GURRERA *et al.*, 1994; ALVES & SEQUEIRA BRAGA, 2000). Outro curioso exemplo da acção química da poluição salina em materiais porosos é a deterioração em meio salino do marfim, nomeadamente da sua componente orgânica (GODFREY *et al.*, 2000).

Para além da deterioração erosiva, a contaminação salina pode também contribuir para a deterioração cromática dos materiais, pela formação de depósitos com uma cor diferente (na maior parte das situações pela sua cor esbranquiçada, mas também se devem incluir aqui as crostas negras). LEA (1970) menciona também a possibilidade de formação de manchas acastanhadas ou amareladas nos calcários pela acção de sais alcalinos. Na figura 4 é apresentado um exemplo de formação de manchas concêntricas em pedras calcárias, associadas com infiltrações e onde foi identificado um sulfato alcalino (arcanite – K_2SO_4).

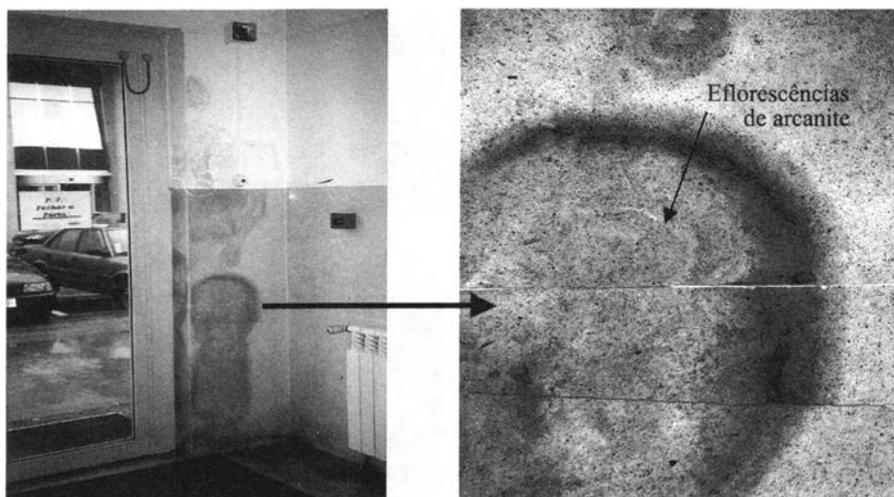


Fig. 4 – Manchas acastanhadas e eflorações de arcanite (K_2SO_4) no Departamento de Ciência Política da Escola de Economia e Gestão, Campus de Gualtar, Universidade do Minho.

PINTURAS E OUTROS REVESTIMENTOS

O efeito dos sais solúveis nas pinturas é sobretudo o resultado das características de impermeabilidade das pinturas e da cristalização dos sais no substrato, provocando a queda da pintura. Este efeito da cristalização na interface pintura-substrato torna-se ainda mais pernicioso quando ocorrem ciclos de cristalização, resultantes de ciclos de variação de humidade relativa e temperatura ambientais (ARNOLD & ZEHNDER, 1989) ou da migração periódica de soluções associada com eventos pluviométricos (ALVES & SEQUEIRA BRAGA, 2000). Em edifícios recentes observa-se frequentemente, quando acontecem infiltrações de água, a formação de sulfatos alcalinos, sobretudo de thenardite, que provocam a queda da pintura e em ocasiões a erosão da própria argamassa (fig. 5). A frequente utilização de sulfato de cálcio no acabamento de rebocos parece constituir uma possível contribuição para a formação destes sulfatos.

Os sais podem ainda afectar outros tipos de revestimentos, como por exemplo o vidro de azulejos (Pessoa *et al.*, 1996; Fig. 3b deste trabalho), se bem que os presentes autores tenham observado situações de cristalização de sais em fracturas do vidro dos azulejos sem que este fenómeno provoque a erosão do vidro. Os revestimentos asfálticos de estradas também podem sofrer erosão por acção da cristalização dos sais (Goudie & Viles, 1997).

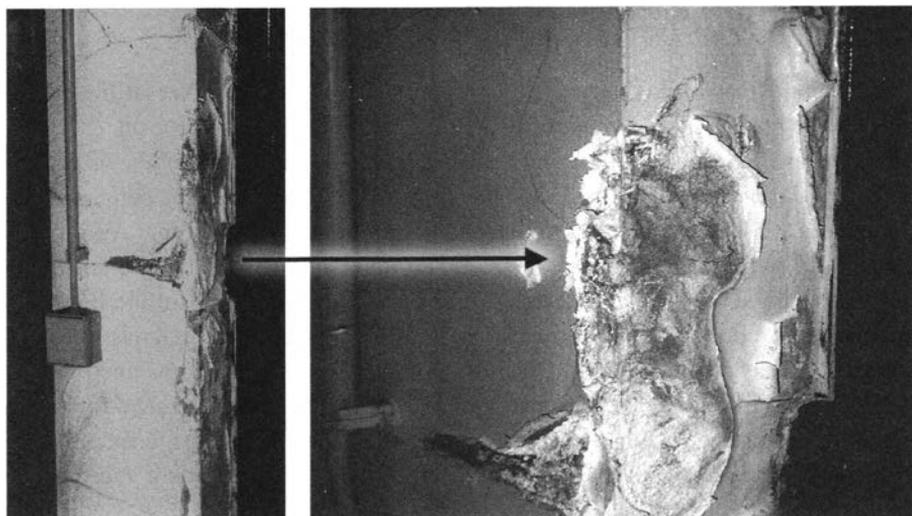


Fig. 5 – Deterioração de pinturas e de argamassas de reboco em instalações do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho (Braga) associada com a formação de eflorescências de thenardite.

MATERIAIS METÁLICOS

Os efeitos da contaminação salina em elementos metálicos decorrem de reacções químicas associadas com cloretos, sulfatos (DE LA FUENTE *et al.*, 2003) e carbonatos (POLLARD *et al.*, 1990). Um efeito famoso da contaminação salina é o da corrosão do betão armado por cloretos, processo que depende da difusividade do cloreto livre (não fixado pela pasta de cimento) pelo cimento, que é afectada pelas características dos inertes (quantidade, dimensões e características superficiais), as estruturas de porosidade, a temperatura e a composição das soluções do meio poroso do cimento (XI & BAZANT, 1999). É também conhecido que os elementos férreos aplicados em janelas e portas de zonas costeiras são bastante afectados pelos cloretos.

ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO E REMEDIAÇÃO

Seguidamente são mencionadas algumas estratégias para combater o problema da contaminação salina em materiais de construção. São considerados exemplos de dois tipos de estratégias: preventivas e remediativas (que em algumas situações poderão ser consideradas simplesmente paliativas), baseadas nas características da contaminação salina anteriormente mencionadas.

PREVENÇÃO

A identificação das causas da contaminação salina pode ser utilizada em decisões de planeamento e construção de infra-estruturas futuras (GOUDIE & VILES, 1997), constituindo assim uma medida preventiva de base para evitar os efeitos da contaminação salina. Outras medidas preventivas podem passar pela selecção de materiais com menores contribuições para a contaminação salina. Assim, dos estudos de BALLIVY *et al.* (2002) ressalta o possível interesse de evitar a utilização de sedimentos com pirite em aterros. A possível contribuição do sulfato de cálcio aplicado em rebocos para a formação de eflorescências lança algumas questões sobre a utilização deste material. DONDI *et al.* (1999) definem teores máximos de iões (patamares de risco) na fracção solúvel de tijolos para evitar a formação posterior de eflorescências. No âmbito das reacções álcali – sílica, é interessante mencionar o trabalho de MALVAR *et al.* (2001) onde se estima que a substituição de cimento por determinados aditivos (por exemplo certo tipo de cinzas volantes) poderia significar poupanças totais na economia americana acima de mil milhões de dólares/ano. Um outro exemplo de estratégia preventiva será o zonamento de ocorrência de formas de sílica potencialmente reactivas apresentado por SILVA (1996).

Dentro da selecção de materiais pode incluir-se a escolha de materiais mais resistentes aos efeitos da contaminação salina, pelo que é de destacar o interesse do estudo de construções antigas por serem fontes inestimáveis de informação para avaliar a durabilidade dos materiais em condições de aplicação reais.

Tendo em consideração que a escolha dos materiais (nomeadamente dos materiais pétreos) é fortemente influenciado por critérios estéticos, poderão ser enquadrado dentro das estratégias preventivas processos de melhoramento dos materiais, como sejam o pré-tratamento com produtos hidrófugos (para evitar o acesso da humidade) ou consolidantes (para melhorar as características físicas). Podem ser também preparadas argamassas mais apropriadas para os ambientes com contaminação salina, seja pela utilização de aditivos com reactividade pozolânica (BESSA PINTO & SANTOS SILVA, 2003; BOSC *et al.*, 1993) que permitem obter argamassas mais resistentes, seja modificação das características de porosidade das argamassas. Outro exemplo que pode ser citado é escolha da temperatura de cozedura dos tijolos, que, de acordo com CULTRONE *et al.* (2000), pode influenciar a resistência destes aos efeitos da contaminação salina.

REMEDIAÇÃO

Consideram-se aqui estratégias e medidas que podem ser aplicadas em objectos já afectados pela contaminação salina. Nesta situação alguns cuidados são necessários, uma vez que, por exemplo, aplicação de produtos hidrofugantes e consolidantes em materiais já afectados pela contaminação salina é um processo

complexo uma vez que pode provocar maior deterioração, ao favorecer a cristalização dos sais no interior do meio poroso (e.g., GONÇALVES, 2003).

Desde logo uma das principais estratégias consistirá na remoção dos sais (dessalinização). Algumas peças possuem dimensões tais que permitem ensaiar a dessalinização pela simples imersão em água destilada (PESSOA *et al.*, 1996; KOOB & NG, 2000), sendo necessário em alguns objectos, nomeadamente cerâmicos ter cuidado para evitar que a imersão prejudique a estabilidade do objecto. Em outros objectos pode ser ensaiada a dessalinização pela aplicação de pastas com produtos que permitam extrair os sais em solução (e.g. ZEHNDER, 1996). Alguns autores admitem que os processos de dessalinização húmida podem contribuir para a mobilização e precipitação de sais como o gesso devida à extracção selectiva de alguns iões (ZEHNDER, 1996), implicando, portanto efeitos negativos. Outras técnicas utilizadas para a dessalinização baseiam-se na aplicação de campos eléctricos, encontrando-se exemplos de aplicação para a dessalinização de artefactos arqueológicos de ferro (CARLIN *et al.*, 2001) e de betão armado (VELIVASAKIS *et al.*, 1998). Saliente-se que as operações de dessalinização serão soluções temporais se não forem acompanhadas da efectiva remoção da fonte de contaminação. A remoção das fontes de contaminação só será possível pelo reconhecimento adequado das fontes de contaminação e podem incluir o rebaixamento do nível freático contaminante (GOUDIE & VILES, 1997), operações de drenagem de solos ou de impermeabilização.

Em certas condições o controlo climático pode ser utilizado para evitar os ciclos de dissolução-cristalização dos sais (ARNOLD & ZEHNDER, 1989; WÜST & SCHLÜCHTER, 2000). Este tipo de medida poderá não ser efectiva se o processo de deterioração estiver associado com mobilizações das soluções por infiltrações periódicas como as mencionadas por ALVES & SEQUEIRA BRAGA (2000).

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento dos estudos da contaminação salina tem sido suportado por vários projectos e prestações de serviços, sendo presentemente suportadas pelo projecto POCTI/1999/CTA 35600 da FCT, Programa Operacional Ciência Tecnologia e Inovação, participado pelo fundo comunitário FEDER.

BIBLIOGRAFIA

- AIRES-BARROS, L. (2001) – As rochas dos monumentos portugueses: tipologias e patologias. Ed. Int. Português do Património Arquitectónico, 535 p. (2 vol.).
- ALVES, C.A.S. (1997) – Estudo da deterioração de materiais graníticos aplicados em monumentos da cidade de Braga (Norte de Portugal). Implicações na Conservação do Património Construído. Tese de Doutoramento, Univ. Minho, 291 p.

- ALVES, C.A.S., HAMMECKER, C. & SEQUEIRA BRAGA, M.A. (1996) – Water transfer and decay of granitic stones in monuments. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, 323, série IIa, n° 5, 397-402.
- ALVES, C.A.S. & SEQUEIRA BRAGA, M.A. (2000) – *Decay effects associated with soluble salts on granite buildings of Braga (NW Portugal)*. Em: *Environmental Mineralogy: Microbial Interactions, Anthropogenic Influences, Contaminated Land and Waste Management*, Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, Book Series, cap. 9, 181-199.
- ARNOLD, A. e ZEHNDER, K. (1989) – Salt weathering on monuments. 1st Intern. Symp. The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, F. Zezza (ed.), Bari, 31-58
- BALLIVY, G., RIVARD, P., PÉPIN, C., TANGUAY, M.G., & DION, A. (2002) – Damages to residential buildings related to pyritic rockfills: field results of an investigation on the south shore of Montreal, Quebec, Canada. *Can. J. Civ. Eng.* 29, 246-255.
- BESSA PINTO, J. & SANTOS SILVA, A. (2003) – Emprego de pozolanas em argamassas de cal. Os exemplos dos fortes de S. Julião da Barra e da Ericeira. 3º ENCORE, Lisboa, v. 1, 337-344.
- BOSC, J.L., CHABANNET, M., PERA, J., AUGER, F. (1993) – Altérations des mortiers de ciment placés dans une ambiance aérienne salie: Intérêt de l'ajout de metakaolin. *International RILEM/UNESCO Congress 'Conservation of Stone and Other Materials'*, v. I, 67-74
- CARLIN, W., KEITH, D. & RODRIGUEZ, J. (2001) – Less is more: Measure of chloride removal rate from wrought iron artifacts during electrolysis. *Studies in Conservation*, v. 46, 1, 68-76.
- CULTRONE, G., DE LA TORRE, M.J., SEBASTIAN, E.M., CAZALLA, O. & RODRIGUEZ-NAVARRO, C. (2000) – Behavior of Brick Samples in Aggressive Environments. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119, 191-207.
- DE LA FUENTE, D., CHICO, B. & MORCILLO, M. (2003) – Soluble salts and the durability of paint coatings: a new laboratory method for dosing chlorides and sulphates over steel surfaces. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, v. 50, 3., 208-216.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1979) – Some problems raised by the study of the weathering of igneous rocks. *Memória n° 517*, ed. LNEC, 15 p.
- DONDI, M., FABBRI, B., GUARINI, G., MARSIGLI, M., & MINGAZZINI, C. (1999) – Sali solubili ed efflorescenze nei laterizi: proposta di uno schema di previsione del rischio di manifestazioni efflorescenti. Disponível em: <http://www.laterizio.it/scriptcode/loadPage.asp?IDkey=efflo>
- FENF, X-T, CHEN, S. & LI, S. (2001) – Effects of water chemistry on microcracking and compressive strength of granite. *Int. Journal Rock Mech. & Mining*, 38, 557-568.
- GAMA, H.B. (2001) – Principais patologias associadas ao uso de rochas ornamentais. I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, Salvador Baía, 20-23.
- GODFREY, I.M., GHISALBERTI, E.L., BENG, E.W., BYRNE, L.T. & RICHARDSON, G.W. (2000) – The analysis of ivory from a marine environment. *Studies in Conservation*, v. 47, 21, 9-45.
- GONÇALVES, T.D. (2003) – Colocação a descoberto de alvenarias antigas originalmente revestidas e sujeitas à acção de sais solúveis. Utilização de hidrófugos de superfície. 3º ENCORE, Lisboa, v. 1, 395-403.
- GOUDIE, A. & VILES, H. (1997) – *Salt Weathering Hazards*. John Wiley & Sons, 241 p.
- GURRERA, M.A., RAVENTOS, X.D., BOU, V.E., PEREZ, J.L.P., VIÑAS, R.R., and HORTA, A.V. (1994) – Degradation forms and weathering mechanisms in the Berà Arch (Terragona, Spain). 3rd. Int. Symp.: *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, V. Fassina, H. Ott & F. Zezza (eds.), Veneza, 673-679.
- HAMMECKER, C. (1993) – Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en oeuvre. Tese de Doutoramento, Université Louis Pasteur, 254 p.

- KOOB, S.P. & NG, W.Y. (2000) – The desalination of ceramics using a semi-automated continuous washing station. *Studies in Conservation*, v. 45, 4, 265-273.
- LA IGLESIA, A., GONZALEZ, V., LÓPEZ-ACEVEDO, V. and VIEDMA, C. (1997) – Salt crystallization in porous construction materials. I - Estimation of crystallization pressure. *J. Crystal Growth*, 177, 111-118.
- LEA, F. (1970) – *The Chemistry of Cement and Concrete*. E. Arnold Publishers, 727 p.
- MALVAR, L.J., CLINE, G.D., BURKE, D.F., ROLLINGS, R., SHERMAN, T.W. & GREENE, J. (2001) – Alkali-Silica Reaction Mitigation State-of-the-Art. Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California 93043-4370, Technical Report TR-2195-SHR.
- PESSOA, J.C., ANTUNES, J.L.F., FIGUEIREDO, M.O., & FORTES, M.A. (1996) – Removal and analysis of soluble salts from ancient tiles. *Studies in Conservation*, 41, 153-160.
- POLLARD, A.M., THOMAS, R.G., & WILLIAMS, P.A. (1990) – Mineralogical changes arising from the use of aqueous sodium carbonate solutions for the treatment of archaeological objects. *Studies in Conservation*, 35, 148-152.
- RODRIGUEZ-NAVARRO, C. & DOEHNE, E. (1999) – Salt weathering: Influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 191-209.
- SILVA (1996) – Os materiais Geológicos e o betão – Aspectos particulares da alteração em Portugal continental. ITB 17, Ed. LNEC, 96 p.
- SCHERER, G. (1999) – Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 29, 1347-1358.
- TAKAHASHI, K., SUZUKI, T. & MATSUKURA (1994) – Erosion rates of a Sandstone used for a Masonry Bridge Pier in the Coastal Spray Zone. Em: *Rock Weathering and Landform Evolution*, D.A. Robinson, R.B.G. Williams (eds.), 175-192.
- THEOULAKIS, P. & MOROPOULOU, A. (1999) – Salt Crystal Growth as Weathering Mechanism of Porous Stone on Historic Masonry. *Journal of Porous Materials* 6, 345-358.
- VELIVASAKIS, E.E., HENRIKSEN, S.K. & WHITMORE, D. (1998) – Chloride extraction and realkalinization of reinforced concrete stop steel corrosion. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 12, 2, 77-84.
- WINKLER, E.M. (1994) – *Stone in architecture. Properties. Durability*. Springer-Verlag, 313 p.
- WÜST, R.A.J. & SCHLÜCHTER, C. (2000) – The Origin of Soluble Salts in Rocks of the Thebes Mountains, Egypt: The Damage Potential to Ancient Egyptian Wall Art. *Journal of Archaeological Science*, 27, 1161-1172.
- XI, Y. & BAZANT, Z.P. (1999) – Modeling chloride penetration in saturated concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 11, 1, 58-65.
- ZEHNDER, K. (1996) – Gypsum efflorescences in the zone of rising damp. Monitoring of slow decay process caused by crystallizing salts on wall paintings. 8th Int. Congr. on Deterior. and Conserv. of Stone, Berlin, 1669-1678.

IDENTIFICAÇÃO DE PRODUTOS DE REACÇÕES INTERNAS EM BETÃO

I. FERNANDES ¹ e F. NORONHA ²

PALAVRAS-CHAVE: reacção álcali-agregado, exsudações, gel, ettringite.

KEY WORDS: álcali-aggregate reaction, exudations, álcali-silica gel, ettringite.

RESUMO

Uma grande obra de engenharia construída em betão com agregados graníticos, apresenta manifestações de provável ocorrência de reacções internas no betão. Visitas à obra permitiram observar e colher amostras de exsudações. Estas apresentam-se, em geral, em forma de escorrência, de cor branca ou amarela, por vezes transparentes e com consistência viscosa, em alguns casos fluorescentes em verde à luz UV. As amostras de exsudações foram observadas ao microscópio electrónico de varrimento (MEV) e foi efectuada a sua análise com espectrómetro de dispersão de energia (EDS). A composição encontrada nas exsudações, em especial nas que apresentavam consistência viscosa, permite confirmar a ocorrência de reacções álcali-agregado. A observação de fragmentos de betão conduziu ainda à identificação de ettringite resultante de ataque por sulfatos.

ABSTRACT: Identification of the products resulting from the internal reactions in concrete

287

A large concrete construction built with granitic aggregates presents signs of deterioration probably due to internal reactions within the concrete. White and

¹ Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Praça Gomes Teixeira, 4099-002 Porto. ifernand@fc.up.pt

² Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Praça Gomes Teixeira, 4099-002 Porto. fmnoronh@fc.up.pt

yellowish exudations, some of them showing viscous consistency, were observed during site inspections and a number of samples were collected. Some exudations showed a light-green colour when observed under UV lamp. The exudation samples were observed by scanning electron microscope and analyses were performed by energy dispersive spectrometry. The composition of the exudations, in particular of those with viscous consistency, confirms the existence of álcali-aggregate reactions. The observation of concrete samples permitted the identification of ettringite resultant from sulphate attack.

INTRODUÇÃO

O betão é composto por uma mistura de partículas rochosas, que constituem cerca de três quartos do volume do betão, cimento e água. O cimento é obtido pela mistura proporcionada de materiais calcários e argilosos, ou outros que contenham sílica, alumina e ferro, reduzida a pó e submetida a temperatura elevada da ordem de 1450°C (NEVILLE, 1997, TAYLOR, 1997). As matérias reagem entre si e fundem parcialmente para produzir um produto designado clínquer que, por arrefecimento, adquire a composição química e a constituição mineralógica convenientes.

A descrição microscópica das fases que constituem o clínquer ocorreu pela primeira vez em 1887 com o trabalho de Le Chatelier (CAMPBELL, 1999). Esta técnica foi utilizada e desenvolvida durante o século vinte por vários investigadores, tendo sido fundada a ICMA – International Cement Microscopy Association, em 1980, num esforço de reunir especialistas e promover a aplicação da microscopia à indústria do cimento e do betão.

A análise petrográfica do betão, utilizada há várias décadas em todo o mundo, apresenta uma crescente receptividade junto da indústria, sobretudo no que respeita a caracterização de agregados como no diagnóstico de eventuais reacções internas no betão.

A caracterização petrográfica dos agregados é cada vez mais importante tanto por razões económicas como ambientais. Quando aplicada à selecção de um agregado, deve conduzir à classificação da rocha em função da sua mineralogia e textura e à identificação dos constituintes potencialmente prejudiciais para o fabrico de betão.

Por outro lado, a análise petrográfica constitui uma ferramenta poderosa na identificação de produtos secundários resultantes de reacções internas no betão, tirando partido de técnicas como o exame ao microscópio óptico, a observação ao microscópio electrónico de varrimento e a caracterização por difracção de raios X.

O presente trabalho insere-se num programa de investigação em que se faz a caracterização de rochas graníticas como agregados para betão. Refere-se aqui a

importância do microscópio electrónico de varrimento e da microanálise por raios X na identificação e caracterização de produtos secundários resultantes de reacções internas no betão, com destaque para as que se processam entre a pasta de cimento e as partículas de agregado.

CAUSAS DE DETERIORAÇÃO DO BETÃO

Suposto como um material de longa durabilidade, é hoje reconhecido que o betão, por várias ordens de factores, pode deteriorar-se. A deterioração pode dever-se a diferentes causas que se classificam habitualmente como:

- causas humanas, relacionadas com o projecto, a construção ou a manutenção da estrutura durante a sua vida útil;
- acções naturais, de que se distinguem as causas físicas, químicas e biológicas;
- acidentes, que podem ser naturais ou ter origem antrópica.

Relativamente às acções naturais químicas, são particularmente importantes para o geólogo as que se devem às reacções álcali-agregado, e para as quais a petrografia constitui um importante meio de diagnóstico. Consistem na reacção entre o ião hidróxilo e os iões sódio e potássio da solução intersticial do betão (BERRA & BERTACCHI, 1991) e os componentes reactivos do agregado. Para que ocorram é necessário que estejam reunidas três condições: (1) quantidade adequada de agregado reactivo, (2) álcalis disponíveis e (3) água (JENSEN, 1993), pelo que as propriedades do betão como porosidade, teor em álcalis da pasta de cimento e dimensão do grão do agregado podem afectar a reacção.

O tipo de reacção que pode desencadear-se depende da composição do agregado, distinguindo-se normalmente três categorias: (1) a reacção com a sílica, que é a mais frequente e melhor estudada, designada reacção álcali-sílica, (2) a reacção com silicatos complexos, conhecida por reacção álcali-silicato, e (3) a reacção com calcários dolomíticos impuros, denominada reacção álcali-carbonato.

A reacção álcali-sílica dá origem a um gel expansivo que é por vezes prejudicial para o betão. Trata-se de um produto de composição variável que inicialmente se apresenta transparente e resinoso, endurecendo e adquirindo uma cor esbranquiçada quando em contacto com o ar. É composto por silício, sódio e potássio e, em algumas situações, contém ainda cálcio.

Alguns autores consideram a reacção álcali-silicato semelhante à reacção com a sílica, embora mais lenta (St. JOHN *et al.*, 1998).

As reacções álcali-carbonato surgem entre os álcalis e alguns tipos de calcário dolomítico contendo argila, por processos de desdolomitização, ou seja, em que a dolomite dá origem a calcite e brucite. Em consequência, ocorre a fissuração da rocha, permitindo a circulação de água e a expansão da argila (SWAMY, 1992).

Por ser o tipo de reacção mais frequente e aquela que pode ocorrer quando o granito é aplicado como agregado no betão, trata-se neste artigo apenas da reacção álcali-silica.

Existem vários minerais que são considerados potencialmente reactivos aos álcalis. Os mais comuns são os minerais de sílica – opala, calcedónia, cristobalite, tridimite, quartzo micro e criptocristalino e quartzo deformado ou recristalizado – e também as rochas contendo quartzo fortemente deformado como: grauvaques, filitos, xistos, gnaisses, filões de quartzo e arenitos. São ainda consideradas potencialmente reactivas rochas vítreas ou criptocristalinas como riólito, andesito, alguns vidros artificiais e também cherte, ardósia e alguns tipos de calcário (HOBBS, 1988).

Estes materiais reagem quando expostos a um ambiente adverso, com pH elevado (ACI, 1998), tal como sucede com o líquido intersticial do betão, condições para as quais a solubilidade do Al_2O_3 e de SiO_2 é facilitada.

As reacções álcali-silica são tipicamente fenómenos lentos. As primeiras manifestações de deterioração do betão devido a este tipo de reacções surgem 5 a 20 anos após a construção. As manifestações macroscópicas mais frequentes destas reacções são a fissuração, formando um padrão típico em polígonos, com traçado errático, de malha densa e frequentemente hierarquizada, designado *craquelet* ou *map cracking*, a descoloração nos bordos das fissuras, os deslocamentos ou indícios de movimento de elementos estruturais devido a expansão, as exsudações ou depósitos superficiais de gel, as orlas de reacção nos limites das partículas de agregado e os *pop-outs* (ACI, 1998), ou seja, pequenas crateras de forma cónica de 10 a 20 mm de diâmetro, que surgem na superfície do betão devido à expansão de partículas de agregado ou de gel (LCPC, 1999).

Verifica-se, contudo, que a fissuração pode ter origem em fenómenos independentes da reacção álcali-silica, e tanto as exsudações como os *pop-outs*, embora diagnósticos deste tipo de reacções, não são indicativos da sua extensão. De facto, a ocorrência de manifestações de reacções álcali-silica não significa que o fenómeno cause danos à estrutura. Trata-se de reacções que dão origem a mecanismos de deterioração lentos (BERRA e BERTACCHI, 1991), não existindo registo de qualquer caso em que a estrutura tenha colapsado devido a estas reacções.

A textura microscópica do betão afectado por reacções álcali-silica depende da extensão da reacção. É geralmente caracterizada pela existência de fissuras com uma distribuição típica, divergindo dos vértices das partículas de agregado e por vezes atravessando estas partículas, pela presença de gel sílico-alcálico nos poros e fissuras e pela ocorrência de sinais de reacção nas partículas de agregado. Para uma identificação inequívoca da existência de reacções álcali-silica, as três características devem estar presentes (St. JOHN *et al.* 1998).

A existência de exsudações de gel sílico-alcálico, resultantes da migração do gel até à superfície, esteve na origem da investigação da composição química do

gel (KNUDSEN & THAULOW, 1975). O material exsudado é geralmente branco, uma vez que o gel inicialmente transparente tende a carbonatar em contacto com o ar.

Para além das reacções álcali-agregado referidas, há ainda a considerar as reacções em que um ião SO_4^{2-} se associa ao ião Ca^{2+} do cimento e aos aluminatos presentes no betão para formar um composto expansivo designado etringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) (St. JOHN *et al.*, 1998). Os sulfatos podem ter origem interna, a partir dos sulfatos do cimento e das pirites de alguns agregados, ou externa, provindo de solos com gesso e óxidos de enxofre da poluição atmosférica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inspecções a uma obra construída com agregados graníticos permitiram colher amostras de exsudações e retirar tarolos de betão para estudo e caracterização em laboratório. As técnicas de análise petrográfica foram aplicadas no diagnóstico da ocorrência de reacções internas no betão.

As amostras das exsudações foram recolhidas com uma espátula e colocadas em frascos de plástico, devidamente fechados e identificados.

Para obtenção de amostras de betão utilizou-se um equipamento ligeiro de furação à rotação, com coroa diamantada de 100 mm de diâmetro, com arrefecimento por circulação de água.

As amostras de exsudações foram examinadas ao microscópio electrónico de varrimento (MEV) modelo JEOL JSM-6301F, equipado com espectrómetro de dispersão de energia (EDS) NORAN-VOYAGER, localizado no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP). As amostras das exsudações e dos fragmentos do betão foram coladas sobre suportes metálicos e revestidas a ouro com equipamento JEOL JFC 1100, observadas e analisadas por electrões secundários por períodos de tempo útil de 60 segundos.

O exame ao MEV permitiu identificar os produtos secundários e caracterizar a sua morfologia, obtendo-se por EDS informação semiquantitativa da composição.

RESULTADOS

O granito é um dos tipos de rocha mais utilizados em Portugal como agregado para betão, em especial nas zonas Norte e Centro do País, onde este tipo de rocha é mais abundante.

Na literatura encontram-se várias referências à existência de reacções álcali-silica em betão com agregados graníticos (GOGTE, 1973, JENSEN, 1993, WEST, 1994, LEEMANN e HOLZER, 2003).

O granito aplicado no betão em estudo foi analisado e caracterizado ao microscópio óptico. Foram feitos ensaios de reactividade segundo a norma francesa NF P18-590, cujos resultados indicam o granito como NPR (não potencialmente reactivo). A análise macroscópica do betão permitiu observar a ocorrência de exsudações como possível manifestação de reacções álcali-agregado.

As exsudações apresentam em geral cor branca ou amarelada, são sólidas e fortemente aderentes à parede. Foram observadas algumas exsudações de cor branca, por vezes com aparência leitosa, em gotículas parcialmente translúcidas e que são facilmente retiradas da superfície do betão (fig. 1).

As amostras de exsudações foram observadas ao microscópio electrónico de varrimento (MEV) e obtidas as análises semi-quantitativas por espectrómetro de dispersão de energia (EDS). Os espectros EDS das exsudações foram agrupados de acordo com os elementos predominantes. Verifica-se que está presente o silício, o sódio e o potássio, numa composição compatível com a do gel sílico-alcálico. Nas amostras não foi encontrado cálcio.

O gel apresenta diferentes texturas, sendo frequentemente amorfo, com superfície lisa e fissuras de retracção típicas (Figura 2a).

Em algumas amostras a textura é esponjosa e vacuolar. Nas amostras que macroscopicamente se apresentavam translúcidas e viscosas, verificou-se que este comportamento se mantinha após a preparação das amostras para observação ao MEV. Nestas amostras, o vácuo inerente à observação causou a fendilhação da superfície sólida e o aparecimento de um material viscoso que formava bolhas, no qual o revestimento por ouro não foi detectado (Figura 2b).

Estas amostras foram observadas de novo ao fim de alguns meses e foi possível constatar que este gel tinha evoluído, com a formação de cristais aciculares ricos em sódio sobre o material viscoso, apesar de as amostras se encontrarem armazenadas no laboratório, em exsiccador (Figura 3).

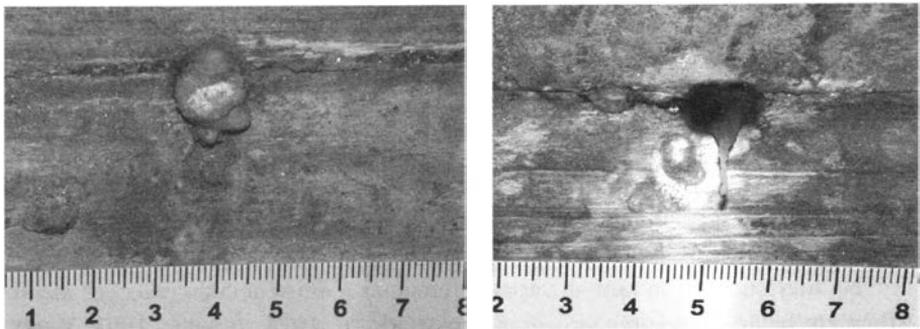


Fig. 1 – Diferentes tipos de exsudações. Escala em centímetros.

Os cristais ricos em sódio, que se observam também nas restantes amostras, ocorrem segundo diferentes hábitos. Apresentam-se por vezes em cristais prismáticos e densos, parecendo crescer a partir do gel sílico-alcalino. Outras vezes formam rosetas, com orientação aleatória. Encontraram-se também alguns cristais aciculares crescendo paralelamente à superfície do gel em estado sólido, ou formando aglomerados crescendo perpendicularmente à superfície, tal como referido por JENSEN, 1993, para produtos de reacção em betões na Noruega (fig. 4).

Foram também seleccionados fragmentos do betão para observação ao microscópio electrónico de varrimento, nos locais em que foram detectados depósitos brancos nos poros ou próximo das partículas de agregado. Nestas amostras foi possível identificar aspectos de ataque aos cristais de quartzo pela solução intersticial fortemente alcalina (fig. 5). A superfície destes cristais apresenta-se localmente esponjosa evidenciando a acção da circulação de fluidos no interior do betão.

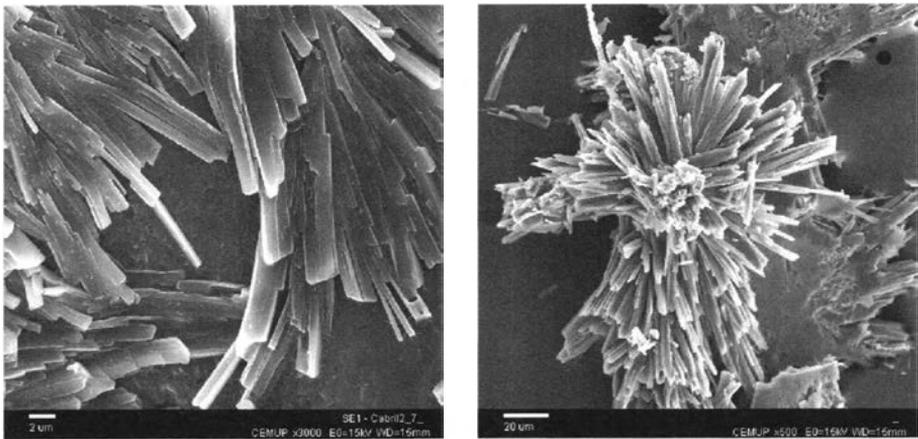


Fig. 4 – Diferentes aspectos dos cristais ricos em sódio sobre o gel sílico-alcalino. A barra corresponde a 2 mm (esquerda) e 20 mm (direita).

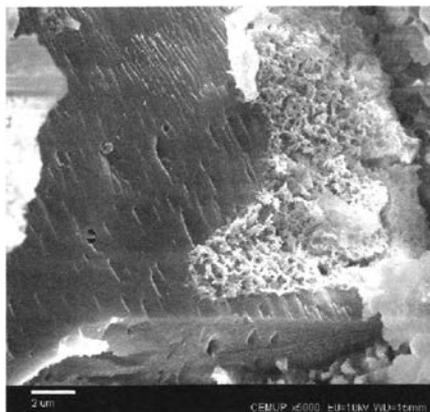


Fig. 5 – Corrosão de um cristal de quartzo devido ao ataque pelo fluido alcalino. A barra corresponde a 2 mm.

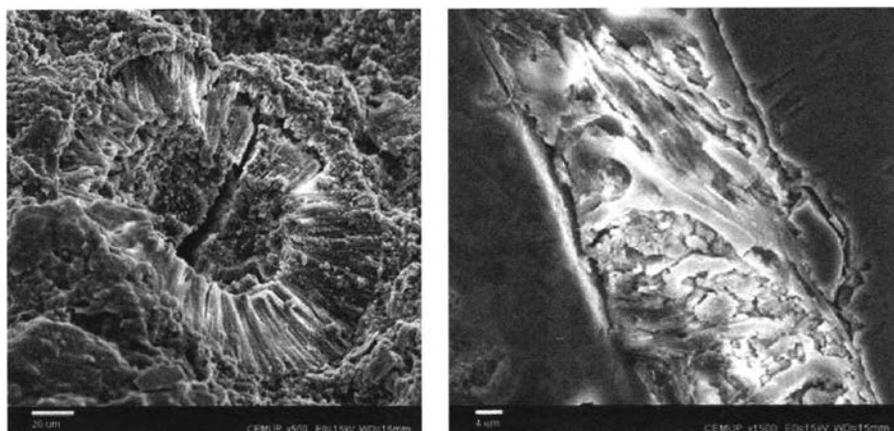


Fig. 6 – Etringite preenchendo parcialmente poro do betão e em fissura. A barra corresponde a 20 nm (esquerda) e 4 mm (direita - imagem ao MEV de lâmina polida).

Nas amostras de betão não foi identificado gel sílico-alcálico, embora existam cristais ricos em sódio idênticos aos observados nas exsudações.

O exame microscópico destes fragmentos mostrou-se particularmente interessante na identificação dos minerais existentes nos poros. Verificou-se que existe etringite preenchendo parcial ou totalmente os poros (fig. 6).

Este mineral ocorre também no contacto entre os agregados e a pasta de cimento e em algumas fissuras. Para além da identificação inequívoca dos cristais de etringite, em algumas análises os espectros EDS mostram que, para além de enxofre, cálcio e alumínio, existe silício, sódio e potássio. Este facto conduz à conclusão de que, em alguns dos poros, a etringite co-existe com gel sílico-alcálico.

O microscópio electrónico de varrimento foi também útil na identificação de outros materiais. Assim, para além das exsudações que mostravam claramente a presença de gel, outras apresentavam composição diversa, tendo sido identificado com alguma frequência carbonato de cálcio e, raramente, aptitalite ($(K_2Na)_2SO_4$).

DISCUSSÃO

De acordo com KNUDSEN e THAULOW, 1975, o gel observado em fissuras afastadas do local original de reacção apresenta um teor elevado de CaO, que pode atingir 20%, enquanto que o gel localizado próximo do local de reacção e o gel retirado da superfície do betão apresenta um baixo teor de CaO, tal como o caso aqui estudado.

No que respeita a reactividade potencial das rochas graníticas, GOGTE, 1973, relacionava este facto com a ocorrência de quartzo deformado, em especial quando

os grãos apresentam extinção ondulante moderada a forte. No entanto, considera-se actualmente que a medição do ângulo de extinção ondulante não é um critério determinante, atribuindo-se maior relevância à dimensão do grão e à existência adicional de quartzo microcristalino ou recristalizado (GRATTAN-BELLEW, 1992, SHAYAN, 1993). O exame petrográfico do granito mostrou a existência de deformação nos cristais de moscovite e plagioclase e fraca extinção ondulante dos cristais de quartzo. Apenas em duas partículas de agregado do betão foi identificado quartzo microcristalino.

Relativamente à co-existência de etringite e de gel sílico-alcálico, PETTIFER e NIXON, 1980, verificaram a ocorrência frequente dos dois produtos de reacções internas no betão e concluíram que poderia haver uma relação entre as reacções álcali-silica e o ataque por sulfatos. No entanto, JOHANSEN *et al.*, 1993, concluíram que não existem evidências claras da interferência dos dois fenómenos, apesar de a etringite e o gel poderem cristalizar nos poros, em microfissuras e na interface pasta de cimento-agregado. No caso estudado, os dois produtos foram observados predominantemente em diferentes situações e apenas raramente em simultâneo. A ocorrência de gel nas exsudações e de etringite essencialmente nos poros, sugere que não deverá existir correlação entre os dois fenómenos.

CONCLUSÕES

As exsudações constituem uma manifestação da ocorrência de reacções álcali-agregado, embora por si só não possam ser consideradas um diagnóstico seguro.

As exsudações observadas no caso estudado apresentavam-se predominantemente no estado sólido, embora algumas se mostrassem viscosas e translúcidas. O exame ao microscópio electrónico de varrimento revelou que são compostas por gel sílico-alcálico. Nas análises semi-quantitativas obtidas por EDS não foi identificado cálcio, de acordo com o referido na literatura cerca de materiais exsudados do betão.

O gel transparente manteve o comportamento viscoso durante o exame ao microscópio electrónico de varrimento, criando bolhas a partir da superfície sólida à medida que o vácuo era aplicado. Apesar de armazenadas em exsiccador, as amostras com estas características evoluíram, sendo possível observar, ao fim de alguns meses, a existência de cristais ricos em sódio sobre o gel.

O microscópio electrónico de varrimento foi também aplicado no exame de fragmentos de betão, nos quais foi identificada etringite, preenchendo poros e fissuras.

As análises EDS mostraram a possível co-existência de gel sílico-alcálico e etringite em alguns poros mas os dois produtos existem em geral em locais diferentes pelo que se conclui não existir uma relação entre as origens dos dois produtos.

Quanto à composição do gel identificado nas exsudações, a ausência de cálcio poderá ser atribuída à ocorrência de partículas de agregado próximo da superfície do betão, não existindo contacto suficiente com a pasta de cimento para a intervenção do cálcio na reacção com o fluido alcalino.

BIBLIOGRAFIA

- ACI, 1998 – *State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity*, Reported by ACI Committee 221, American Concrete Institute, Michigan, pp 31.
- BERRA, M., e BERTACCHI, P., 1991 – *Alkali-aggregate reaction in concrete dams*, *Water Power and Dam Construction* (43/4), pp 12.
- CAMPBELL, D.H., 1999 – *Microscopical examination and interpretation of Portland cement and clinker*, 2nd edition, Portland Cement Association, USA, 201 pp.
- GOGTE, B.S., 1973 – *An evaluation of some common Indian rocks with special reference to alkali-aggregate reactions*, *Engineering Geology* (7), pp. 135-153.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., 1992 – *Microcrystalline quartz, undulatory extinction & the alkali-silica reaction*, *Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, London, pp. 383-394.
- HOBBS, D. W. (editor), 1988 – *Alkali-silica reaction in concrete*, Thomas Telford Ltd. London, 183 pp.
- JENSEN, V., 1993 – *Alkali aggregate reaction in Southern Norway*. *Doctor Technicae Thesis*, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 262 pp+ apêndices.
- JOHANSEN, V., THAULOW, N., e SKALNY, J., 1993 – *Simultaneous presence of alkali-silica gel and ettringite in concrete*, *Advances in Cement Research* (5), pp. 23-29.
- KNUDSEN, T. e THAULOW, N., 1975 – *Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete*. *Cement and Concrete Research* (5), pp. 443-454.
- LCPC, 1999 – *Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 42 pp.
- LEEMAN, A. & HOLZER, L., 2003 – *Alkali-aggregate reaction – Identification of reactive silicates*, *Proceedings of the 9th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, M.A.T.M. Broekmans, V. Jensen, B. Brattli (editors), Thondheim.
- NEVILLE, A.M., 1997 – *Properties of concrete*, 4th edn., Longman Scientific and Technical, U.K., 844 pp.
- NORMALISATION FRANÇAISE, P18 – 590, 1993 – *Granulats – Stabilité dimensionnelle en milieu alcalin. Essai accéléré sur mortier par autoclave*, AFNOR. Paris, 7 pp.
- PETTIFER, K. e NIXON, P.J., 1980 – *Alkali metal sulphate – a factor common to both alkali aggregate and sulphate attack on concrete*, *Cement and Concrete Research* (10), pp. 173-181.
- SHAYAN, A., 1993 – *Alkali reactivity of deformed granitic rocks: a case study*, *Cement and Concrete Research* (23), pp. 1229-1236.
- St. JOHN, D.A., POOLE, A.B., e SIMS, I., 1998 – *Concrete petrography – A hand'book of investigative techniques*, Arnold Publisher, UK, 474 pp.
- SWAMY, R.N. Editor, 1992 – *The alkali-silica reaction in concrete*, Blackie and Son Ltd., London, 336 pp.
- TAYLOR, H.F.W., 1997 – *Cement chemistry*, 2nd edition, Thomas Telford Publishing, London.
- WEST, G, 1994 – *Undulatory extinction of quartz in some British granites in relation to age and potential reactivity*, *Quarterly Journal of Engineering Geology* (27), pp. 69-74.

AS PEDREIRAS DO POIO (FOZ CÔA) – A REGIÃO E O TURISMO

L. M. FERREIRA GOMES¹ e P. GABRIEL DE ALMEIDA¹

PALAVRAS-CHAVE: pedreira, Foz-Côa, xisto ardosífero, construção civil, aspectos turísticos, ambiente.

KEY WORDS: quarries, Foz-Côa, slate, building, touristic aspects, environment.

RESUMO

As pedreiras do Poio situam-se em pleno coração do Parque Arqueológico do Vale do Côa (PAVC), com as gravuras rupestres, que recentemente foram classificadas pela UNESCO como património mundial. A exploração tradicional nas Pedreiras continua num ritmo semelhante ao que acontecia antes do "fenómeno" das gravuras rupestres. No entanto, entende-se que deverá haver cuidados especiais em termos ambientais e também se poderá aproveitar a globalidade da pedra explorada, em aplicações associadas à construção civil, implementando soluções semelhantes às que eram típicas na região e que nas últimas décadas, se perderam. Assim, neste trabalho, depois de se referirem aspectos genéricos sobre a geomorfologia, a geologia e a exploração dos xistos ardosíferos das pedreiras do Poio – Foz Côa, apresentam-se, com algum detalhe, resultados de ensaios físicos e mecânicos realizados sobre provetes, em laboratório. Sobre aplicações: além de se mencionar a situação tradicional deste tipo de rocha (que é o uso da pedra em esteios para vinha) apresentam-se outras aplicações que estão a despontar, associadas à construção civil, além de outras propostas que poderão servir de estilo e de marca de uma região que, para se afirmar com qualidade, deverá otimizar todos os seus recursos.

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, 6200-358 Covilhã.

ABSTRACT: The Quarries of Poio (Foz Côa) - The Region and the Tourism

The quarries of Poio are situated in the middle of the Archaeological Park of the Valley of Côa (PAVC), that recently was classified by UNESCO as world heritage. The traditional exploitation continues at the same rhythm as before the rock carvings “phenomenon”. However, it is understood that one should take special care in environmental terms and that the total exploited stone can also be employed in applications associated with building construction, implementing solutions similar to the ones that were typical in the area and got lost in the last decades. So, in this paper, after referring generic aspects about the geomorphology, the geology and the exploitation of the quarries of Poio – Foz Côa schists, it is presented, with some detail, results of physical and mechanical essays performed in laboratory. Concerning the applications: besides mentioning the traditional uses of this type of rock (the use of the stone in vineyard shores), other applications are presented starting to be associated with the building construction and other proposals that could be imposed as style and trademark of an area that should better all its resources to stand with quality.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de base ao presente artigo foram realizados em Trabalho de Projecto I (FERREIRA GOMES, 1987) no ano lectivo de 1986/87, por proposta do Professor Cotelos Neiva, responsável pela referida disciplina, no âmbito do Curso de Engenharia Geológica na Universidade de Coimbra, onde o primeiro autor era estudante finalista. Pelos conhecimentos recebidos, pela qualidade conseguida e pela actualidade de conhecimentos que ainda hoje continua válida, entende-se ser o momento ideal da presente comunicação.

As pedreiras do Poio constituem cerca de duas dezenas de pequenas a médias explorações a céu aberto e de diferentes empresários. As suas rochas tanto quanto é do conhecimento dos autores ainda não foram alvo de evoluído estudo e os resultados aqui apresentados são com certeza um contributo para aumentar o seu conhecimento. Estas pedreiras foram mencionadas por Farinha Ramos (FARINHA RAMOS, 1985) na rubrica de “Ardósias”, na produção de esteios para vinhas. A sua importância tem aumentado, em particular, devido a aplicações do foro de materiais de construção. A produção de rochas que quebram facilmente pelas clivagens tem ganho progressivo interesse, na medida em que resultam em materiais com baixo custo na produção. Além disso, o mercado tem revelado aptidão para absorver novos tipos de rochas ornamentais, inclusivé as que são fornecidas com acabamentos menos elaborados. Entretanto, foram mencionadas por CASAL MOURA (2001a) no grupo de “Outras rochas xistentas”, depois de apresentar uma rubrica dedicada às

ardósias; este autor designa os xistos das pedreiras de Foz Côa como quartzofilitos cinzento-escuros de grão fino, bastante duros. Por fim, merece referência o facto destas rochas já aparecerem no Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas, versão *on-line* (ORNABASE,2003).

O objecto de exploração principal continua ainda hoje a ser o xisto ardosífero para aplicação em esteios de vinha, essencialmente para a região do vinho do Porto (vinho fino). Outras aplicações têm sido recentemente efectuadas e especialmente associadas à construção civil. No entanto, acredita-se que o grande incremento de aplicação ainda estará para acontecer, sendo este artigo um dos elementos potencializadores nesse sentido, apresentando dados e propostas para valorizar ainda mais um recurso geológico que se entende de grande potencial e mais-valia para o enriquecimento da região.

Efectuaram-se estudos de campo, com levantamento geológico, estrutural e acompanhamento detalhado da exploração durante um período que no total constituiu mais de um mês. Efectuaram-se colheitas de amostras que foram sujeitas a estudos de laboratório no Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra, como a difractometria de raio - X, observação de lâminas delgadas em microscópio óptico, ensaios físicos, mecânicos e de alterabilidade.

2. LOCALIZAÇÃO E A REGIÃO

As pedreiras em estudo estão situadas num local designado por Poio, junto à margem esquerda do Rio Côa, a cerca de 3 km da confluência deste com o Rio Douro (fig.1). Localizam-se a sudeste de Foz Côa, pertencente ao distrito da Guarda.

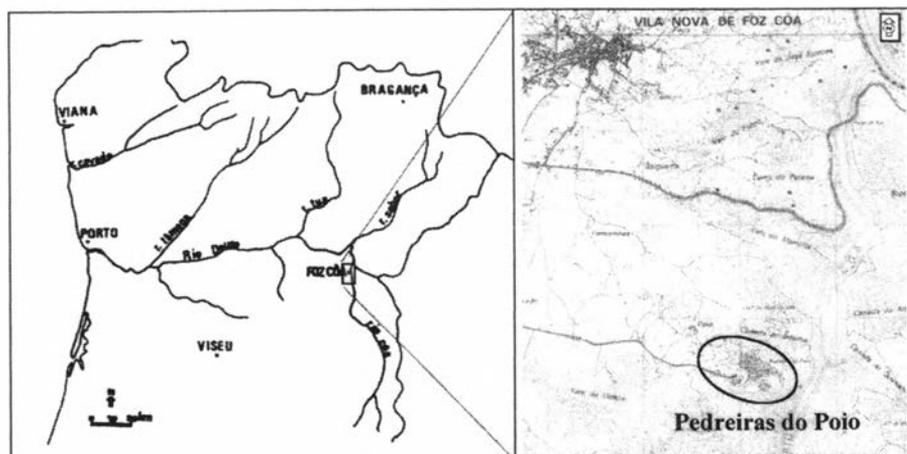


Fig. 1 – Enquadramento geográfico das pedreiras do Poio, Foz – Côa , em esboço do norte de Portugal e em mapa à escala 1/65000, a partir da Carta Militar de Portugal - Folha 150 A (IGE,1994).

Salienta-se a particularidade de se situarem em pleno coração do Parque Arqueológico do Vale do Côa, onde recentemente as gravuras rupestres foram classificadas como património da Humanidade (1998) e que, devido à sua importância, levaram ao abandono da construção da barragem no rio Côa, localizada nas proximidades das pedreiras. Salienta-se que, ainda mais recentemente, a região do vale do Douro, associado às vinhas de produção de vinho fino, “O Douro Vinhateiro”, passou também a ser património da Humanidade. Referem-se estes aspectos, em especial, para enfatizar que o País está a mudar e aquela região também. As pedreiras, com a produção de xisto de modo a ser aplicado na recuperação de velhas edificações e na construção de novos e modernos espaços, poderão marcar um estilo arquitectónico próprio, e que já foi típico nas áreas urbanas e rurais da região. Veja-se a fig.2, que apresenta algumas edificações ainda existentes no concelho de Foz Côa e das quais se enfatiza o castelo da aldeia rural de Castelo Melhor que, tanto quanto é do conhecimento dos autores, é caso raro no País, por ser em pedra xistenta, e urge recuperar. Os aspectos arquitecturais, resultantes da aplicação deste tipo de pedra, já foram, e poderão voltar a ser, típicos na região, de modo a dotá-la de encantos próprios, orientando-a ainda mais para o turismo, pois este sector poderá ser mais uma alavanca do desenvolvimento da região.

Refere-se ainda o facto de haver o pólo da Canada do Inferno de gravuras rupestres, na proximidade das pedreiras, e que tem sido visitado sem qualquer espécie de conflito com a actividade das mesmas. Uma exploração em série, e de grande dimensão, das pedreiras poderá vir a facilitar o desenvolvimento daquele pólo de gravuras, criando mesmo um espaço de musealização das pedreiras, associado a espaços verdes em recuperação ambiental, aproveitando os recursos hídricos subterrâneos que são intersectados com o avanço da exploração em profundidade.

3. GEOMORFOLOGIA

A geomorfologia da região é condicionada por um grande acidente tectónico, a falha da Vilarça. Esta passa a cerca de 5 km a oeste da zona das pedreiras, sendo bem marcada na zona do *graben de Longroiva*, continuando para norte, ao longo do rio do Vale da Vila, visível muito próximo (a oeste) de Foz Côa, com cruzamento no rio Douro, na zona das Cortes (Pocinho) e seguindo para norte, para Espanha. Aquela falha, de direcção global NNE-SSW, com um deslocamento relativo na horizontal de cerca de 5.5 km, separa a região em dois grandes blocos: o bloco ocidental que ascendeu cerca de 300 a 400 m após o Vilafranquiano (FERREIRA DA SILVA e RIBEIRO, 1991) e que foi já extremamente desmantelado pela erosão; e o bloco oriental que inclui a zona das pedreiras, e ainda preserva o Ordovícico nos sinclínios de Castelo Melhor (fig. 3).

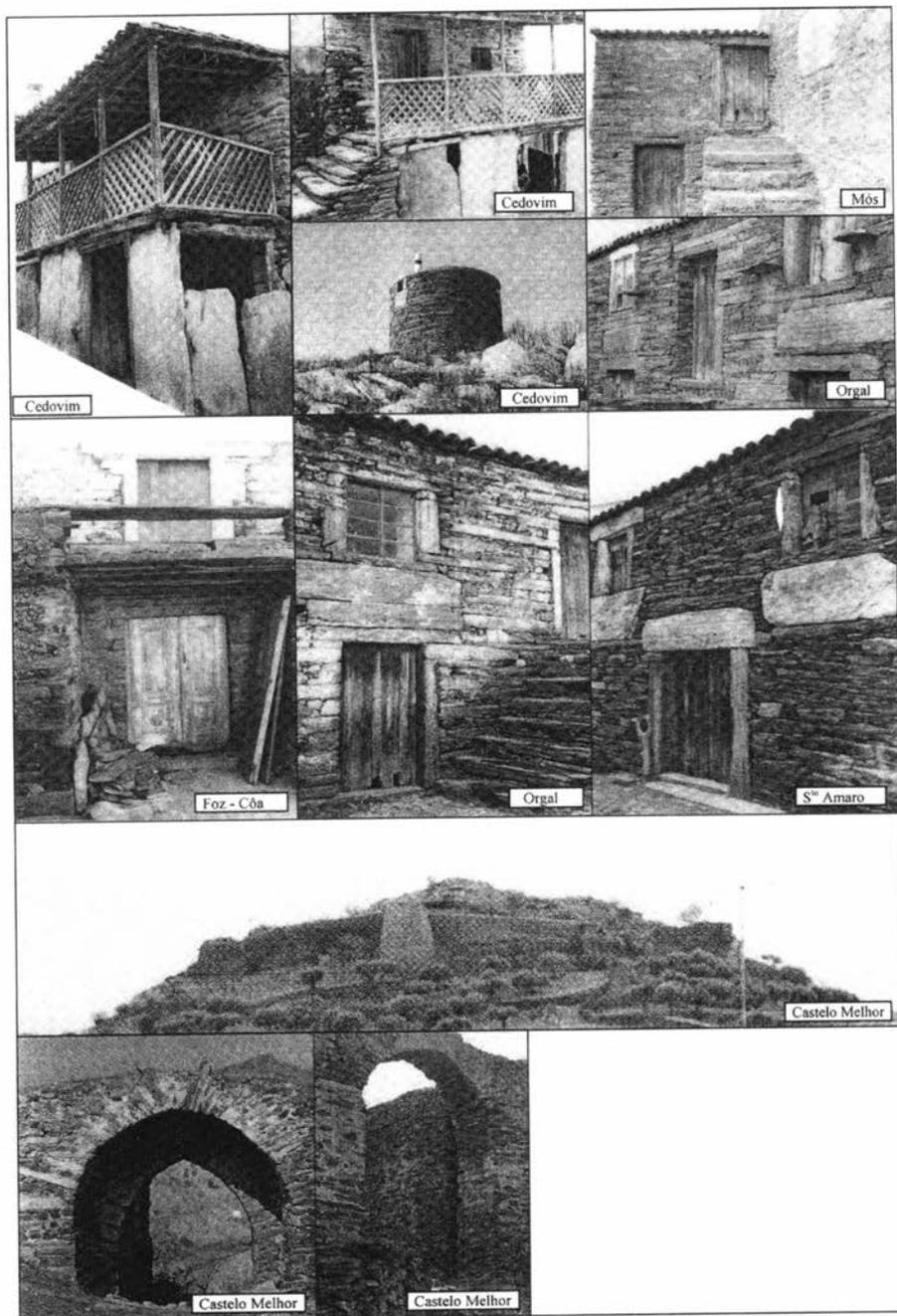
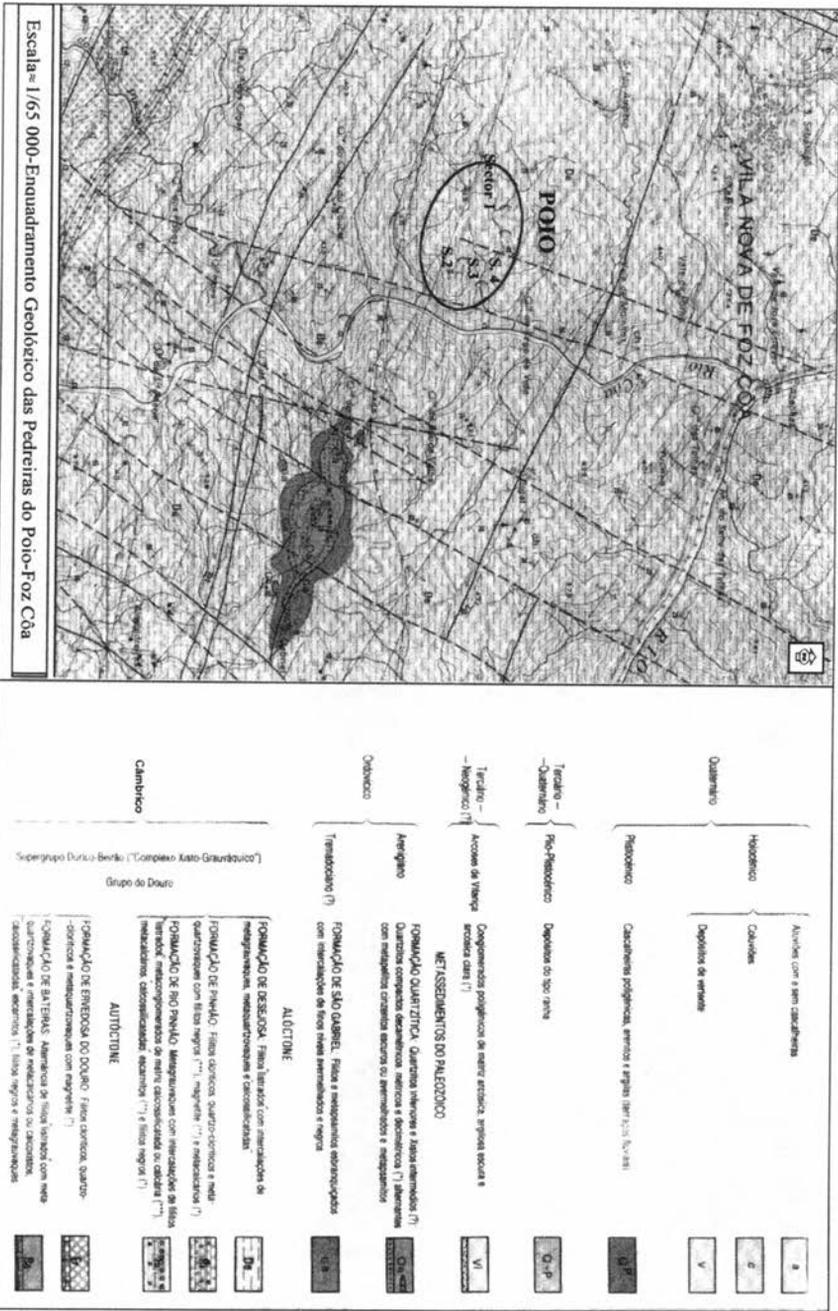


Fig. 2 – Casas típicas /Património rural de construções em rochas xistentas do Concelho de Foz - Côa (adaptado de SÁ COIXÃO e TRABULO, 1995).



Assim, a área com interesse ao presente trabalho em termos geomorfológicos, inclui a zona de Foz Côa até Muxagata (a sul), constituindo uma área com uma forma aproximadamente rectangular, de direcção global NNE-SSW, sendo o lado oeste o rio do Vale da Vila e o lado este, o rio Côa (fig. 3). A maioria da área deste território é relativamente plana, situando-se as zonas mais altas entre 400 e 425 metros de altitude. Em geral, as linhas de água, iniciam-se a oeste e seguem para leste, desaguando no rio Côa a cotas de cerca de 125 m, dando ao lado oriental do referido rectângulo o aspecto de teclado de piano. As linhas de água na proximidade do rio Côa, estão muito encaixadas e os vales são no geral, muito escarpados.

De um modo detalhado, as pedreiras do Poio localizam-se essencialmente nas bordaduras de um monte com alongamento segundo a direcção W-E (fig. 3 e 4), sendo a zona mais alta o resultado da continuidade do planalto de Foz Côa, situado a oeste das pedreiras. Na zona das pedreiras, o referido planalto (com cotas de cerca de 360m) é recortado por duas linhas de água de direcção global W-E e que correm de oeste para este em direcção ao rio Côa.

4. GEOLOGIA

Em relação aos aspectos geológicos, na época em que se realizou o presente trabalho, não estava ainda publicada a carta geológica da região, e que hoje já existe (FERREIRA DA SILVA e RIBEIRO, 1991). Na época, serviram de base os trabalhos realizados por COTELO NEIVA *et al.* (1982) para a implantação da barragem de Foz Côa, que é a cerca de 1 km para jusante do local das pedreiras, e ainda um esboço geológico da região de Foz Côa – Mêda, fornecido pessoalmente por BERNARDO DE SOUSA (1987). Na fig. 3 apresenta-se o enquadramento geológico da zonas das pedreiras num extracto da carta actualmente publicada (FERREIRA DA SILVA e RIBEIRO, 1991). A unidade geológica que inclui o recurso das pedreiras, é constituída predominantemente por xistos de cor cinzenta escura a negra, ardosíferos, por vezes listrados, e em zonas de maior fracturação apresentam-se acastanhados devido à intensa oxidação. BERNARDO DE SOUSA, em 1985, já referia que os níveis que forneciam os esteios de Foz Côa integravam-se na unidade geológica designada por “Formação da Desejosa”, integrada na sucessão litostratigráfica do Vale do Douro (fig. 3), ante-Ordovícica. A espessura total desta unidade é cerca de 250 m, podendo atingir 300 m.

A zona das pedreiras situa-se num sinclinal mergulhante para ESE, com a estratificação a variar de sub-horizontal na zona mais a sul da exploração até N54°W, 60°S, já na zona mais a norte (fig. 3 a 5).

Os estratos atingem diferentes possanças, variando desde alguns centímetros até cerca de 3 metros. A separação das camadas é efectuada por juntas de

estratificação (S_0) que por vezes chegam a atingir 10 cm ou até mais, preenchidas com material argiloso. Paralelamente a S_0 há a xistosidade S_1 , assim como uma clivagem xistenta por onde é possível a separação fácil da rocha.

Outras estruturas importantes são a xistosidade S_2 geralmente de atitude $N43^\circ W, Vert$, e um sistema de diaclases de atitude paralela a S_2 , com grandes espaçamentos, 5 m e, por vezes, mais. Estas últimas estruturas servem geralmente de frente (“peito”) às pedreiras. Ocorre também um sistema principal de diaclases que condiciona a exploração, tendo como atitude mais frequente $N52^\circ E, Vert$; estas, por vezes, encontram-se preenchidas com quartzo e calcite. É segundo estas últimas atitudes que frequentemente se desenvolvem os lados das pedreiras, ou seja a “testa esquerda” e a “testa direita”.

A relação entre as discontinuidades da zona apresenta-se nas fig. 4 e 5. São três as famílias principais de discontinuidades: a Família I, muito frequente, corresponde principalmente a S_0 ; a Família II, é constituída fundamentalmente por discontinuidades S_2 e de pequena dispersão; e a Família III, de grande dispersão em relação às direcções, mas sempre muito inclinadas.

Outras estruturas importantes, mas pouco frequentes, são filões de quartzo (que, por vezes, preenchem antigas falhas) e algumas grandes falhas com preenchimentos argilosos. Estas últimas são ambas negativas no processo normal de exploração pois condicionam o tamanho do bloco explorado.

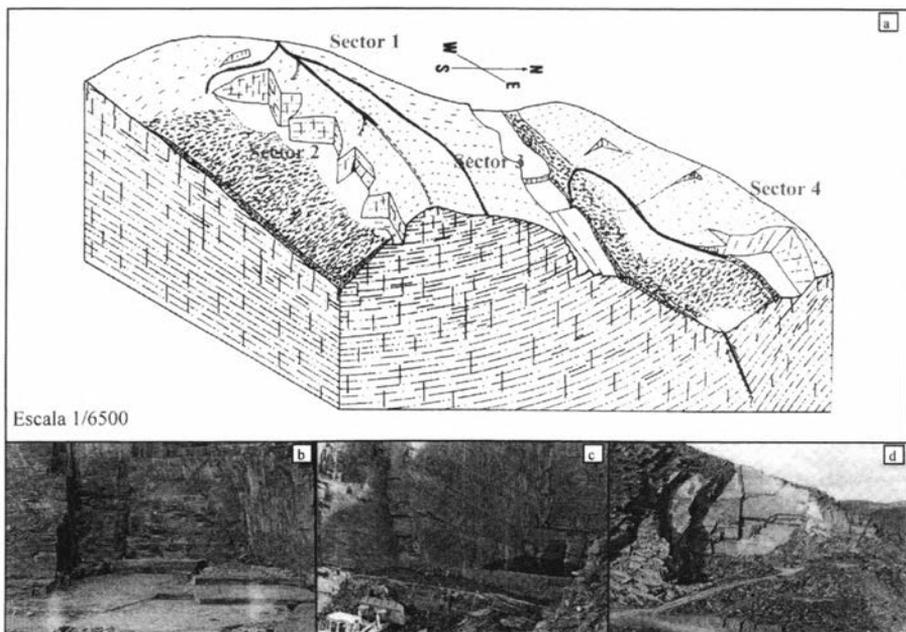


Fig. 4 - Esboço tridimensional sobre o desenvolvimento das pedreiras do Poio - Foz Côa (a) e fotografias sobre situações típicas dos sectores 2 (b), 3 (c) e 4 (d); (adaptado de FERREIRA GOMES, 1987).

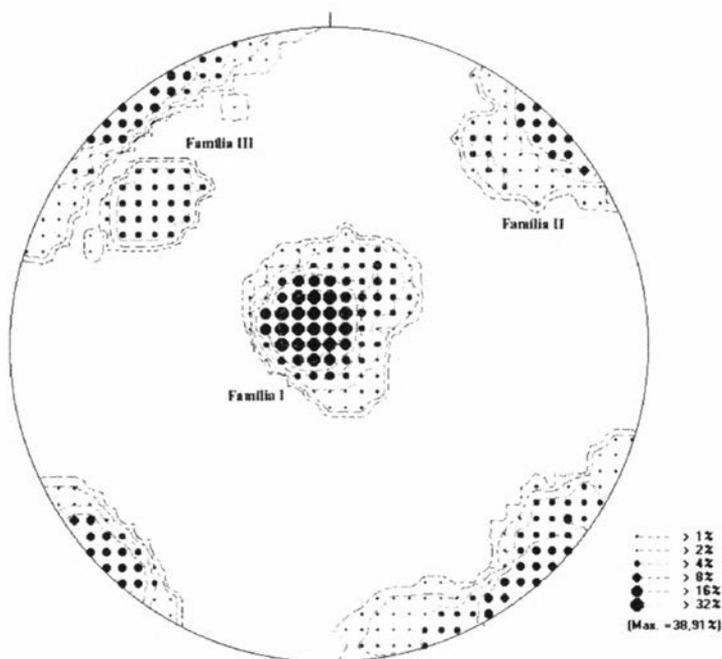


Fig. 5 – Diagrama de pólos com tratamento estatístico das descontinuidades da zona das Pedreiras do Poio, Foz Côa (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

5. ASPECTOS DA EXPLORAÇÃO

Em termos didácticos consideram-se 4 sectores de exploração (fig. 3 e 4). As zonas de exploração mais antigas, provavelmente há mais de 100 anos, verificavam-se no Sector 1. Contudo, por dificuldades técnicas, resultavam em pequenos buracos, com muita água e estéreis, como se mostra na fig. 5a,b,c, sendo depois abandonados.

Entretanto, evoluiu-se principalmente para o Sector 2 em que, devido à situação geomorfológica e inclinação das camadas semi-horizontais (fig. 4a ,b), os problemas de águas subterrâneas eram minorados, pois a drenagem era feita directamente para o exterior da exploração e linha de água mais próxima. Com o avanço da tecnologia evoluiu-se para os Sector 3, onde a qualidade da pedra para esteios é melhor. No entanto, salienta-se que há algumas dificuldades devido a problemas hidrogeológicos, como evidencia a fig. 4a,c, pois nesse sector, as camadas inclinam para montante e a água subterrânea não escoa naturalmente.

Algumas tentativas foram efectuadas no Sector 4 (fig. 4a,d), mas não resultaram bem em termos do objectivo fundamental, que era a produção de esteios, além do pé da pedra ser muito inclinado e dificultar a exploração, especialmente em

relação à segurança. Actualmente, a produção de esteios e de outros elementos de pedra muito compridos, tem sido essencialmente no Sector 3 e, muito recentemente, (2002) volta-se a dar prioridade ao Sector 1, dado estar a haver a capacidade de vender a pedra para a indústria da construção e, em particular, para o estrangeiro para revestimento de paredes exteriores e arranjos de exteriores e interiores.

Os empresários e exploradores no local são mais de uma dúzia; a pedreira típica a céu aberto é, aproximadamente, 20 m × 20 m × 30 m, sendo, no geral, as várias explorações contíguas umas às outras. Estas situações dificultam frequentemente a exploração adequada ocasionando uma produção deficiente.

O desmonte é feito em bancadas em degraus de pequeno comprimento. A altura de cada degrau varia geralmente de 0.4m a 1.5m, aproveitando, sempre que possível, o desmonte de uma camada. O arranque é iniciado com a perfuração de martelos roto-percussivos, a ar comprimido (fig. 6d,e,f). O afastamento geralmente usado, ou seja, a distância da face da bancada à linha de fogo, é de 1 m; o espaçamento entre dois furos da mesma fila, é cerca de 1.5m; o explosivo mais usado é a pólvora negra. O desmonte resulta quase sempre paralelo a S_2 . Os blocos, na situação tradicional (ou seja, para a produção de esteios), são sujeitos à operação de “tronçamento” (fig. 6g,h), isto é, separam-se paralelamente a S_2 (rasgo) e paralelamente a S_0 ou S_1 (“desdobre”), até obter a secção desejada. A dimensão do bloco mais frequente é cerca de 0.8m x 1.0 m x 1.65m: a altura 0.8 m depende da possança da camada que, por vezes, é menor; a largura de 1.0m é função do afastamento, dependendo da capacidade da energia do explosivo e da altura da bancada, sendo paralelo a S_2 (família II, fig. 4 e 5); o comprimento 1.65m depende do espaçamento das diaclases (família III, fig. 4 e 5) que, geralmente são perpendiculares aos planos anteriores.

Os estéreis que resultam deste processo variam de 40 a 60 % e em 1987, eram ainda desprezados, como evidenciam as fotos k e l da fig. 6. Felizmente, em 2003, já são aproveitados, quase a 100 % na construção civil, como se pode observar em algumas imagens da fig. 8.

6. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

308

Em 1987, referia-se (FERREIRA GOMES, 1987) que o futuro das pedreiras de Foz-Côa passaria por conseguir aplicar esta rocha, de um modo sistemático na construção civil, pois o mercado associado aos esteios baixaria com a saturação da vinha no Vale do Douro e regiões vizinhas. Por outro lado, para grandes distâncias, (ex: o Alentejo), não haveria grande vantagem em produzir esteios, devido ao encarecimento do custo pelo transporte. Assim, pensando essencialmente na construção civil, havia necessidade de efectuar ensaios laboratoriais e, especialmente, físicos e mecânicos. Os resultados obtidos em 1987 apresentam-se neste trabalho, no item seguinte.

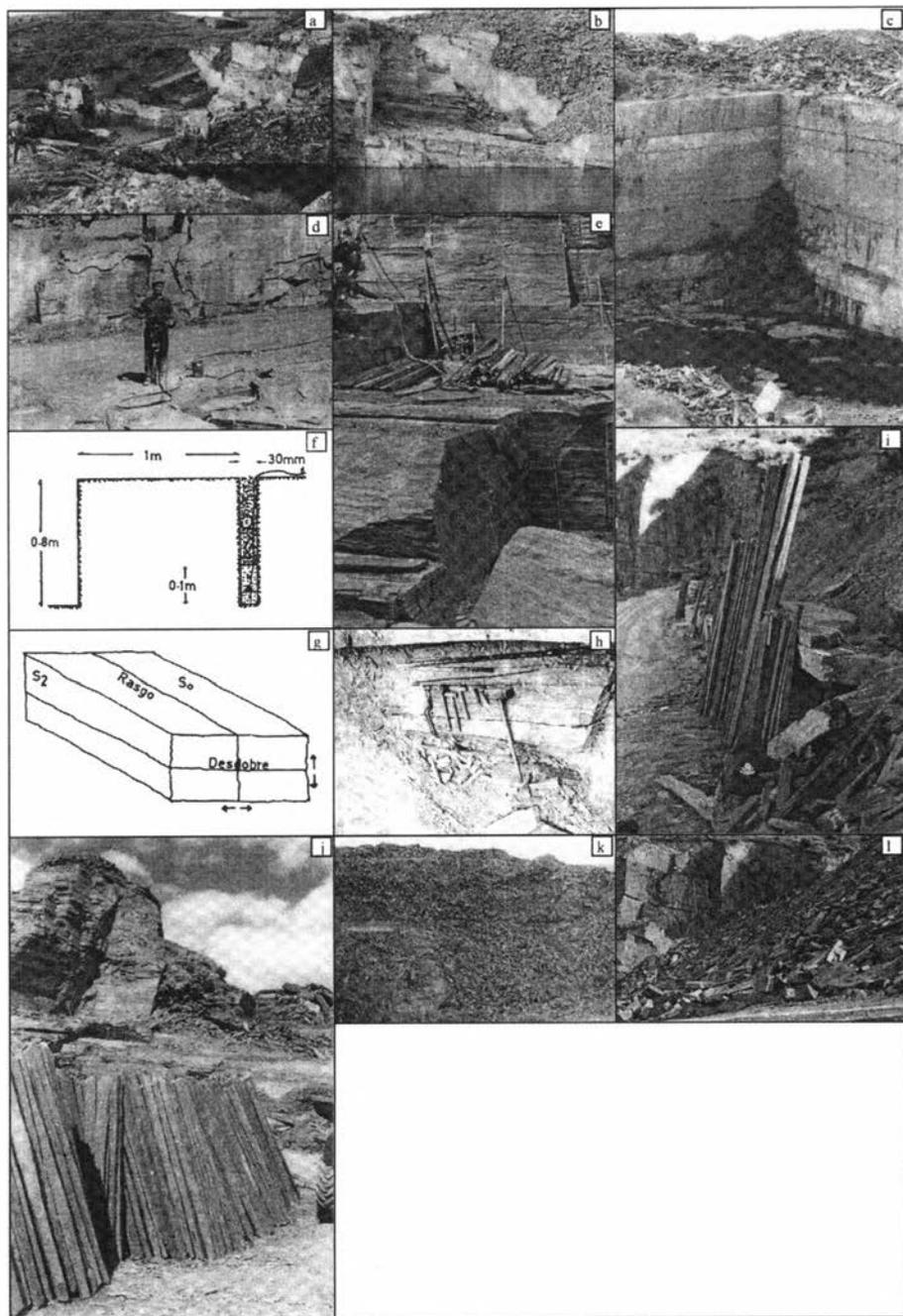


Fig. 6 – Aspectos da exploração de xistos ardosíferos nas pedreiras do Poio de Foz Côa: Explorações muito antigas e abandonadas (a, b, c); situações típicas de desmonte até obter os esteios (d a h); aspectos dos esteios (i, j); estéreis resultantes da exploração dos esteios (k, l); (adaptado de FERREIRA GOMES, 1987).

i) estudos mineralógicos

Por difractometria de raio-X e observações de lâminas delgadas em microscópio óptico, sabe-se que a mineralogia destas rochas é constituída essencialmente por quartzo, micas e ilite, seguindo-se a caulinite, a grafite, a clorite, a pirite, a calcite, a montemorilonite, e por fim alguns feldspatos, tais como a microclina, ortoclase e anortite.

ii) absorção de água

Dado que a saturação de uma rocha leva, no geral, a diminuir a sua resistência, começou-se por analisar a capacidade de absorção de água ao longo do tempo, a partir de pequenos provetes de rocha imersos em água. Os resultados apresentam-se no Quadro I. Salienta-se que a rocha apresenta um pequeno incremento de humidade no início, mas depois de muito tempo, os teores em água duplicam. Esta situação atribui-se ao facto destas rochas apresentarem permeabilidade muito baixa, no entanto ao longo do tempo as clivagens possibilitam a penetração de água para o seu interior.

iii) resistência a partir de “ Point Load Test” (resistência a carga pontual)

Realizaram-se ensaios de resistência, de acordo com a metodologia apresentada em ISRM (1985). Testaram-se provetes perpendicular e paralelamente à xistosidade (S_1), em 4 situações de humidade. Para cada situação testaram-se 12 provetes. Os quadros II e III apresentam, respectivamente, um exemplo típico de um ensaio e os resultados globais. Os provetes testados paralelamente à xistosidade são muito menos resistentes (cerca de 70%) do que os testados perpendicularmente. Em qualquer das situações, a resistência dos materiais ao fim de 15 dias de imersão, é muito mais reduzida (cerca de 59 %) que na situações de provetes secos ao ar ou ligeiramente húmidos. Considerando a relação entre a resistência à compressão uniaxial, σ_c e Is_{50} (ISRM, 1985): $\sigma_c = 22 Is_{50}$, obtêm-se valores de σ_c entre 61 e 91 MPa para materiais ensaiados paralelamente a S_1 e entre 68 e 134 MPa para os materiais ensaiados perpendicularmente a S_1 , sendo os menores valores para provetes saturados, e os maiores valores para provetes secos ao ar.

Quadro I – Teor em água em provetes de rocha das pedreiras do Poio, Foz-Côa, em diferentes situações (a partir de FERREIRA GOMES, 1987) .

Tempo de imersão	Absorção - teor em água (%)
Seco ao ar	0.10
Passado por água	0.43
2 minutos de imersão	0.47
24 horas de imersão	0.49
96 horas de imersão	0.59
15 dias de imersão	1.05

Quadro II – Exemplo típico de um ensaio de resistência à carga pontual (Point Load Test) em provetes secos ao ar, testados perpendicularmente a S_1 , de rocha das pedreiras do Poio, Foz-Côa (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

Amostra	Tipo	W (mm)	D (mm)	P (kN)	D_c (mm)	I_s (MPa)	F	I_{s50} (MPa)	I_{s50M} (MPa)
1	b	30.2	26.0	7.84	31.62	7.84	0.81	6.38	6.10
2	b	26.4	27.5	5.84	30.40	6.36	0.80	5.08	
3	b	29.3	27.0	7.84	31.74	7.78	0.82	6.39	
4	b	28.8	27.2	6.08	31.58	6.10	0.81	4.96	
5	b	27.4	26.3	7.35	30.29	8.01	0.80	6.39	
6	b	27.7	26.5	8.53	30.57	9.12	0.80	7.31	
7	b	26.3	27.0	7.25	30.07	8.01	0.80	6.41	
8	b	26.3	27.5	8.04	30.07	8.89	0.80	7.11	
9	b	27.7	27.0	7.00	30.85	7.35	0.80	5.88	
10	b	27.8	27.0	7.00	30.85	7.35	0.80	5.88	
11	b	28.6	27.2	7.00	31.53	7.41	0.81	6.00	
12	b	27.0	27.0	6.37	30.47	6.86	0.80	5.50	

$$I_s = P/D_c^2; D_c = (4A/\pi)^{0.5}; A = W \times D; F = D_c/50)^{0.45}; I_{s50} = F \times I_s$$

P - pressão na rotura; D_c - área equivalente; A - área da secção do provete; W - espessura; D - distância entre as ponteiras; F - factor de correcção; I_s - índice de resistência à compressão; I_{s50} - valor de I_s teórico para um teste com $D = 50$ mm; I_{s50M} - média dos resultados após a retirada dos dois maiores e dos dois menores valores; b - bloco (tipo de forma do provete).

Quadro III – Resistência relativa em termos de I_{s50M} (Índice de resistência à compressão) a partir do ensaio “Point Load Test” em provetes testados paralela e perpendicularmente à xistosidade, de rocha das pedreiras do Poio, Foz Côa, em diferentes situações de humidade (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

Tempo de imersão	Teor em água (%)	I_{s50M} perpendicularmente a S_1 (MPa)	I_{s50M} paralelamente a S_1 (MPa)
Seco ao ar	0.10	6.10	4.15
24 horas de imersão	0.49	6.10	3.62
96 horas de imersão	0.59	5.52	3.53
15 dias de imersão	1.05	3.09	2.77

iv) alteração e alterabilidade

Considerando as aplicações associadas à construção civil, há necessidade de se saber sobre a capacidade de conservação destas rochas quando são sujeitas a acções atmosféricas agrestes ou equivalentes. Assim, sujeitaram-se a ensaios de envelhecimento acelerado pela água oxigenada (STRUILLOU, 1969) e congelação - evaporação com água normal, e ainda ao ensaio de desgaste em meio húmido, realizado em termos genéricos segundo LNEC (1994). Os resultados obtidos apresentam-se nos quadros IV, V e VI.

Em termos globais, pode referir-se que, fisicamente, a rocha apresenta muito boa estabilidade, não sofrendo praticamente nenhuma modificação. Em termos químicos, os provetes sujeitos a meios muito agrestes como os equivalentes ao do ensaio da água oxigenada, mudam de cor, ou seja de cinzenta-azulada passa para castanha-alaranjada, como se verificou no ensaio de água oxigenada (fig. 7).

Quadro IV – Resultados dos ensaios de água oxigenada em provetes^(*) de rocha das Pedreiras do Poio, Foz-Côa, em diferentes situações de humidade (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

	Ciclo	A	B	C	D	E
Quantitativos	1º	565.7	213.2	565.5	0.2	0.1
	2º	565.5	213.2	565.2	0.3	0.1
	3º	565.2	213.2	565.0	0.2	0.1
	4º	565.0	213.2	564.7	0.3	0.1
Qualitativos	O material perdido é muito pouco e sob a forma de grãos muito finos e alongados. O material perdido e amostra retida, logo após o 1º ciclo, modificaram totalmente a cor, ou seja, de cinzenta-azulada (fig. 7a), passou para castanha-avermelhada (fig. 7b).					

A - peso da amostra mais o peso do copo (g); B - peso do copo (g); C - peso da amostra mais o peso do copo, após peneiramento (g); D - peso do material perdido (g); E - peso do material perdido (%). Peso inicial da amostra = 352.5 g. Quantidade de água oxigenada utilizada em cada ciclo = 200 ml.

(*) - agregado com granulometria de diâmetro entre 11.2 e 22.4 mm sujeito a ciclos de imersão em água oxigenada a 110 volumes e pH de 2.5, e secagem até evaporação completa em estufa a 105°C.

Quadro V – Resultados dos ensaios de congelação - evaporação^(*) em provetes de rocha das pedreiras do Poio, Foz Cõa, em diferentes situações de humidade (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

	Ciclo	A	B	C	D	E
Quantitativos	1º	534.3	161.8	533.6	0.7	0.2
	2º	533.6	161.8	533.5	0.1	0.0
	3º	533.5	161.8	533.3	0.2	0.1
Qualitativos	O material perdido é muito pouco e sob a forma de grãos muito pequenos e alongados. O material perdido e amostra retida, não modificaram a cor de um modo significativo (fig. 7c).					

A - peso da amostra mais o peso do copo (g); B - peso do copo (g); C - peso da amostra mais o peso do copo, após peneiramento (g); D - peso do material perdido (g); E - peso do material perdido (%). Peso inicial da amostra = 372.5 g. Quantidade de água oxigenada utilizada em cada ciclo = 250 ml.

(*) - ensaio de metodologia geral semelhante ao de água oxigenada, em que o agregado com granulometria de diâmetro entre 11.2 e 22.4 mm sujeito a ciclos de imersão em água normal e congelado, e secagem até evaporação completa em estufa a 105°C.

Quadro VI – Resultados dos ensaios de desgaste em meio húmido (Slake) em provetes de rocha das pedreiras do Poio, Foz Cõa, em diferentes situações de humidade (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

Amostra	Ciclo	A	B	C	D	E
P1-R (regular)	1º	2146.6	1692.0	2145.9	0.7	0.15
	2º	2145.9	1692.0	2145.9	0.4	0.01
P2-R (regular)	1º	2185.4	1692.0	2184.6	0.8	0.16
	2º	2184.6	1692.0	2183.6	1.1	0.22
P1-I (irregular)	1º	2179.8	1818.1	2178.5	1.3	0.34
	2º	2178.5	1818.1	2177.6	0.9	0.25
P1-I (irregular)	1º	2304.7	1818.1	2302.6	2.1	0.43
	2º	2302.6	1818.1	2302.3	0.3	0.06
–	A cor da água no decorrer dos ensaios foi sempre cinzenta - azulada.					

A - peso da amostra mais o peso do tambor no início do ciclo (g); B - peso do tambor (g); C - peso da amostra mais o peso do tambor, no fim do ciclo (g); D - peso do material perdido (g); E - peso do material perdido (%).

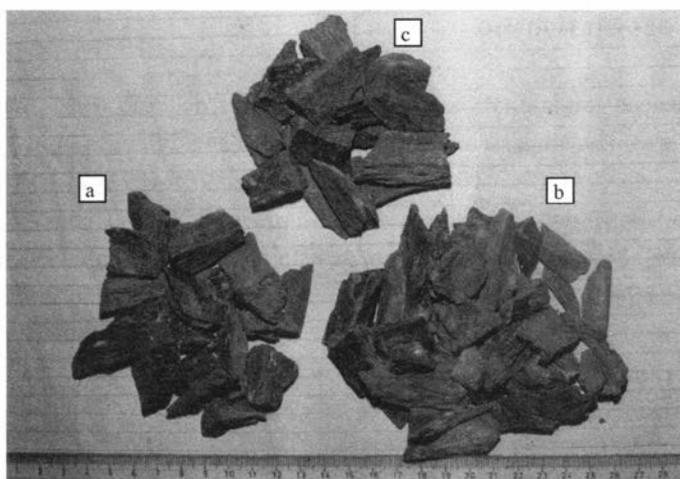


Fig. 7 – Aspecto dos provetes sujeitos a ensaios de alterabilidade, antes do ensaio (a) e após o ensaio de água oxigenada (b), e após o ensaio de congelação - evaporação (c), em provetes de rocha das pedreiras do Poio, Foz Côa (a partir de FERREIRA GOMES, 1987).

Nesta fase, fez-se uma pesquisa sobre resultados de ensaios disponíveis na literatura, para comparação com os resultados obtidos, tendo-se compilado apenas os resultados apresentados no Quadro VII. Os dados disponíveis são muito poucos para tecer considerações. Contudo adianta-se a necessidade de efectuar ensaios de um modo sistemático, até porque alguns valores de resistência orientam para situações divergentes. Estas poderão depender do modo como os provetes foram testados em relação ao ângulo entre a xistosidade e a direcção da tensão principal de carregamento, e ainda do grau de saturação, pois verificou-se no presente trabalho que o teor em água pode aumentar até cerca de 1% e tal situação influencia muito na resistência deste tipo de rocha.

Quadro VII – Resultados dos ensaios de laboratório por diferentes autores, em provetes de rocha das pedreiras do Poio, Foz Côa.

Parâmetro	Casal Moura (2001b)	ORNABASE (2003)	(SoliceL,2003)
Resistência mecânica à compressão (MPa)	114	144	46.5
Resistência mecânica à compressão após teste de gelividade ^(*) (MPa)	127	127	–
Resistência mecânica à flexão (MPa)	73.8	73.8	73.8
Massa volúmica aparente (kN/m ³)	26.8	26.8	27.7
Absorção de água à pressão atmosférica normal (%)	0.1	0.1	0.1
Porosidade aberta (%)	0.27	0.27	0.27
Coefficiente de dilatação térmica linear ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.4	8.4	8.4
Resistência ao desgaste (mm)	0.3	0.3	1.0
Resistência ao choque (altura mínima de queda, cm)	55-60	55-60	60

(*) - ensaio efectuado em provetes que foram previamente sujeitos a ciclos de gelo-degelo.

6. APLICAÇÕES E O TURISMO

A aplicação tradicional da rocha das pedreiras do Poio (Foz Côa) foi, sem dúvida, na organização das vinhas, de modo a arribar as videiras com o apoio dos esteios de xisto ardosífero (fig. 8a,b). Esta situação teve, com certeza, maior importância a partir do momento em que o Marquês de Pombal, com a lei de 1756, num rasgo de génio, possibilitou a demarcação da 1ª região vinhateira demarcada do mundo, a região do vinho do Douro. Outros aspectos da região são, como já se referiu, as particularidades de recentemente ter passado a património mundial, a Região do Douro Vinhateiro e as gravuras rupestres. Entretanto, como aspecto negativo considerado pelos autores, é o facto de, na região, muitas casas típicas como as apresentadas na fig. 2, sobretudo no período de 1960 a 1990, serem substituídas por casas de betão armado, outras de xisto, argamassadas e pintadas a cores garridas, por vezes revestidas a azulejos, descaracterizando a arquitectura típica da região. É neste contexto que se pretende, com o presente trabalho, sensibilizar para as aplicações desta rocha na construção de casas, no revestimento de paredes de edifícios, exteriores e interiores, em lancis para passeios, em muros de jardim, em soleiras e peitoris, em espelhos de degraus, em latadas ou ramadas de vinhas e de floreiras, em candeeiros de exterior, em fontanários, em barbecues, mesas de exterior, bancos, revestimento de chaminés, etc, dependendo da imaginação do cidadão local harmonizada com a do arquitecto projectista. A fig. 8 apresenta algumas ideias de aplicações entretanto efectuadas.

Se se verificarem incentivos a nível da própria Câmara de Foz Côa, e outras da Região, de modo a que a arquitectura das casas existentes e os arranjos tenham claramente um cunho especial relacionado com as rochas xistentas da região, ganharão o Turismo da Região, as pessoas locais e o País. Ganharão também os empresários das pedreiras que, desse modo, com as múltiplas aplicações não haverá estereis e ganhará também o sector dos recursos geológicos, pois urge efectuar para o local um reconhecimento geológico detalhado das reservas, da qualidade, das características físicas, mecânicas e de alterabilidade e, conseqüentemente um plano de lavra adequado, de modo a otimizar a exploração e a torná-la compatível com eventuais impactos ambientais que, no entender dos signatários, poderão ser positivos se daí se souber tirar partido dos recursos hídricos subterrâneos e alterações geomorfológicas que resultam da exploração, em prol de melhoramento do pólo visitável de gravuras rupestres da Canada do Inferno, que é contíguo à zona das pedreiras do Poio.

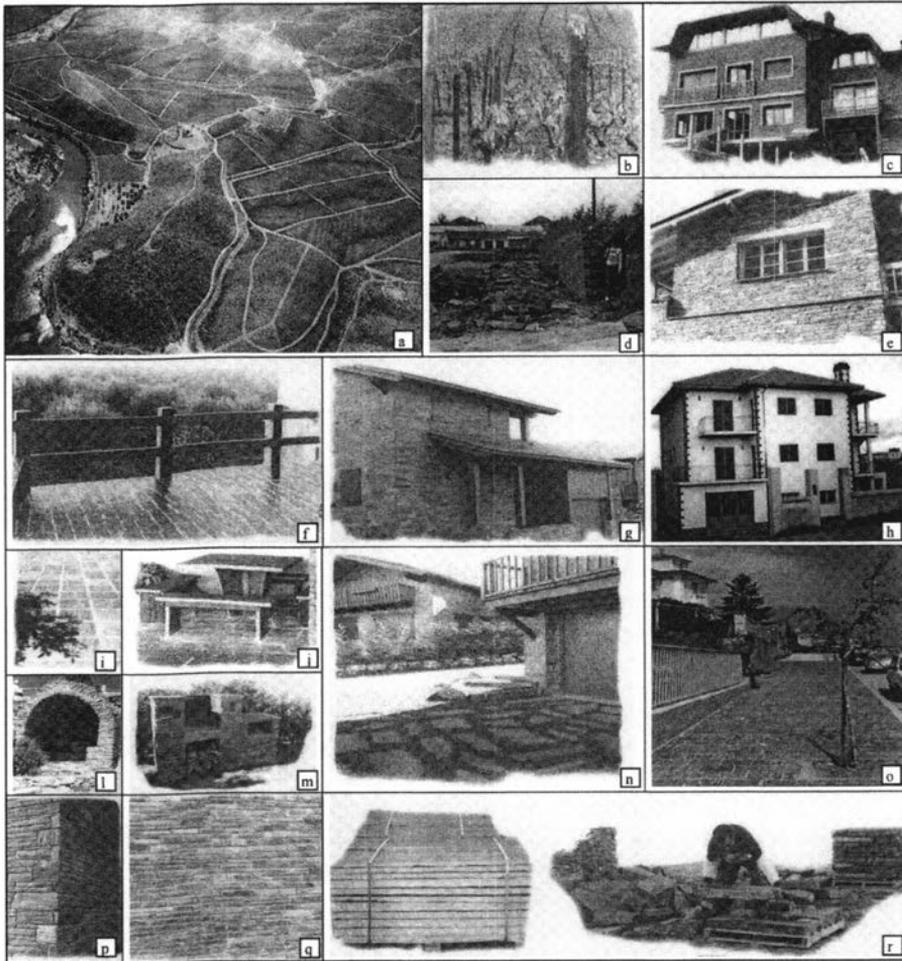


Fig. 8 – Aspectos de aplicações recentes da rocha xistenta da região de Foz-Côa: Aplicações tradicionais em vinhas como esteios: a - Quinta da Ervamoira com o seu Museu e Complexo Turístico – Cultural no centro (GUIMARÃES, 1997); b - detalhe de esteios na vinha; c,e,f,g,i,j,m,n,p,q,r - imagens retiradas de SOLICEL (2003) ; d,h,l,o - imagens obtidas pelos autores.

BIBLIOGRAFIA

- CASAL MOURA, A. (2001a) – A pedra natural ornamental em Portugal - Nota Breve. Boletim de Minas, Vol. 38 - nº 3. Instituto Geológico e Mineiro. Versão Online no site do IGM; (http://www.igm.pt/edicoes_online/boletim/vo138_3/artigo2.htm).
- CASAL MOURA, A. (2001b) – A pedra natural ornamental em Portugal - Nota Breve. Boletim de Minas, Vol. 38 - nº 3. Instituto Geológico e Mineiro. Versão Online no site do IGM (http://www.igm.pt/edicoes_online/boletim/vo138_3/artigo2_quadros.htm).

- BERNARDO DE SOUSA, (1985) – Considerações paleogeográficas e ensaio de correlação das formações do Grupo do Douro (CXG) com as formações ante-Ordovícicas da zona Centro – Ibérica. Memórias e Notícias – Nº 95. Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Univ. Coimbra.
- BERNARDO DE SOUSA, (1987) – Esboço geológico da Região de Foz-Côa – Mêda. Manuscrito favorecido pessoalmente ao primeiro autor.
- COTELO NEIVA, J.M.; CORREIA DE SOUSA, A.; e BRAGA DA CRUZ, A. (1982) – Étude géologique et géotechnique du site du Barrage de Foz Côa. XIV Cong. des Grands Barrages; Rio de Janeiro.
- LTNEC (1994) – Método sugerido para a determinação do ensaio de Desgaste em meio húmido (Slake – Durability Test). Nota Técnica 4/94 – GEA/DG. 11p.
- ORNABASE (2003) – Base de Dados do Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas. Versão on line. (<http://www.igm.pt/almanaque>) *GeoAlmanaque / Rochas Ornamentais Portuguesas / ORNINDEX / Empresas Exploradoras.*
- FARINHA RAMOS, J.M. (1985) – Matérias primas não metálicas de Portugal. Contribuição para o seu conhecimento. *Geonovas* nº 8/9, Lisboa, pp. 69-91.
- FERREIRA GOMES, L.M. (1987) – Estudo das Pedreiras do Poio – Vila Nova de Foz Côa. Trabalho realizado no âmbito da Cadeira de Projecto de Engenharia I. Curso de Engenharia Geológica. Universidade de Coimbra. Departamento de Geologia. 66p.
- FERREIRA DA SILVA, A. e RIBEIRO, M. L. (1991) – Notícia Explicativa da Folha 15-A. Vila Nova de Foz Côa. S. G. de Portugal. Lisboa. 52p.
- GUIMARÃES, G.(1977) – Complexo Turístico – Cultural da Quinta da Ervamoira. Museu de Erva Moira. Guia do visitante. Adriano Ramos Pinto S. A.
- I.G.E.(1994) – Carta Militar de Portugal. Escala 1/25000. Folha 150- Vila Nova de Foz Côa. Instituto Geográfico do Exército.
- ISRM (1985) – Suggested method for determining point load strength. *Int. J.Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*Vol.22, Nº 2, pp. 51-60.
- SÁ COIXÃO, A. N. E. e TRABULO, A . A . R.(1995) – Por Terras do Concelho de Foz – Côa. Subsídios para a sua História – Estudo e Inventário do seu Património. Edição da C. M. de Vila Nova de Foz Côa. Vila Nova de Foz Côa. 451 p.
- SOLICEL (2003) – Catálogo. Sociedade do Centro Industrial de Esteios de Lousa, Lda. V. N. de Foz-Côa. 6p
- STRUILLOU, R. (1969) – Prevision de l’alterabilité des matériaux employés en Génie Civil. Colloque de Géotechnique. Toulouse.

GEORRECURSOS AMBIENTAIS DA PENÍNSULA DE SETÚBAL: UM PROCESSO PARTICIPADO DE ESTUDO E CLASSIFICAÇÃO DE PATRIMÓNIO GEOLÓGICO

J. C. KULLBERG ¹, P. S. CAETANO ¹, R. B. ROCHA ¹ e M. S. ROCHA ¹

PALAVRAS CHAVE: georrecurso, património geológico, Setúbal, ciência viva.

KEY WORDS: geological resources, geological heritage, Setúbal, ciência viva.

RESUMO

No âmbito do Programa Ciência Viva do Ministério da Ciência e do Ensino Superior, o Centro de Investigação em Geociências Aplicadas da UNL coordenou, durante os anos lectivos 2000/2001 a 2002/2003, o projecto intitulado "Estudo e classificação dos georrecurso ambientais da Península de Setúbal". Para além da instituição coordenadora participaram seis escolas dos ensinos básico e secundário, pertencentes aos Concelhos de Seixal, Barreiro, Setúbal e Sesimbra, as respectivas Câmaras Municipais, o Parque Natural da Arrábida (PNA) e uma associação de intervenção ambiental da região de Sesimbra (NECA). Os trabalhos realizados contaram com a participação de cerca de 20 docentes e investigadores, cerca de 500 alunos, monitores do NECA e técnicos das Câmaras Municipais e PNA.

Os objectivos principais do projecto foram a sensibilização dos alunos e pais para questões relacionadas com a valorização e conservação do Património Natural do meio envolvente, a motivação dos alunos para a necessidade da protecção do Património Natural, em harmonia com o desenvolvimento e o fomento de uma consciência ecológica, de modo a contribuir para a formação de um cidadão responsável.

¹ Centro de Investigação em Geociências Aplicadas da UNL. Quinta da Torre, 2829-516 Caparica.

Os alunos procederam à recolha de informação e de amostras de campo em vários locais de interesse geológico na Península de Setúbal, utilizando as metodologias próprias da Geologia. Foram depois elaboradas informações síntese sobre cada um dos locais, para incorporação em suporte multimédia e propostas de cartazes explicativos para colocação *in situ*. Além dos objectivos já assinalados foi, assim, possível dotar as autarquias da região, o Parque Natural da Arrábida e outras entidades competentes, de instrumentos de carácter científico e pedagógico, com recomendações de carácter conservacionista, que suportem futuras decisões sobre a classificação de geomonumentos e a criação de itinerários naturais.

ABSTRACT: Environmental georesources in the Península de Setúbal: a case study of partnership on learning and classification of geological heritage

In the frame of the Ciência Viva Programme of the *Ministério da Ciência e do Ensino Superior*, the Applied Geosciences Research Centre of the UNL coordinated, during the years 2000/2001 to 2002/2003, a project entitled "Study and classification of environmental georesources of the Setúbal Peninsula". The institutions involved in this project, besides the coordinator, were six basic and secondary level schools from the councils of Seixal, Barreiro, Setúbal and Sesimbra, the respective Municipalities, the Arrábida Natural Park (PNA) and an NG environmental association from Sesimbra (NECA). The work developed counted with the participation of around 20 teachers and researchers, 500 students, monitors from NECA and technicians from the Municipalities and PNA.

The main objectives of this project were to promote the awareness of both students and parents to issues related to the valorization and conservation of the surrounding Natural Heritage, the motivation of the students to the necessity of supporting Natural Heritage protection measures, in harmony with development, and the development of an ecological conscience, in order to contribute to the formation of responsible citizenship.

Following specific geological methodologies, the students proceeded to the gathering of information and field samples from various sites with geological interest within the Setúbal Peninsula. This led to the development of synthetic reports on each of the studied sites for incorporation in multimedia support, and proposals of explanatory panels to be placed on site. In addition to the objectives mentioned above, this work has provided the local authorities, the Arrábida Natural Park, and other competent entities, with scientific and educational instruments containing conservationist recommendations, which will help and support future decisions made on the classification of geological monuments and creation of natural itineraries.

1. INTRODUÇÃO

O Centro de Investigação em Geociências Aplicadas da UNL (CIGA) é uma unidade de investigação financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia do Ministério da Ciência e do Ensino Superior, em que os principais vectores de actividade são a análise de bacias sedimentares e a geologia aplicada. No entanto, ao longo dos últimos anos, particular atenção tem sido dedicada à divulgação das Geociências, através de projectos no âmbito dos programas Nónio Século XXI do Ministério da Educação e Ciência Viva e Geologia no Verão do Ministério da Ciência e Ensino Superior.

No âmbito do Programa Ciência Viva IV, o CIGA coordenou um projecto subordinado ao título “Estudo e classificação de georrecursos ambientais da Península de Setúbal”, durante os anos lectivos de 2000/01 a 2002/03; os pressupostos que sustentaram o desenvolvimento do projecto foram:

- A. o conhecimento de pormenor da geologia da Península de Setúbal, em particular da região Arrábida–Espichel, baseado em conjunto de trabalhos científicos desenvolvidos por vários investigadores do CIGA (*e.g.* RIBEIRO *et al.*, 1990; MARQUES *et al.*, 1994; KULLBERG *et al.*, 1995; KULLBERG, 2000; KULLBERG *et al.*, 2000a; KULLBERG *et al.*, 2000b; KULLBERG & MONTEIRO, 2000; KULLBERG *et al.*, 2001);
- B. o reconhecimento da necessidade de valorização de locais com elevado interesse geológico na área em estudo e da importância do ensino experimental da Geologia para alunos dos ensinos básico e secundário, proporcionando, simultaneamente, formação contínua aos docentes destes graus de ensino;
- C. as ligações existentes entre o CIGA e diferentes instituições participantes no projecto, nomeadamente o Parque Natural da Arrábida (PNA) e escolas dos ensinos básico e secundário.

A valorização dos locais acima referida passa por processo de classificação de património geológico, de forma a serem-lhes garantidas condições de protecção e preservação. Desde o início dos anos noventa esta classificação tem sido objecto de estudo de vários autores a nível nacional e internacional, a partir da qual a opinião dos especialistas, a sensibilidade da opinião pública e a vontade dos decisores — embora diferidas no tempo consoante os países — convergem no sentido da absoluta necessidade de adopção de medidas de protecção e conservação do património natural.

Diferentes designações têm sido propostas e utilizadas para os locais com interesse geológico, ou seja, áreas onde a ocorrência de determinados aspectos geológicos são susceptíveis de classificação:

- a) **Geótopo**, definido por B. STURM (1994) como “parte distinta da geoesfera com relevante interesse geológico ou geomorfológico, que tem de ser protegido contra influências que podem destruir a sua substância, forma ou desenvolvimento natural”.
- b) **Local de importância geológica/geomorfológica regional** (Regionally Important Geological/Geomorphological Sites – RIGS), definido por M. HARLEY (1994) com base em quatro critérios de avaliação e consequente classificação:
1. Importância científica, que corresponde ao valor que o local apresenta para a realização de estudos científicos, quer por geólogos profissionais, quer por amadores. Estes locais devem ser demonstrativos, por eles próprios, ou como integrando uma rede, mostrando aspectos geológicos e/ou geomorfológicos coerentes, dentro de determinada área.
 2. Valor educacional que corresponde ao valor do local para a realização de trabalhos de campo por instituições dos vários níveis de ensino, bem como para cursos de educação de adultos.
 3. Contribuição para o conhecimento (*historic associations*), que corresponde ao valor histórico de um local em termo de contributos que já forneceu para o avanço de conhecimentos geológicos/geomorfológicos.
 4. Características estéticas que correspondem ao valor estético e cultural de um local na paisagem, em particular relativamente à promoção da sensibilidade pública e fruição da geologia e geomorfologia, às suas relações com a sociedade e à necessidade de conservação.
- c) **Geomonumento**, definido por A. G. CARVALHO (1998) como “uma ocorrência geológica com características de monumentalidade pelo seu significado e grandiosidade, numa concepção da cultura alargada ao saber científico que importe defender e valorizar, e um recurso cultural a preservar”. Os geomonumentos são ainda entendidos por este autor como georrecurso naturais e, como tal, documentos de uma história bem antiga, a história da Terra, importante para a cultura geral do cidadão, na medida em que as rochas e os solos constituem o suporte físico da realidade social e cultural onde vive. Este conceito de Património Geológico (PG), mesmo alargado ao todo natural, tem subjacente a ideia da sua musealização através de “Exomuseus de Geologia” e, mesmo, “Exomuseus da Natureza”, com conteúdos indissociáveis do local original de ocorrência, enquadramento paisagístico, físico e humano, sempre na perspectiva da fruição pelo público em geral.
- d) **Áreas e locais com interesse geológico** (AIG's e LIG's), definidos por F. LIMA & C. GOMES (1999). As LIG's devem integrar valores paisagísticos, científicos, naturais e culturais de elevado interesse e o seu aproveitamento deve ser de carácter científico e pedagógico e para percursos de visita, chamando a atenção, consoante os casos, para a eventual necessidade de adopção de medidas de protecção especiais.

O propósito de classificação fundamentado no interesse científico, pedagógico e cultural que justifiquem a preservação de determinado “objecto” geológico é comum a todas as designações acima citadas; por outro lado, a preservação é um fim indiscutível, porque concensual, mas não parece que deva ser exclusivo. Como afirma N. PIMENTEL (1999), o PG “não existe por si, pela presença física num qualquer local da Terra, mas sim pelo reconhecimento que a comunidade queira e saiba fazer”. O estudo científico do PG é certamente importante mas, sem um público sensibilizado, o PG simplesmente não existirá enquanto tal”.

Resulta claro do que foi dito, e é opinião generalizada dos investigadores da geologia ambiental e não só, a necessidade da divulgação do PG para o grande público e, muito em especial, para os jovens enquadrados em visitas de estudo de escolas de todos os níveis de ensino, é hoje consensual no domínio das Geociências. Ora, esta divulgação, normalmente feita após a classificação dos locais, poderia, aliás deveria, ser feita já durante os processo de estudo conducente à apresentação formal de propostas. A sensibilização parece, neste caso, muito mais eficaz a médio e longo prazo, porque é participada pelos próprios fruidores foi, talvez, o grande “motor” que fez surgir o projecto.

2. DESENVOLVIMENTO DO PROJECTO E MOTIVAÇÕES DE ORDEM GEOLÓGICA

Foi preocupação inicial juntar no projecto várias escolas e instituições públicas e autárquicas. e, com abrangência regional e temática, o Parque Natural da Arrábida (PNA), uma vez que a grande maioria dos locais que constituem georrecursos ambientais na Península de Setúbal se encontram na área geográfica do PNA, em grande parte geograficamente coincidente com os municípios de Sesimbra e de Setúbal.

As escolas beneficiaram da formação dos alunos e dos docentes, e as autarquias e o PNA de instrumentos de decisão com vista a um melhor ordenamento das respectivas áreas administrativas. Em última análise, e extrapolando, o benefício ultrapassa o âmbito da influência imediata dos intervenientes, e será destinado à própria natureza e à sociedade em geral.

A geologia e a geomorfologia da área abrangida pelos concelhos a estudar são muito dispares: a Sul (Sesimbra e Setúbal), é muito rica e importante do ponto de vista científico e didáctico, ou seja, são abundantes os georrecursos culturais; a Norte (Seixal e Barreiro) a geologia é, ou foi, importante enquanto recurso económico. No primeiro caso predominam ocorrências geológicas que permitem interpretar algumas páginas da história da Terra, a nível regional e, no segundo, as ocorrências permitem fazer compreender o papel da geologia no desenvolvimento (sustentado) da sociedade e o papel das possíveis consequências da intervenção do homem sobre a natureza, ou seja, a necessidade da exploração planeada e racional dos recursos naturais, de forma a minimizar os impactes ambientais.

Os estudos relacionados com a exploração económica de recursos geológicos abrange algumas áreas que se encontram actualmente em actividade e antigas explorações de recursos com importância económica, local, regional e/ou nacional, em determinados períodos da história do País. Refiram-se concretamente exemplos de património arqueológico industrial relacionados com a exploração de conglomerados (Brecha da Arrábida, pedreira do Jaspe, Setúbal), diatomitos (Amieira, Sesimbra), argilas (Quinta da Machada, Barreiro; herdade da Mesquita, Sesimbra) areias (Coima, Barreiro, Seixal) e metais (mercúrio, Coima e Barreiro; ouro, Adiça, Almada).

A sensibilização dos destinatários do projecto, os alunos e professores das diferentes escolas, para a necessidade de protecção de recursos naturais, nestes dois níveis de abordagem, constituem o principal objectivo do projecto.

3. OBJECTIVOS E METODOLOGIA

Os objectivos gerais do projecto enquadram-se nos do Programa Ciência Viva, ou seja, “contribuir para a melhoria das condições de aprendizagem de alunos dos ensinos básico e secundário, promovendo o ensino experimental das ciências”; além disso visa-se também a formação contínua e actualização de professores, a formação de cidadãos informados e conscientes, isto é, responsáveis. Assim, e de forma sintética, os objectivos gerais do projecto foram os seguintes:

- contribuir para a melhoria das condições de aprendizagem de alunos dos ensinos básico e secundário de concelhos da Península de Setúbal, promovendo o ensino experimental das Ciências da Terra;
- promover a interligação entre a escola e o meio e a investigação na área da Geologia através da formação de parcerias entre instituições de investigação científica, escolas, autarquias e instituições de conservação e defesa da natureza;
- motivar os alunos para a necessidade da protecção e da preservação do património natural, em harmonia com o desenvolvimento;
- sensibilizar os alunos e os pais para questões relacionadas com a valorização e conservação do património natural do meio envolvente (em particular no que respeita ao património geológico que é um património não renovável);
- proporcionar aos alunos um espírito de auto-confiança e de realização pessoal, ao participarem em projecto que terá impacto concreto na região onde vivem;
- valorizar a Geologia como disciplina indispensável à formação científica de base dos alunos dos ensinos básico e secundário;

- fomentar a participação activa dos pais no processo ensino-aprendizagem dos educandos e a consciência ecológica contribuindo para a formação de um cidadão responsável;
- fornecer às autarquias instrumentos de decisão para a classificação de geomonumentos e recomendações sobre a sua recuperação, quando se afigurar como necessário.

Como objectivos específicos podem enunciar-se:

- estabelecer a ligação entre os conteúdos abordados nos programas curriculares das disciplinas envolvidas e a prática de actividades experimentais que motivem e facilitem a compreensão daqueles conteúdos;
- utilizar as novas tecnologias de informação e comunicação (TIC) como suporte para um processo de ensino-aprendizagem dinâmico e interactivo;
- promover o conhecimento e utilização de cartas topográficas e geológicas e o reconhecimento da Península de Setúbal como fonte de recursos naturais (pedológicos, hidrogeológicos, de jazigos não metálicos, geomorfológicos, estruturais, paleogeográficos...);
- observar *in locu* a acção dos agentes externos de morfogénese terrestre;
- compreender a importância das informações fornecidas pelas rochas na reconstituição do passado da terra;
- relacionar os diversos elementos recolhidos nas saídas de campo de modo a perceber a evolução paleogeográfica da Península de Setúbal;
- incentivar nos alunos a aquisição de competências para seleccionar, interpretar e organizar a informação que lhes é fornecida ou de que necessitam;
- responder à diversidade de interesses dos alunos não abrangidos pelos conteúdos programáticos;
- promover a integração de conhecimentos e a aquisição de instrumentos de trabalho numa perspectiva de educação permanente;
- proporcionar a aquisição de métodos e instrumentos de trabalho fundamentais nas áreas essenciais do saber e do saber fazer, a transferência das aquisições educativas para situações concretamente experimentadas e a expressão de interesses e aptidões em domínios diversificados;
- concretizar actividades que promovam o desenvolvimento do espírito de iniciativa, de organização e de autonomia.

A metodologia seguida começou pelo estabelecimento de contactos com escolas dos ensinos básico e secundário da região onde foi apresentada a iniciativa e feito convite para a participação de alunos e docentes num projecto do Programa Ciência Viva. Simultaneamente foram contactados o Instituto de Conservação da Natureza, através do PNA e algumas associações locais de defesa do ambiente.

A estes contactos responderam seis escolas, a saber:

- a) Escola Secundária Alfredo da Silva, do Barreiro;
- b) Escola Secundária Secundária João de Barros, do Seixal;
- c) Escola EB2 Luísa Todi, de Setúbal;
- d) Escola Secundária Manuel Cargaleiro, do Seixal;
- e) Escola Básica 2º e 3º Ciclos Paulo da Gama, do Seixal;
- f) Escola Básica 2,3/S de Quinta do Conde, de Sesimbra.

Na sequência destas respostas, foram também contactadas as respectivas Câmaras Municipais (Barreiro, Seixal, Sesimbra e Setúbal) às quais se apresentou a iniciativa e se pediu colaboração no sentido de apoiar as escolas de cada município, em particular no que respeita a disponibilização de transporte para a realização de visitas de estudo.

O PNA com dois técnicos e o Núcleo de Espeleologia da Costa Azul (NECA), uma associação de defesa da natureza da região de Sesimbra, com 4 monitores, foram as restantes entidades que aceitaram o convite.

No total, as respostas obtidas permitiram constituir uma equipa envolvendo um total de 29 formadores (docentes e investigadores das escolas e do CIGA, técnicos das autarquias e PNA e monitores do NECA) e cerca de 600 alunos.

No seguimento deste processo, o CIGA, como instituição coordenadora, apresentou ao Programa Ciência Viva uma proposta de projecto intitulado “Estudo e classificação dos georrecursos ambientais de Península de Setúbal”. Esta proposta foi aprovada estando previsto o seu desenvolvimento durante os anos lectivos de 2000/01 e 2001/02.

4. PLANEAMENTO E DESENVOLVIMENTO DE ACTIVIDADES

O projecto reúne uma grande diversidade de instituições e beneficiários num propósito comum, cuja articulação é complexa. A interacção entre os intervenientes e a organização dos trabalhos encontra-se sumariamente delineada na figura 1.

324

O primeiro passo dado no sentido do planeamento das actividades a desenvolver foi o de definir locais na Península de Setúbal com interesse do ponto de vista geológico. A importância relativa de cada um dos locais foi hierarquizada em função do interesse científico, pedagógico e cultural e da necessidade de protecção. Tendo em atenção esta hierarquização, e os diferentes graus de ensino dos estudantes envolvidos no projecto, foi atribuída a cada escola a tarefa, ou conjunto de tarefas, a executar com vista ao estudo e descrição de cada um dos locais. Na figura 2 estão assinalados os locais definidos pelo conjunto da equipa de formadores como sendo os de maior interesse.

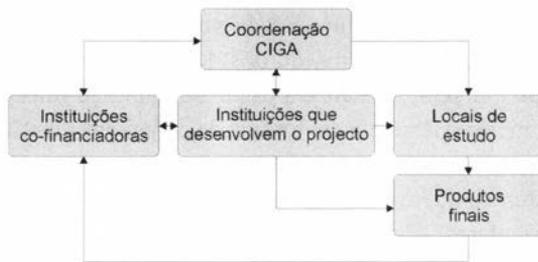


Fig. 1 – Organograma do Projecto.

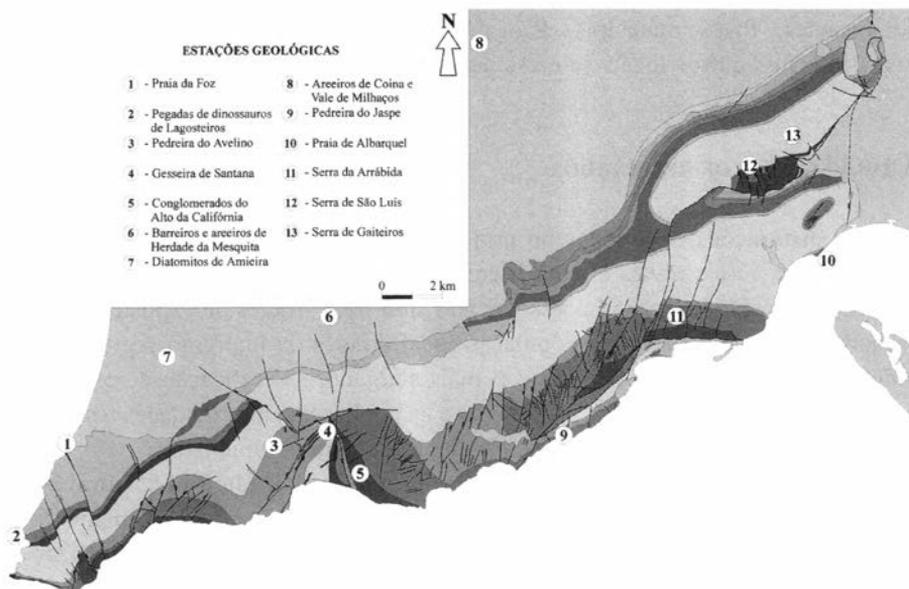


Fig. 2 – Locais de interesse geológico estudados no projecto

Utilizando as metodologias próprias da Geologia, os alunos envolvidos no projecto, com o apoio dos docentes, procederam à recolha de informação e de amostras de campo nos vários locais de interesse geológico pré-definidos. Destes trabalhos resultaram relatórios pormenorizados de cada um dos locais para incorporação em suporte multimédia e propostas de cartazes explicativos para colocação nos vários locais estudados. Estes estudos tiveram como finalidade dotar as autarquias da região, o PNA e outras entidades competentes, de instrumentos de carácter científico e pedagógico, com recomendações de carácter conservacionista, que suportem futuras decisões sobre a classificação de geomonumentos e a criação de itinerários naturais.

A primeira fase de desenvolvimento do projecto, antes das visitas de estudo com os alunos, iniciou-se com formação dos docentes das várias escolas, através de visitas de campo a diversos locais e a partir das quais se seleccionaram aqueles que apresentavam maior relevância em termos de conteúdos científico-pedagógicos, para eventual classificação. Foram também definidos, em pormenor, os estudos a efectuar com os alunos, quer no campo, quer no laboratório, a sua integração com os conteúdos curriculares, e as metodologias e estratégias a implementar.

A cada escola, em função do perfil dos alunos envolvidos (desde o 7º ano de escolaridade, até ao 12º, passando pelo 10º ano e Clubes de Ciência), foi atribuído um local para estudo aprofundado; sobre o mesmo, produzem a informação necessária para apresentação formal de propostas de classificação desses locais às entidades competentes – PNA e municípios. Para além destes estudos de pormenor, cada escola visita todos os outros locais seleccionados para estudo ao longo do projecto.

5. DIVULGAÇÃO DE RESULTADOS

As instituições envolvidas no projecto têm promovido a divulgação destas actividades a vários níveis e para diferentes públicos.

A divulgação nas próprias escolas tem sido feita através de exposições e dos Jornais de Escola, passa pela população local através da imprensa regional e de boletins municipais e termina, a nível mais alargado, na realização de excursões no âmbito do programa Geologia no Verão e na publicação de actividades/resultados na internet (páginas/sites do CIGA, escolas e Câmaras Municipais).

A divulgação do projecto para público mais especializado foi feita através da participação da equipa em fóruns Ciência Viva e pela apresentação de comunicações em reuniões científicas. Aguarda-se ainda a possibilidade de promover a realização de uma conferência acompanhada de exposição, com convites aos *media*, durante a qual será feita a divulgação final de todos os resultados obtidos.

Os principais resultados obtidos resumem-se do seguinte modo:

- a) apresentação de propostas de classificação de Património Geológico, algumas das quais foram já entregues à Associação ProGeo e às câmaras municipais de Sesimbra e de Setúbal (Praia de Foz da Fonte, Diatomitos de Amieira, Gesseira de Santana, Conglomerados Intraformacionais do Alto da Califórnia, Pedreira do Jaspe/Brecha da Arrábida e Cortes Geológicos de Paul Choffat na Serra da Arrábida) (em anexo apresenta-se como exemplo o texto referente à proposta de classificação de um destes locais);
- b) elaboração de protótipos de leitores verticais e de paisagem: em curso, protótipos para a Gesseira de Santana (Sesimbra);
- c) elaboração de itinerários geológicos ligando os locais mais relevantes, com indicações de outros aspectos gerais a observar no percurso, em particular

- os geomorfológicos; o PNA elaborará um documento final, multidisciplinar, para o grande público;
- d) produção de guiões de visitas de estudo, documentos de suporte destinados essencialmente aos professores que queiram realizar visitas de estudo com os seus alunos à região da Arrábida;
 - e) produção de protocolos de actividades experimentais para o ensino, destinados à realização de trabalhos laboratoriais, subsequentes às visitas de campo;
 - f) produção de materiais didácticos para a internet (consultáveis em <http://www.ciga.fct.unl.pt>).
 - g) produção de DVD-ROM com:
 - visitas virtuais (recurso a vídeo, QTVR's, imagens 3D);
 - localização, descrição e ilustração dos locais estudados;
 - actividades experimentais desenvolvidas pelos alunos.

6. CONCLUSÕES

As vantagens da concretização de projectos deste âmbito são inquestionáveis, podendo salientar-se como conclusões principais da experiência tida pela equipa do CIGA em todo este processo o seguinte:

- 1 – Em processo de classificação e de divulgação de Património Geológico (Património Natural de forma mais lata), parece inequivocamente vantajosa, a todos os níveis, uma participação abrangente, em particular com os mais jovens;
- 2 – Estes sentem-se mais próximos do meio que os envolve, reconhecem directamente a necessidade de preservação do património ligado à história da Terra e adquirem competências na área da Geologia; alguns mesmo, despertam para uma vocação que desconheciam..... (figura 3). A generalidade fica melhor formado como cidadão, porque mais informado e, necessariamente, porque mais consciente e sociável. Desta forma projectos deste cariz dão contributo real para a “educação para a cidadania”, um desígnio europeu da última década;
- 3 – Os docentes têm a oportunidade de melhorar o desempenho científico e pedagógico e produzem materiais que serão úteis, para eles e para outros professores de Ciências da Natureza; não se deve escamotear a realidade de grande parte destes docentes ter formação de base na área da Biologia e, assim, com preparação extensiva particularmente no campo, onde a “geologia se encontra”, ficarão melhor preparados e motivados a deslocarem-se com os alunos para o terreno;

- 4 – As instituições competentes ficam dotadas de informação que serve de apoio, e mesmo de instrumento, para a tomada de decisões futuras, devidamente fundamentadas;
- 5 – O público em geral fica dotado de informação que de outra forma estaria “guardada” para os especialistas;
- 6 – Sem prejuízo de iniciativas já postas em marcha, recomenda-se (em género de desafio), na elaboração de propostas de classificação de PG, a utilização de fórmula próxima desta, juntando sinergias de Universidades, Escolas, Autarquias e ICN.

Um esquema de colaboração deste tipo é cada vez mais necessário para o desenvolvimento sustentado da sociedade.

As escolas e centros de investigação concretizam o seu papel institucional e social ao assumirem as responsabilidades de formação e de criação de novo conhecimento.

Os professores preenchem integralmente a missão de formadores, como depositários do conhecimento e do saber fazer e tem oportunidade única de transmitir aos alunos, da forma mais correcta, estimulante e gratificante, ensinamentos de geologia no seu laboratório natural, o campo.

Os alunos, principais destinatários do projecto, beneficiam de uma formação que os meios tradicionais de ensino não possibilitam; através do ensino experimental das Ciências da Terra adquirem competências difíceis de alcançar na sala de aula e desenvolvem um espírito crítico ao poderem ser intervenientes num processo de classificação de património natural, processo até hoje exclusivo da comunidade científica.

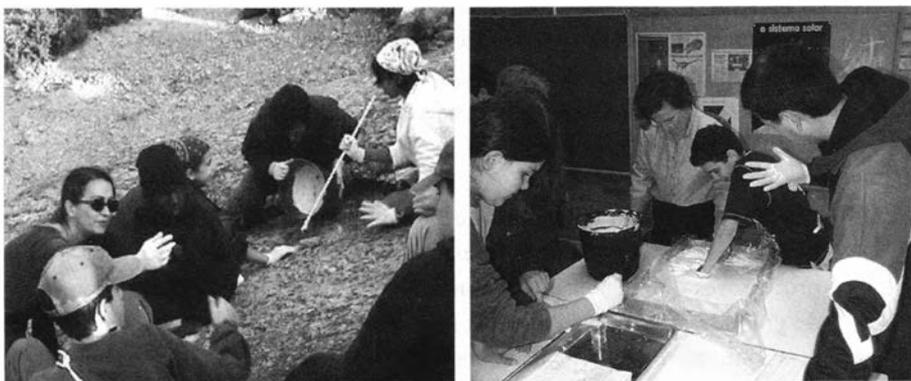


Fig. 3 – Duas fases de trabalho relacionadas com o estudo de um dos locais: recolha de informação no campo (à esquerda) e experimentação no laboratório (à direita).

AGRADECIMENTOS

O CIGA, como instituição coordenadora, exprime sinceros agradecimentos a todos os docentes das escolas participantes, sem os quais não seria possível desenvolver esta iniciativa e realça o enorme entusiasmo e empenho evidenciados pelos colegas Alberto Monteiro, Alda Mendes, António Bosco Fernandes, Dora Osório, Felicidade Rosa, Joaquim Lopes, Joaquina Mendonça, José Mariano Fonseca, Julieta Fernandes, Manuel Lima, Maria Leonor Ramalho, Maria Teresa Marques, Patrícia Rodrigues e Pedro Pires.

À Sr^a Dr^a Rosália Vargas e à Sr^a Prof^a Dr^a Ana Noronha, os rostos visíveis do Programa Ciência Viva, agradecemos o interesse sempre manifestado pelo trabalho desenvolvido, a excelência dos contactos criados e a confiança com que nos têm distinguido; ao Programa em si agradecemos o apoio financeiro que permitiu desenvolver o Projecto em que nos empenhámos.

Às Câmaras Municipais do Barreiro, do Seixal, de Sesimbra e de Setúbal e ao Parque Natural da Arrábida, agradecemos o apoio logístico e financeiro e a disponibilização de técnicos indispensáveis à concretização de actividades no âmbito do projecto.

BIBLIOGRAFIA

- CARVALHO, A. G. (1998) – Geomonumentos – Uma reflexão sobre a sua classificação e enquadramento num projecto alargado de defesa e valorização do Património Natural. *Com. Inst. Geol. Min.*, Lisboa, t. 84, fasc. 2, pp. G3-G5.
- HARLEY, M. (1994) – The RIGS (Regionally Important Geological/Geomorphological Sites) challenge – involving local volunteers in conserving England's geological heritage. In O'Halloran, D.; Green, C.; Harley, M.; Stanley, M. & Knill, J. (eds), *Geological and Landscape Conservation. Geol. Soc.*, London, pp. 313-317.
- KULLBERG, J. C. (2000) – Evolução tectónica mesozóica da Bacia Lusitaniana. *Tese de doutoramento, Univ. Nova Lisboa*, 361 p.
- KULLBERG, J. C. & MONTEIRO, C. (2000) – Elaboração da carta de caracterização dos valores geológicos da Arrábida. Um contributo para o Plano de Ordenamento do Parque Natural da Arrábida. Relatório interno CIGA/MA/ICN/PNA, 88 p.
- KULLBERG, J. C., OLÓRIZ, F., MARQUES, B., ROCHA, R. B. & CAETANO, P. S. (2001) – Flat-pebble conglomerates: a local marker for Early Jurassic seismicity to syn-rift tectonics in the Sesimbra area (Lusitanian Basin, Portugal). *Sedimentary Geology*, Amsterdam, vol. 139, pp. 49-70.
- KULLBERG, J. C., ROCHA, R. B. & MONTEIRO, C. (1995) – Evolução diapírica: modelo cinemático baseado no estudo da Cova da Mijona. *Mem. Museu Lab. Min. Geol. Fac. Ciências Univ. Porto*, nº 4, pp. 259-261.
- KULLBERG, M. C., KULLBERG, J. C. & TERRINHA, P. (2000) – Tectónica da Cadeia da Arrábida. In Tectónica das regiões de Sintra e Arrábida, *Mem. Geociências, Museu Nac. Hist. Nat., Univ. Lisboa*, nº 2, pp. 35-84.

- LIMA, F. & GOMES, C. L. (1999) – Classificação e valorização sustentável de ocorrências geológicas com importância patrimonial no NW do Minho. *In Actas I Seminário sobre o Património Geológico Português, Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 6 p.
- MARQUES, B., OLORIZ, F., KULLBERG, J. C., ROCHA, R. B. & CAETANO, P. (1994) – Genetic interpretation of the Lower Toarcian flat pebble conglomerates of Sesimbra (Portugal) in the context of the Lusitanian Basin's structuration. *4th Int. Cong. Jurassic Stratigraphy Geology*, Abstracts, Mendoza, p. 29
- PIMENTEL, N. L. (1999) – A Ponta do Telheiro (Costa Vicentina, SW de Portugal) – ideias para a valorização de um Geomonumento. *In Actas I Seminário sobre o Património Geológico Português, Inst. Geol. Min.*, Lisboa, 5 p.
- RIBEIRO, A., KULLBERG, M. C., KULLBERG, J. C., MANUPPELLA, G. & PHIPPS, S. (1990) – A review of Alpine Tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, Amsterdam, nº 184, pp. 357-366.
- STURM, B. (1994) – The geotope concept: geological nature conservation by town and country planning. *In O'Halloran, D.; Green, C.; Harley, M.; Stanley, M. & Knill, J. (eds), Geological and Landscape Conservation, Geol. Soc., London, pp. 27-31.*

ANEXO

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO

Conglomerados Intraformacionais do Alto da Califórnia

LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Distrito de Setúbal, Concelho de Sesimbra, Freguesia do Castelo. Acesso feito pela EN585 e caminho "terra batida". Coordenadas UTM: 29SMC 9225 5537; cota do terreno: 200 m.

Povoação mais próxima: Sesimbra (500 m); cidade mais próxima: Setúbal (20 km).

Acessibilidade fácil. Distância a percorrer até ao afloramento: autocarro: 600m; automóvel: 300m; viatura TT: 20m

Magnitude do local: < 0,1 ha.

Condições de observação: boas

Vulnerabilidade: baixa

CARACTERÍSTICAS QUE JUSTIFICAM A PROPOSTA

Além da importância científica, outros factos justificam a proposta deste local como Monumento Natural.

O local não se encontra sob qualquer tipo de protecção. A breve prazo espera-se que venha a ser integrado na área geográfica do Parque Natural da Arrábida (proposta de Plano de Ordenamento do PNA). No Plano Director Municipal da Câmara Municipal de Sesimbra o local encontra-se incluído numa área classificada como "espaço para equipamentos".

O local carece de medidas de beneficiação, nomeadamente de remoção de entulhos, demarcação de áreas de acesso e de implementação urgente de estatuto de protecção específica (previsto naquela proposta de ordenamento).

TIPO DE INTERESSE

O interesse do local pode ser definido pelo seu conteúdo, pela possível utilização e pela sua influência a diversos níveis:

Pelo conteúdo:

Estratigráfico, petrológico, sedimentológico e tectónico – alto

Geomorfológico – médio

Paleontológico – baixo

Pela possível utilização:

Turística – média

Científica e didáctica – alta

Pela influência a nível:

Local, regional, nacional e internacional – alto

Como se conclui, o local apresenta elevado interesse sob vários aspectos:

- 1 –Turístico: pode observar-se uma vista sobre a vila de Sesimbra, a baía e o castelo numa perspectiva rara e de grande beleza.
- 2 –Didáctico: a raridade dos depósitos em questão, a variedade de estruturas observáveis e a qualidade da exposição, conferem-lhe um grande interesse em particular para a realização de estudos e compreensão de processos geológicos, nas áreas da Sedimentologia, Geologia Estrutural, Estratigrafia, Tectónica e Paleogeografia. Dada a sua complexidade, os alunos que melhor partido poderão tirar do afloramento são os do ensino superior.
- 3 –Científico: os conglomerados intraformacionais do Alto da Califórnia constituem um tipo de depósitos de extrema raridade a nível mundial. Para além disso, dadas as estruturas sedimentares e tectónicas muito bem expostas, constituem dos poucos depósitos congéneres que permitem associar a sua génese a paleo-sismicidade contemporânea de episódio de rifting. A uma escala regional, é possível correlacioná-los com momento importante na evolução da Bacia Lusitaniana marcado, nos sectores mais setentrionais, pela ocorrência de outro tipo peculiar de depósitos do Toarciano, os “calcários em plaquetas”.

Estes depósitos do Alto da Califórnia foram objecto de publicação de vários artigos científicos, nomeadamente na revista *Sedimentary Geology* (KULLBERG *et al.*, 2001).

LOCALIZAÇÃO GEOLÓGICA

Na região de Sesimbra estes conglomerados afloram desde o Alto da Califórnia (onde se encontram melhor representados) até Cabo de Ares, em exposição relativamente descontínua. Existe afloramento equivalente, na área da Cova da Mijona, onde os conglomerados intraformacionais têm ocorrência menos expressiva.

DESCRIÇÃO GEOLÓGICA SUMÁRIA

Os depósitos são detríticos carbonatados, de plataforma interna restrita com inúmeras evidências de estruturas de deformação sinsedimentar associadas à evolução do rift.

A litologia calcária predominante corresponde a Mudstones e Wackestones bioclásticos, no seio dos quais se encontram os níveis de conglomerados intraformacionais designados por “Flat-pebble conglomerates”.

Nos níveis inferior e superior foram recolhidos Braquiopodes e Amonites (das raras conhecidas na Arrábida) que permitiram datar a unidade. Na unidade em questão nunca foi observada macrofauna mas são conhecidos vários grupos de microfósseis nomeadamente Foraminíferos, Ostracodos, Algas, e Anelídeos.

Em termos de fracturação, observa-se presença de estruturas de deformação frágil tardia (fendas de tracção e estilólitos) associadas à formação do diapiro de Sesimbra (Cretácico sup./Paleogénico) e à tectónica compressiva miocénica. Outras estruturas menores presentes são: falhas normais sinsedimentares de dimensão mesoscópica; planos de escorregamento sinsedimentares, intra-camada, relativamente penetrativos; e disrupção de sedimentos semi-litificados.

Uma coluna litostratigráfica de pormenor destes afloramentos e um esquema da sucessão dos processos envolvidos na formação dos conglomerados intraformacionais estão figurados *in* J. C. KULLBERG *et al.* (2001, figs. 2 e 14)

CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES LÍTICAS CARBONATADAS NA REGIÃO DE COIMBRA

A. OLIVEIRA TAVARES ¹

PALAVRAS-CHAVE: unidades líticas, rochas carbonatadas, caracterização *in situ*, propriedades físicas, instabilidade.

KEY WORDS: lithological units, carbonate rocks, *in situ* characterization, physical properties, instability.

RESUMO

Na região de Coimbra estão representadas unidades litostratigráficas Jurássicas, predominantemente carbonatadas, que têm constituído o suporte da ocupação antrópica. O levantamento cartográfico, a caracterização do estado *in situ*, a determinação das propriedades físicas e mecânicas e o registo das manifestações de instabilidade permitiram individualizar oito unidades líticas, no âmbito da geologia de engenharia. Com este estudo faz-se a sistematização, para cada unidade, das características e propriedades bem como dos processos relacionados com a geodinâmica externa.

ABSTRACT: Characterization of the carbonate lithological units in the region of Coimbra

Lithostratigraphic Jurassic units are recognized in Coimbra region. These carbonate units have been the support of the anthropogenic occupation. The cartography of pelitic and calco-dolostones or marl-limestones alternation areas, *in situ* characterization, physical and mechanical properties analysis made possible the identification of eight lithological units with engineering geology relevance.

¹ Departamento de Ciências da Terra, FCTUC; Centro de Geociências da Univ. de Coimbra; Largo Marquês de Pombal, 3000-272 Coimbra; atavares@ci.uc.pt.

The instability processes evaluation and description shown the connection with the identified units. This study describes the lithological units and the related instability processes.

ENQUADRAMENTO

Na região de Coimbra aparecem representadas unidades litostratigráficas do Jurássico Inferior a Médio com fácies predominantemente carbonatada e que têm sido objecto de numerosos estudos entre os quais os produzidos por P. CHOFFAT (1903/1904, 1905), G. S. CARVALHO (1949, 1951), C. CHARNAY (1962), J. ROSSET, MOUTERDE & ROCHA (1975), F. Soares, MARQUES & ROCHA (1985), L. DUARTE (1995), L. DUARTE & SOARES (2002).

Estas unidades constituíram parcialmente o suporte físico da ocupação tradicional e forneceram muito dos recursos minerais utilizados na construção antrópica (SOARES, 1990; TAVARES & SOARES, 2002). Nas últimas décadas a relevância destas unidades, enquanto espaço preferencial de expansão e consolidação urbana, tem aumentado, assim como, têm sido envolvidas na construção de importantes equipamentos e infra-estruturas viárias.

Para um melhor conhecimento destas unidades estabeleceu-se um trabalho de cartografia, uma metodologia de caracterização *in situ* e avaliação das propriedades físicas e mecânicas o que possibilitou a distinção de oito unidades líticas. Estas unidades, do âmbito da geologia da engenharia e baseadas no critério litogenético, constituem domínios de homogeneidade relativamente à composição, textura e estrutura, mas em que são variáveis as características de estado *in situ*, e as propriedades físicas e mecânicas são representadas por valores médios.

Na observação das unidades líticas ressaltaram processos de instabilidade relacionados com a geodinâmica externa na dependência das características *in situ*, das propriedades físicas, para além do enquadramento morfológico, estrutural ou hidrológico.

METODOLOGIA DE ANÁLISE

A identificação e descrição das unidades líticas baseiam-se nos pressupostos definidos em IAEG (1981), ISRM (1981a) e ISRM (1981b) e incluem a caracterização da natureza e estrutura lítica com quantificação da espessura dos termos integrantes, descrição dos aspectos texturais e composicionais relevantes. No estado *in situ* avalia-se a resposta à percussão, a resistência à compressão simples, o estado de alteração e quantifica-se a distribuição e características geométricas das descontinuidades. Na análise física e mecânica avalia-se a

resistência à carga pontual, a porosidade e o índice de vazios nos estratos carbonatados. Aspecto determinante constituiu a avaliação do comportamento decisivo dos termos pelíticos através da obtenção do índice de plasticidade, expansão livre, da superfície específica e mineralogia da fracção argilosa; pontualmente a partir destes materiais determinou-se o valor médio da coesão e ângulo de atrito. Os valores de caracterização e amostragem baseam-se num volume representativo traduzido por perfis com espessura mínima de 3m.

A descrição dos processos de instabilidade relacionados com os movimentos de massa baseia-se na metodologia apresentada em D. J. VARNES (1978), D. CRUDEN & VARNES (1996), R. DIKAU *et al.* (1996) e R. FANNIN & ROLLERSON, (1993), sendo identificadas mais de duzentas manifestações em diferentes estados e actividades de acordo com UNESCO/WPWL (1993).

DESCRIÇÃO DAS UNIDADES

Na figura 1 aparece representada a expressão cartográfica das unidades líticas objecto de descrição, as unidades de substrato enquadrantes, assim como as unidades superficiais. A representação das unidades faz-se segundo um corredor aproximadamente meridiano, sendo que a expressão é frequentemente limitada por elementos tectónicos maiores.

De acordo com a natureza e estrutura lítica foram estabelecidos dois agrupamentos de unidades cujas características *in situ* e propriedades físicas e mecânicas aparecem sintetizadas na Tabela I e Tabela II. Assim, na base, aparecem representadas duas unidades, genericamente pelíticas e calco-dolomíticas, a que se sobrepõem seis unidades calco-margosas marcadas pelo carácter alternante entre fácies.

UNIDADES PELÍTICAS E CALCO-DOLOMÍTICAS

Engloba as unidades com a expressão cartográfica representada na figura 1: (I) Arenitos, pelitos, dolomias e calcários dolomíticos e (II) Calcários dolomíticos e margosos.

(I) Esta unidade representada por arenitos médios e grosseiros, pelitos, dolomias e calcários dolomíticos e é considerada equivalente às Camadas de Pereiros de P. CHOFFAT (1905), G. S. CARVALHO (1949 e 1951) e F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985) ou ainda às megasequências $B_2+C_1+C_2$ definidas por C. PALAIN (1975) para o Grés de Silves.

Com uma expressão topográfica geralmente deprimida, aparece representada a Sul de Coimbra como uma mancha contínua em que a espessura apresenta um valor máximo de 60 ± 10 m; a Norte do Mondego a expressão cartográfica é condicionada pela tectónica, sendo que, a espessura máxima deve rondar 50 ± 10 m.

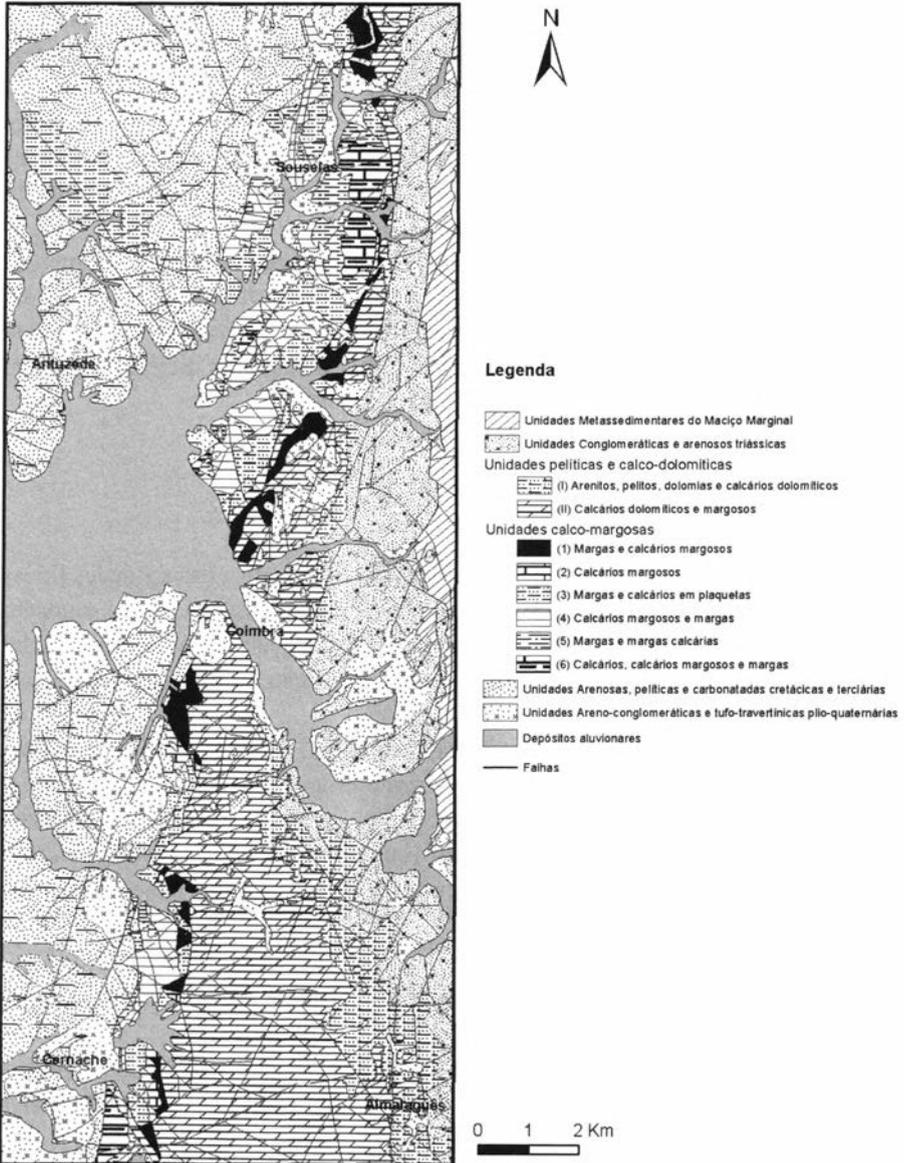


Fig. 1 – Expressão cartográfica das unidades líticas carbonatadas, unidades enquadrantes de substrato e superficiais e dos elementos tectónicos.

Marcada pela alternância entre termos carbonatados e termos pelíticos laminados com espessuras diversas; verifica-se uma maior concentração dos primeiros para o topo da unidade e o aparecimento na base de termos arenosos médios a grosseiros carbonatados; salienta-se no conjunto da unidade, a espessura

dos termos pelíticos com valores <6cm no topo e entre 60 e 180cm na zona intermédia; de realçar ainda, que 70% dos estratos carbonatados apresentam uma espessura ≤ 20 cm.

O levantamento de 42 perfis mostra que: os termos pelíticos aparecem referenciados em todos os perfis à que corresponde uma representação volumétrica média de 52%; os termos calcários dolomíticos, dolomias e calcários margosos representam volumetricamente cerca de 40%; os arenitos apareceram representados em somente em 20% dos perfis a que corresponde uma expressão volumétrica de 8%.

Na Tabela 1 aparecem sintetizadas as características de estado *in situ* e as propriedades físicas e mecânicas obtidas em ensaios de campo e laboratório. Esta unidade apresenta uma elevada susceptibilidade aos processos de instabilidade, sendo de realçar os deslizamentos rotacionais, com diferentes estados de actividade, pelos elevados volumes envolvidos.

(II) A unidade representada pelos “Calcários dolomíticos e margosos” tem uma elevada representação cartográfica na área em estudo, podendo localmente, e em especial a norte do Mondego, ver-se afectada pelo rejogo tectónico; atinge uma espessura máxima de cerca de 120 ± 20 m. É considerada equivalente às camadas de calcários dolomíticos de G. S. CARVALHO (1951), à Formação Camadas de Coimbra (s.s.) + Camadas de S. Miguel de F. Soares, MARQUES & ROCHA (1985) ou à Formação de Coimbra de L. DUARTE & SOARES (2002).

Sendo uma unidade predominantemente carbonatada, a análise de 36 perfis permitiu encontrar a seguinte representação volumétrica para os diferentes termos: calcários dolomíticos amarelados e calcários margosos bejes, rosados ou cinzentos, $75 \pm 5\%$; brechas carbonatadas $5 \pm 2\%$; corpos pelíticos com tons variegados, $20 \pm 5\%$. A base da unidade (primeiros 25 ± 5 m) é caracterizada pelo carácter dolomítico mais homogéneo, pela presença de bancadas métricas brechóides e ainda por corpos pelíticos localmente espessos; o topo da unidade (30 ± 10 m) é caracterizado pelo aparecimento de termos carbonatados margosos, granulometricamente diferenciados, alternando com termos pelíticos.

Apresenta formas de carsificação com grande desenvolvimento lateral e em profundidade, parciais ou totalmente preenchidas, com diferentes materiais (TAVARES, 1999) a que se associam frequentemente processos de desprendimento de blocos com volumes $> 100\text{m}^3$.

A quantificação da espessura dos estratos carbonatados permite classificar a unidade de espessa a pouco espessa, com preponderância dos menores valores para o topo da unidade; os termos pelíticos apresentam desde termos centimétricos a corpos com 5m de espessura e grande continuidade lateral.

Na Tabela 1 aparecem sintetizadas as características de estado *in situ* e as propriedades físicas e mecânicas.

Tabela I – Características de estado *in situ* e as propriedades físicas e mecânicas das unidades pelíticas e calco-dolomíticas

Unidades	Organização dos termos líticos	Outras características	Espessura média dos estratos	Espessura máxima dos termos pelíticos (cm)	Resposta à percussão	Grau de alteração	Espaçamento médio das discontinuidades	Processos de instabilidade característicos		
Arenitos, pelitos, dolomias e calcários dolomíticos	Heterogeneidade na sequência litica e alternância de estratos	Presença de níveis gipsíferos	L ₄₅	180	Muito a pouco compacto	W ₁₂ a W ₃	F ₃₄₅	Deslizamentos rotacionais, fluxos, expansão lateral e desprendimentos		
Calcários dolomíticos e margosos	Heterogeneidade na sequência litica, parcial alternância de estratos	Carsificação	L ₂₃₄	500	Muito a compacto	W ₁₂ a W ₃	F ₂₃	Desprendimentos e ocasionais deslizamentos translacionais		
Unidades	Resistência à compressão uniaxial dos arenitos e calcários	Porosidade n (%) e Índice de vazios Iv (%)	Índice de plasticidade (%)	Superfície específica (m ² /g)	Expandibilidade livre (%)	% CaCO ₃	Mineralogia argilosa		Coesão efectiva (KPa/cm ²)	Ângulo de atrito (°)
Estratos carbonatados			Níveis pelíticos							
Arenitos, pelitos, dolomias e calcários dolomíticos	S23	-	5,1 a 15,8	73,4 a 150,7	6,3 a 17,1	7,6 a 51,0	Ilite, caulinite, esmectite, clorite e vermiculite		25	28
Calcários dolomíticos e margosos	S23	5,7 a 27,2 e 1,3 a 12,9	5,5 a 12,3	46,0 a 69,1	3,4 a 7,3	14,4 a 39,9	Ilite e caulinite		-	-

UNIDADES CALCO-MARGOSAS

Representadas por seis unidades líticas diferenciadas que mantêm em comum o carácter alternante entre as fácies margosa e calcária, embora com representatividade volumétrica diferente. Apresentam no conjunto uma espessura aproximada de 300m, com expressão cartográfica diversa e frequentemente marcada pela imposição tectónica.

338

(1) A unidade litica “Margas e calcários margosos” apresenta uma expressão superficial limitada e uma espessura máxima rondando 50m.

Equivalente à unidade Margas de Eiras de F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985) do Carixiano-Domeriano inferior a médio (?), ou à Formação de Vale das Fontes de L. DUARTE & SOARES (2002).

Constituída por margas, frequentemente concrecionadas, margas calcárias e pelitos alternando com calcários margosos e bioclásticos de tons esbranquiçados, cinzentos ou azulados representando esta última fácies cerca de 30% do volume da unidade. Este carácter alternante genérico apresenta, contudo, pólos mais

carbonatados função da maior espessura dos estratos calcários, presença de margas calcárias ou de concreções carbonatadas. Os estratos calcários apresentam-se pouco espessos com valores médios entre 10 e 12cm. Os corpos margosos e pelíticos podem atingir valores de 2,5m de espessura organizados em níveis milimétricos ou estratos decimétricos.

São observadas formas de carsificação profundas, preenchidas por materiais gresosos diversos, frequentemente associadas a zonas de fracturação intensa.

Na Tabela II aparecem representadas as características de estado *in situ*, as propriedades físicas e mecânicas da unidade, bem como a diversidade de processos de instabilidade, predominantemente activos e inactivos latentes e envolvendo volumes muito diferenciados.

(2) A unidade “Calcários margosos” apresenta uma espessura máxima de 20m e limitada expressão cartográfica de acordo com a figura 1. Considerada equivalente aos Calcários margosos do Loreto de F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985) ou à Formação de Leme de L. DUARTE & SOARES (2002) ou representando os calcários azuis compactos com fractura esquirolosa de C. CHARNEY (1962) do Domeriano superior.

A unidade é representada por calcários margosos e calcários bioclásticos com tons cinzentos, rosados ou bejes e ainda por níveis margosos, localmente concrecionados, com tons acinzentados, negros ou amarelados. O carácter alternante entre bancadas carbonatadas espessas (localmente >200cm) e níveis margosos (centimétricos a 40cm) revelam uma representação volumétrica média de $85\pm 5\%$ para os calcários e $15\pm 5\%$ para as margas, sendo que a fácies margosa pode atingir 30% no topo da unidade.

São observados frequentes aspectos de dissolução preenchidos por recristalização de calcite; localmente observam-se concentrações férricas nos calcários e nas margas concrecionadas.

Os estratos calcários apresentam espessura dominante e espaçamento entre descontinuidades entre 20 e 60cm, e a que corresponde uma elevada continuidade, com abertura muito estreita a apertada para os planos de descontinuidade. Estas características e outras de estado *in situ*, assim como as propriedades físicas e mecânicas transparecem na Tabela II.

(3) A unidade referenciada na figura 1 por “Margas e calcários em plaquetas” tem uma expressão cartográfica limitada e atinge uma espessura máxima estimada de 50m. Considerada equivalente à base da unidade Margas e Margo-Calcários de Adémia de F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985) ou aos Margo-calcários com fauna *Leptaena* + Calcários nodulosos em plaquetas + Margas e Calcários margosos com *Hildaites* e *Hildceras* (p.p.) de L. DUARTE & SOARES (2002), é marcada pela heterogeneidade volumétrica da alternância entre os termos carbonatados e os termos margosos.

Relativamente às unidades subjacente e suprajacente individualiza-se por apresentar no conjunto um carácter alternante mais marcado e no qual a representação volumétrica margosa, baseada em 44 perfis, tem um valores médios de 65%.

Na base da unidade a fácies margosa, finamente laminada, é dominante a que se associam concreções carbonatadas; para o topo os conjuntos margosos podem atingir espessuras de 200cm. Os calcários com granulometria média a fina, com pontuações fêrricas e piritosas, apresentam espessuras de estratos com claro domínio dos valores ≤ 6 cm.

As características de estado *in situ* variam em função dos termos constituintes, sendo que: na base da unidade são os termos margosos e, nomeadamente a fracção argilosa, que determinam o comportamento; no volume intermédio é o carácter alternante entre materiais com diferente competências na qual os estratos carbonatados apresentam uma blocometria tabular muito compartimentada; no topo é determinante o carácter mais carbonatado dos termos margosos e a maior espessura dos termos carbonatados. Na Tabela II aparecem referenciadas as características e as propriedades mecânicas.

(4) A unidade lítica “Calcários margosos e margas” apresenta um espessura máxima na área de estudo de 35m, sendo topograficamente bem referenciadas pelas colinas em que a forma é determinada pelo pendor dos estratos.

A representação cartográfica é descontínua e marcada pelos acidentes tectónicos. Considerada em parte equivalente à unidade Margas e Margo-Calcários de Adémia de F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985) ou às Margas e Calcários margosos com *Hildaites* e *Hildceras* (p.p.) de L. DUARTE & SOARES (2002).

Unidade alternante calco-margosa em que a representação dos calcários, a partir da análise de 33 perfis, se revela dominante com uma expressão volumétrica de cerca de 75% e em que os estratos são mais espessos relativamente às unidades enquadrantes. Constituída por calcários margosos cinzentos e brancos, com patine de alteração, e por conjuntos margosos e margo-calcários com tons cinzentos, amarelados, acastanhados e esverdeados.

340

Os termos carbonatados organizam-se em bancadas que podem atingir 200cm de espessura e alternam com níveis margosos laminados centimétricos ou com conjuntos que podem atingir 160cm. Na Tabela II aparecem representadas as características de estados *in situ* bem como as características obtidas em ensaios de campo e laboratoriais.

(5) A unidade lítica “Margas calcárias e calcários” tem uma reduzida expressão cartográfica, uma espessura máxima aproximada de 60m, sendo facilmente referenciada pelas formas de erosão hídrica sob a forma de sulcos e ravinas.

Considerada equivalente à parte superior das Margas e Margo-Calcários de Adémia de F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985), e às Margas e calcários margosos com bioconstruções de espongiários + Margas e margas calcárias com braquiópodes de L. DUARTE & SOARES (2002).

Constituída por margas calcárias, cinzentas ou amareladas, frequentemente com aspecto concrecionado, alternando com calcários ou calcários margosos cinzentos ou esbranquiçados. A observação de 19 perfis fez salientar o domínio das margas calcárias com expressão média de 70%.

A espessura dos níveis margo-calcários e dos estratos calcários varia entre valores de 1cm a 18cm, podendo classificar-se de pouco espessos.

Tabela II – Características de estado *in situ* e as propriedades físicas e mecânicas das unidades calco-margosas

Unidades	Organização dos termos líticos	Outras características	Espessura média dos estratos	Espessura máxima dos termos margosos e pelíticos (cm)	Resposta à percussão dos termos carbonatados	Grau de alteração	Esparçamento médio das descontinuidades	Processos de instabilidade característicos	
Margas e calcários margosos	Heterogeneidade na sequência litica, alternância de estratos	Carsificação, margas com concreções	L ₄	250	Muito a medianamente compacto	W ₁₂ a W ₄₅	F ₁	Deslizamentos rotacionais, desprendimentos, movimentos complexos, fluxos, expansão lateral e ravinamento	
Calcários margosos	Bancadas, parcial alternância	Nódulos férricos, patine de alteração	L ₃	40	Muito a medianamente compacto	W ₁₂	F ₃₄	Sem manifestações	
Margas e calcários em plaquetas	Heterogeneidade na sequência litica, alternância de estratos	Blocometria tabular muito pequena, margas com concreções	L ₅	200	Muito a compacto	W ₁₂ a W ₄	F ₄₅	Deslizamentos rotacionais, desprendimentos, e ravinamento	
Calcários margosos e margas	Alternância de estratos	-	L ₄	160	Muito a medianamente compacto	W ₁₂ a W ₃₄	F ₃₄	Desprendimentos, deslizamentos rotacionais, e ravinamento	
Margas calcárias e calcários	Alternância de estratos	Aspecto concrecionado	L ₄₅	130	Muito a medianamente compacto	W ₂ a W ₄	F ₄₅	Ravinamento, desprendimentos, e movimentos complexos	
Calcários, calcários margosos e margas	Heterogeneidade na sequência litica, alternância de estratos	-	L ₃₄	125	Muito a compacto	W ₁ a W ₃	F ₃₄	Desprendimentos deslizamentos translacionais	
Unidades	Resistência à compressão uniaxial	Porosidade m (%) e índice de vazios Iv (%)	Índice de Plasticidade (%)	Superfície específica (m ² /g)	Expansibilidade livre (%)	% CaCO ₃	Mineralogia argilosa	Coesão efectiva (KPa/cm ²)	Ângulo de atrito (°)
	Termos carbonatados		Termos margosos e pelíticos						
Margas e calcários margosos	S ₃	-	12,0 a 23,5	59,1 a 94,1	8,8 a 13,3	20,3 a 40,4	Ilite, caulinite e esmectite	32	30
Calcários margosos	S ₃	-	-	-	-	-	-	-	-
Margas e calcários em plaquetas	S ₂₃	-	13,9 a 27,5	60,8 a 112,7	7,5 a 16,4	28,1 a 58,6	Ilite, caulinite e esmectite	30	25
Calcários margosos e margas	S ₂₃	5,38 a 25 e 0,75 a 11,36	6,9 a 18,5	36,6 a 100,3	8,3 a 14,2	27,5 a 64,7	Ilite, caulinite, esmectite, e vermiculite	-	-
Margas calcárias e calcários	S ₃	7,5 a 17,8 e 1,7 a 8,0	4,1 a 10,9	40,3 a 94,8	4,1 a 9,3	46,9 a 73,2	Ilite, caulinite e esmectite	38	33
Calcários, calcários margosos e margas	S ₂	-	5,2 a 7,4	38,8 a 62,9	3,3 a 10,0	39,3 a 75,5	Ilite	-	-

Esta unidade evidencia nas características de estado *in situ* uma menor diferenciação do carácter alternante (as margas-calcárias apresentam %CaCO₃ entre 46,7 e 73,2%) em que não existe uma separação entre pólo margoso e pólo carbonatado. Os valores de porosidade e índice de vazios apresentam espectros largos de variação com valores moderados a elevados na porosidade e valores de absorção à água baixos a altos. Estes elementos e outras características físicas e mecânicas da unidade figuram na Tabela II.

(6) A unidade lítica “Calcários, calcários margosos e margas” evidencia-se na paisagem por relevos resistentes à erosão e pode atingir valores máximos de 60±10 a Norte do Mondego e 100±10 a Sul. É considerada equivalente aos Calcários Margosos da Pedrulha de F. SOARES, MARQUES & ROCHA (1985) ou aos Calcários da Póvoa da Lomba de L. DUARTE & SOARES (2002).

Constituída por calcários e calcários margosos com tons acinzentados, azulados ou amarelados, alternando com margas e margas calcárias acinzentadas ou amarelas-esverdeadas. A sequência genérica manifesta, da base para o topo, um incremento da representação volumétrica dos calcários, acompanhada do aumento de espessura dos estratos. Assim, enquanto que na base da unidade, a representação volumétrica dos estratos de calcário é de 50% para o topo pode atingir 70%.

A espessura dos estratos de calcário pode variar entre 2 e 50cm, com valor médio no intervalo [15-25cm], se organizados em bancadas podem atingir 150cm; os níveis margosos e margo-calcários têm uma variação média de espessura no intervalo [10-25cm].

Na Tabela II aparecem sintetizadas as características *in situ* e as propriedades físicas da unidade.

CONCLUSÕES

Salienta-se na descrição das unidades a dependência das características físicas e mecânicas em relação à heterogeneidade na sequência lítica e ao carácter alternante entre termos com diferentes competências e respectiva representação volumétrica. Aspectos como a espessura dos estratos carbonatados e o volume dos corpos pelíticos (silto-argilosos ou margosos) condicionam as características *in situ* e o comportamento das unidades, com tradução no tipo de instabilidade presente e volume envolvido. A mineralogia argilosa e a %CaCO₃ determinam o comportamento plástico das unidades e condicionam o volume envolvido nos movimentos de massa e a geometria da incisão da erosão hídrica.

BIBLIOGRAFIA

- CARVALHO G.S. (1949) – Um perfil geológico da região de Coimbra. *Memórias e Notícias*. Mus. Lab. Min. Geológico Univ. Coimbra, nº 23, pp.9-18.
- CARVALHO G.S. (1951) – A geologia do Baixo Mondego nos arredores de Coimbra (Estado actual do seu conhecimento). *Memórias e Notícias*. Mus. Lab. Min. Geológico Univ. Coimbra, nº 29, pp. 1-36.
- CHARNEY C. (1962) – *Contribution à l'étude géologique de la région du Nord de Coimbra (Portugal)*. Dipl. d'Études Sup. Univ., Lyon.
- CHOFFAT P. (1903/1904) – L'Infralias et le Sinémurien du Portugal. *Com. Serv. Geológicos de Portugal*, V, pp. 49-112.
- CHOFFAT P. (1905) – Supplement à la description de l'Infralias et du Sinémurien en Portugal. *Com. Serv. Geológicos de Portugal*, VI, pp. 123-143.
- CRUDEN, D.M., VARNES, D.J. (1996) – *Landslides types and processes*. Turner, A.K., Schuster, R.L. Eds., Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, pp. 36-75, Special Report 247, Washington DC.
- DIKAU, R.; BRUNSDEN R.; SCHROTT, L. ; IBSEN, M.-L. (1986) – *Landslides recognition. Identification, movement and causes*. John Wiley & Sons, Chichester.
- DUARTE L.V. (1995) – *O Toarciano da Bacia Lusitaniana. Estratigrafia e Evolução Sedimentológica*. Dissertação Univ. Coimbra.
- DUARTE L.V.; SOARES A.F. (2002) – Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico inferior da bacia Lusitânica (Portugal). *Com. Inst. Geol. e Mineiro*, Tomo 89, pp. 115-134.
- FANNIN, R.J., ROLLERSON, T.P., 1993 – Debris flows: some physical characteristics and behaviour. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, pp. 71-81.
- IAEG (1981) – Rock and soil description and classification for Engineering Geological Mapping Geotechnique. Rep. IAEG Comission on Eng. Geological Mapping. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, nº24, pp. 235-274.
- ISRM (1981a) – *Rock characterization testing & monitoring. ISRM Suggested Methods*. (ed. E. T. Brown) Comission on Testing Methods. ISRM, Permamon Press Lda, London.
- ISRM (1981b) – Basic Geotechnical description of Rock Masses (BGD). *International Journal Rock Mechanics Mining, Science & Geomechanics Abstracts*, vol. 18, pp. 55-110.
- PALAIN, C. (1975) – *Une série détritique terrigène, les «Grès de Silves». Trias et Lias inférieur du Portugal*. Thèse Univ. Nancy.
- ROSSET J.; MOUTERDE R.; ROCHA R.B. (1975) – Structure du Jurrassique sur les feuilles de Coimbra sud et de Figueiró dos Vinhos au 50000^{ème} depuis Cernache jusqu'à Serra de Mouro. *Sep. Bol. Soc. Geol. Portugal*, Vol. XIX (3), pp. 103-115.
- SOARES A.F. (1990) – Apontamentos sobre a Geologia de Coimbra. *Livro de Homenagem a Carlos Romariz*. Secç. Geol. Econ. e Aplicada, Fac. Ciências Univ. Lisboa, pp. 311-331.
- SOARES A.F.; MARQUES J.F.; ROCHA R.B. (1985) – Contribuição para o conhecimento geológico de Coimbra. *Memórias e Notícias*. Mus. Lab. Min. Geológico Univ. Coimbra, nº 100, pp. 41-71.
- TAVARES A. O.; SOARES A. F. (2002) – Instability relevance on land use planning in Coimbra municipality (Portugal). *Int. Conf. Instability, planning and management* (ed. R. McInnes & J. Jakeways), pp. 29-41, London.

- TAVARES, A.O. (1999) – *Condicionantes físicas ao planeamento. Análise da susceptibilidade no espaço do concelho de Coimbra*. Dissertação Univ. Coimbra.
- UNESCO/WPWL (1993) – *Multilingual landslide glossary*. International Geotechnical Societies, Canadian Geotechnical Society, Richmond.
- VARNES, D.J. (1978) – *Slope movements : type and processes*. Schuster, R.L. Krizek, R.J. Eds., Landslides Analysis and Control. Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC, pp. 11-35, Special Report 176.

CARACTERIZAÇÃO DE UM ESCORREGAMENTO PLANAR NUM TALUDE ENTRE A PONTE 25 DE ABRIL E A TRAFARIA (ALMADA)

P. CUNHA LAMAS¹ e J. A. RODRIGUES-CARVALHO¹

PALAVRAS CHAVE: Taludes de Almada, escorregamento planar, mecanismo de rotura, retroanálise.

KEY WORDS: Almada slopes, translational slide, failure mechanism, back analysis.

RESUMO

Neste trabalho descreve-se o mecanismo que desencadeou um escorregamento planar de extensão importante, ocorrido no trecho de taludes entre a Ponte 25 de Abril e Trafaria, no Concelho de Almada, e as condições geológicas e geomorfológicas que induziram características distintas das de outros escorregamentos também ocorrentes naquele trecho de taludes.

No estudo por retroanálise do mecanismo de rotura abordam-se, sucintamente, os factores morfológicos e geotécnicos considerados mais relevantes.

ABSTRACT: A large planar landslide on a slope between the Bridge 25 the Abril and Trafaria (Almada)

This paper describes the mechanism that has triggered a large planar landslide which occurred in the segment of the slopes between the "25 de Abril" bridge and the village of Trafaria, in Almada County.

The geological and geomorphologic conditions at the site have imported to this landslide some characteristics that are different from those related to other landslides that have occurred in this zone.

¹ Centro de Estudos de Geologia (CEG), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal, pcel@fet.unl.pt ou rc@fet.unl.pt.

Along with this back analysis study, the most relevant morphological and geotechnical features involved are briefly dealt with in the paper.

INTRODUÇÃO

A ocupação da faixa ribeirinha entre a ponte 25 de Abril e Trafaria é relativamente recente, notando-se, no decorrer da segunda metade do Séc. XX, ampliação contínua de zonas portuárias ligadas à indústria de oleaginosas, ao armazenamento de combustíveis, bem como a algumas empresas dedicadas à actividade marítima. Também naquela faixa, a fixação e expansão de pequenos centros populacionais tem resultado na ocupação das encostas de alguns vales que afluem ao Tejo. Criou-se, assim, um importante acervo de construções que por vezes enfrentam situações de perigo devido, em grande parte, à intervenção num meio geomorfológico em plena evolução, obrigando ao dispêndio de quantias avultadas para estabilização dos taludes envolventes.

A análise dos mecanismos de rotura nestes taludes situa-se no seguimento de diversos estudos desenvolvidos, desde há alguns anos, na Universidade Nova de Lisboa (Projecto TAGUS). Os mesmos visaram a caracterização geológica e geotécnica dos taludes fronteiros a Lisboa (RODRIGUES-CARVALHO *et al.*, 1986, 1987, 1989a, 1989b, 1991, LAMAS, 1989; SILVA, 1990), e culminaram na apresentação de trabalhos mais elaborados versando aquele assunto (LAMAS, 1998; LAMAS e RODRIGUES-CARVALHO, 2002, 2003), onde a problemática da instabilização dos taludes de toda a margem sul do Tejo fronteira a Lisboa, incluindo as suas condicionantes geológicas e geotécnicas, são tratadas em pormenor.

No trecho de taludes em referência, as formações rijas, calcareníticas ou margosas, encontram-se confinadas a zonas bem definidas ao longo da vertente, impondo aos taludes um perfil complexo, em degraus. A predominância dos terrenos brandos, silto-argilosos, sobre os rochosos, condiciona a existência de extensos patamares de declive suave entre degraus sucessivos. Os terrenos ficam, deste modo, expostos à acção dos agentes da erosão subaérea, o que facilita a sua meteorização. Sobre estes, acumulam-se depósitos de vertente por vezes com alguns metros de espessura. Estes aspectos justificam que, neste trecho, os escorregamentos de solos correspondam ao tipo dominante de movimentos de massa de vertente.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

A costeira de Almada apresenta, em toda a sua extensão, uma estrutura em monoclinal suavemente inclinado para SSE, com camadas alternadamente mais rijas (margas, por vezes fossilíferas, arenitos e calcarenitos) e mais brandas (siltes, ora mais argilosos, ora mais arenosos) de idade miocénica.

A litologia desempenha um papel importante na diferenciação da forma dos taludes sobranceiros ao Tejo e no perfil das linhas de água adjacentes. As camadas que integram as principais divisões, definidas por COTTER (1956) para o Miocénico marinho de Lisboa, sofrem importantes variações laterais de fácies de um extremo ao outro da costeira. Tais variações poderão justificar, em parte, a diferenciação observada no perfil dos taludes, nomeadamente entre os trechos a leste e a oeste da ponte.

Para oeste da ponte a quantidade e espessura dos estratos areno-margosos e dos bancos de acumulações de conchas e moldes de conchas vão-se reduzindo progressivamente, dando lugar a camadas mais brandas e de granulometria cada vez mais fina. Todas estas variações concorrem para que os taludes fronteiros ao Tejo, que no sector entre Cacilhas e a ponte apresentam importantes trechos muito inclinados, mesmo verticais em várias dezenas de metros, se tornem, para oeste da ponte, progressivamente menos inclinados.

TIPOLOGIA DE MOVIMENTOS E CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

Os taludes em análise encontram-se em fase activa de evolução, materializada essencialmente por ocorrências de tipos distintos de escorregamentos. Os mecanismos de tais movimentos diferem de local para local de acordo com as características litológicas e morfológicas presentes e consoante a intensidade de actuação dos diferentes agentes modeladores do terreno. Entre a Ponte 25 de Abril e Trafaria, os tipos de escorregamentos mais comuns em solos são os seguintes:

- Escorregamentos nas vertentes dos vales, podendo ser do tipo rotacional, singulares ou sucessivos, em ocorrências em geral pouco profundas mas, por vezes, de extensão apreciável (alguns hectares).
- Escorregamentos de crista: afectam praticamente todos os degraus de escarpas ao longo dos vales mais importantes. Estes movimentos, normalmente do tipo rotacional, abrangendo volumes relativamente pequenos, estão associados a inclinações excessivas que os depósitos de vertente atingem ao acumular-se por cima de escarpas rochosas. Um escorregamento deste tipo ocorrido em Porto Brandão, em Janeiro de 1996, destruiu duas habitações construídas de encontro ao sopé da escarpa, provocando duas vítimas mortais.
- Escorregamentos de sopé das vertentes dos vales: tipos de roturas desencadeadas, originalmente, por aumento de inclinação do terreno devido ao trabalho erosivo de linhas de água no decorrer de períodos de chuvas, ou por escavações efectuadas pelo Homem para alargamento de plataformas.
- Finalmente, nas frentes de taludes sobranceiros ao Tejo, são frequentes escorregamentos de detritos na face exposta do degrau inferior e, na sua crista, ocorrem por vezes escorregamentos rotacionais múltiplos.

Os terrenos miocénicos siltosos, sobreconsolidados e fissurados, apresentam-se superficialmente mais descomprimidos e propiciam os tipos de movimentos acima referidos. Caracterizam-se por uma coesão raramente superior a 50 kPa e ângulo de atrito entre 25° e 35°. Apresentam limite de liquidez (W_L) da ordem de 40%, limite de plasticidade (W_p) em torno de 20-21% e índice de plasticidade (IP) de 18-19%. Em relação aos solos deslocados (depósitos de vertente), eles apresentam valores de resistência inferiores, pelo menos na sua componente coesiva, têm limites de liquidez mais baixos, da ordem de 30-34%, mantendo-se porém o limite de plasticidade nos 20%. Tal justifica que os índices de plasticidade baixem para valores médios entre 8 e 10%.

As características geotécnicas, físicas e mecânicas, dos terrenos siltosos afectados pela ocorrência que a seguir se descreve foram obtidas em ensaios realizados nos laboratórios de Mecânica dos Solos e de Geologia de Engenharia da Universidade Nova de Lisboa, no âmbito dos trabalhos conducentes à elaboração de uma dissertação de doutoramento (LAMAS, 1998).

RETROANÁLISE DO MECANISMO DE UM ESCORREGAMENTO SOBRE UMA ESTRADA

Sobrancelho à estrada que liga Almada à Trafaria, no troço entre Murfacém e aquela segunda localidade, eleva-se um talude, exposto a sul, com cerca de 11° de inclinação. O declive referido termina abruptamente tanto do lado do sopé, onde se encontra cortado, desde os anos 30, por um talude de escavação adjacente à Estrada Nacional 377-1 com 3 a 5 m de altura, como do lado superior, onde o perfil dos terrenos se torna mais inclinado devido à presença de terreno mais resistente, calcário ou calcarenítico, pertencente às divisões Va_3 e Vb (respectivamente, “Calcários da Musgueira” e “Areias do Vale de Chelas”) definidas por COTTER (1956). Na superfície mais suave entre estes últimos e o corte da estrada, ocorrem siltes argilosos ou arenosos da divisão Va_2 , (“Areias com Placuna miocénica”) aos quais se sobrepõem depósitos de vertente.

Durante as fortes chuvadas do Inverno de 1995/96, desencadeou-se um escorregamento, com a forma de uma língua de terrenos com cerca de 100 m de comprimento por 30 m a 40 m de largura, que avançou sobre a estrada cobrindo-a em toda a sua largura (fig. 1).

348

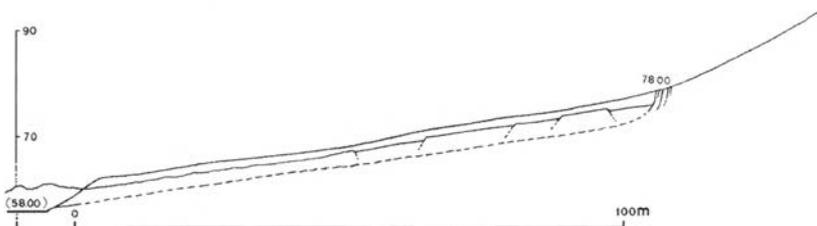


Fig. 1 - Perfil transversal do escorregamento sobre a Estrada Nacional 377-1.

A morfologia do terreno escorregado, numa sucessão de blocos separados entre si por grandes fendas e dispostos ora em “graben” ora em “horst” de direcção normal ao sentido do movimento, permite classificar a ocorrência como um escorregamento planar de terras em blocos (fig.2).

A perda de apoio lateral dos terrenos circundantes, devido ao abaixamento generalizado da zona escorregada, instabilizou estes últimos provocando, numa segunda fase, o alargamento da zona instável o que se materializou pelo prolongamento lateral da escarpa de topo do escorregamento para ambos os lados da primeira ocorrência. Assim, de pouco mais de 3000 m² inicialmente, a ocorrência passou a interessar mais de um hectare de vertente, tendo a sua rápida progressão remontante sido travada pela presença, alguns metros mais acima, do afloramento de terrenos mais resistentes atrás referidos e que formam pequena colina (fig.3). Um pouco a sul do referido talude existe um poço que, no Verão anterior, se apresentava com água a cerca de 1 m abaixo da superfície do terreno circundante. Na altura da ocorrência, o nível de água coincidia com a cota da boca do poço.



Fig. 2 – Aspecto do escorregamento em análise.

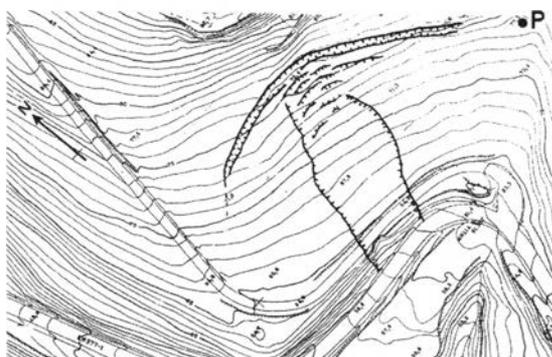


Fig. 3 – Área afectada pelo escorregamento sobre a EN377-1 (Esc. aprox.: 1:3 300).
O ponto P, no vértice superior direito da planta, localiza o poço referido no texto.

Pela observação da morfologia do movimento, tanto junto à escarpa de topo como na berma da estrada sobre a qual os terrenos avançaram, verificou-se que a ocorrência interessaria apenas os depósitos de vertente e, quanto muito, as zonas superiores mais descomprimidas dos terrenos in situ, silto-argilosos, cobertos por aqueles depósitos. Os registos de algumas das sondagens realizadas no local, em 1996, após o escorregamento, confirmaram, de algum modo, os resultados das observações feitas no campo: os depósitos de material solto deveriam ter, em média, uma espessura de cerca de 4 m em quase toda a vertente, facto que permitiu interpretar esta ocorrência segundo um modelo de rotura planar em talude “infinito”. O corte realizado junto à estrada, ao retirar todo o confinamento de pé do talude à camada superficial constituída por depósitos de vertente, reforça a validade deste modelo.

Ensaio de identificação realizados em algumas amostras de depósito de vertente revelaram tratar-se de siltes margosos, variando os respectivos limites de consistência do seguinte modo: W_L : 29%-35%, W_P : 20%-24% e IP: 6%-15%. Neste mesmo local retiraram-se amostras de terreno in situ, igualmente silte margoso, um pouco mais plástico que os materiais soltos: W_L : 38%-47%, W_P : 20%-22% e IP: 18%-25%.

O peso volúmico aparente seco correspondeu, naquelas últimas amostras, aos valores normais obtidos para a generalidade dos siltes amostrados noutros locais deste sector dos taludes, independentemente da sua origem (entre $16,4 \text{ kN.m}^{-3}$ e $16,9 \text{ kN.m}^{-3}$) mas, noutras, ficou sensivelmente abaixo daqueles valores ($14,5 \text{ kN.m}^{-3}$). O teor em água natural destas últimas estava em 26%. A sua coloração castanho-amarelada, enquanto as outras se apresentavam acinzentadas, bem como as diferenças observadas nos índices determinados (menor limite de liquidez e menor peso específico seco), acusavam um maior grau de meteorização relativamente às restantes, apesar da proximidade dos locais de onde todas as amostras tinham sido obtidas.

Foi possível talhar, a partir destas amostras de características diferenciadas, os provetes necessários para se efectuarem ensaios de corte directo consolidados, drenados. Destes, obtiveram-se os seguintes parâmetros resistentes, característicos de um terreno fortemente descomprimido:

Parâmetros de pico: $c = 10,8 \text{ kPa}$; $\phi = 24^\circ$

Parâmetros residuais: $c_r = 0$; $\phi_r = 23^\circ$

Admite-se para a generalidade dos terrenos escorregados um peso volúmico aparente seco idêntico ao obtido para aquelas amostras, o qual corresponderá não só ao da generalidade dos terrenos in situ mais superficiais e intensamente meteorizados, como ao dos depósitos de materiais soltos que os recobrem. Com as devidas reservas, pelo facto destes últimos serem, em regra, muito heterogéneos, apresentando características físicas variáveis de ponto para ponto, refira-se que,

segundo relatório geológico e geotécnico consultado, quatro ensaios in situ em depósitos de vertente da mesma região pelo método da garrafa de areia, forneceram valores de peso específico seco entre $13,5 \text{ kN.m}^{-3}$ e $14,8 \text{ kN.m}^{-3}$.

Na situação mais instável, quando o terreno mais superficial se encontra totalmente saturado e com percolação paralela à superfície (fig. 4), a expressão do coeficiente de segurança (FS) é:

$$FS = \frac{c + \gamma' * d * \cos^2 i * \text{tg} \phi}{\gamma_{sat} * d * \cos i * \text{sen} i}$$

sendo:

- γ' e γ_{sat} , respectivamente, os pesos volúmicos submerso e saturado do terreno;
- d , a profundidade, constante, da superfície de escorregamento;
- i , o declive do terreno e, portanto, também da superfície de escorregamento.

Foram calculados os seguintes pares de valores de resistência de pico para a condição de equilíbrio limite (FS=1,0):

$$c = 10,8 \text{ kPa}; \phi = 17,5^\circ$$

$$c = 1,7 \text{ kPa}; \phi = 20^\circ$$

isto é, valores mais baixos que os parâmetros de pico determinados laboratorialmente. Ao elevar o ângulo de atrito obtido no primeiro par de valores em 20 %, para um valor ainda afastado do correspondente à amostra ensaiada, a coesão baixou em quase 85 %, tornando-se quase inexistente.

Conclui-se que o terreno deveria encontrar-se, no momento da rotura, na sua resistência residual. Este facto parece ser confirmado pela sua fraca inclinação, derivada de uma longa evolução tendente a atingir o perfil de equilíbrio nestes terrenos deslocados ou altamente meteorizados. O aproveitamento de toda aquela área pelas práticas agrícolas mascarava qualquer evidência morfológica de instabilizações anteriores, ao mesmo tempo que confirmava um intenso remeximento

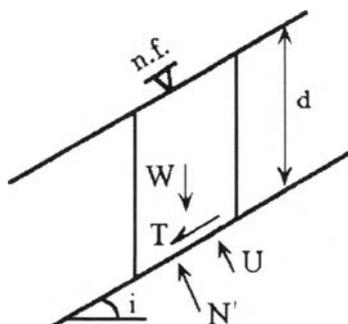


Fig. 4 – Fatia elementar com as forças actuantes num talude “infinito”, totalmente saturado e com percolação paralela à superfície.

das suas zonas mais superficiais. Por seu lado, verificou-se em testemunhos de sondagens realizadas no local que os terrenos siltosos subjacentes ao manto de depósitos de vertente encontravam-se fissurados, com abundantes “lisos” de aspecto espelhado sub-paralelos à estratificação. Estas fissuras, caracterizadas por uma resistência muito baixa ao deslizamento, favoreceram a percolação das águas subterrâneas ou por elevação dos níveis freáticos existentes, ou por infiltração através da delgada camada de terrenos soltos que se sobrepunham àqueles siltes. A exposição da vertente para o quadrante sul, próxima do sentido de inclinação das camadas e, portanto, da fissuração predominante era, por essa razão, muito favorável à instabilidade.

Admitindo, pois, o terreno na sua resistência residual, e uma vez que a coesão se anula, a expressão do coeficiente de segurança passa a ser:

$$FS = \frac{\gamma' * tg \phi}{\gamma_{sat} * tgi}$$

No equilíbrio limite (FS=1,0), e resolvendo a equação em ordem a ϕ_r , determinaram-se os seguintes parâmetros resistentes:

$$c_r = 0; \phi_r = 22,7^\circ$$

valores praticamente idênticos aos obtidos em laboratório, o que confirma o facto do escorregamento só ter sido possível com o terreno na sua resistência residual.

No Verão anterior à ocorrência, o poço que se encontrava junto à área afectada continha água até 1m abaixo da cota do terreno circundante. Considerando essa profundidade como a do nível freático no resto da vertente, o coeficiente de segurança seria, nessa situação, de 1,29.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A retroanálise efectuada permitiu confirmar que, com o nível freático a cerca de 1 m de profundidade, ou seja, 3 m acima da superfície de escorregamento, o talude encontrava-se francamente estável. Sendo a inclinação do talude natural tão suave, a rotura dos solos deslocados e/ou muito meteorizados que o constituíam só seria possível em situações hidrogeológicas extremas – nível freático coincidente com a superfície do terreno. Se, pelo contrário, o declive geral fosse um pouco superior, para que houvesse rotura já não teria sido necessário o nível freático encontrar-se tão superficial.

Esta situação explica os casos de instabilidade em condições geológicas similares, com rotura aproximadamente ao longo do limite inferior dos depósitos de vertente, ou um pouco abaixo, e com níveis freáticos a certa profundidade, existentes noutros locais da área em estudo onde os declives gerais eram um pouco

superiores. Como exemplos, refiram-se escorregamentos ocorrentes mais a nascente há algumas décadas atrás, nas vertentes dos vales da Banática e de Porto Brandão interessando, respectivamente, 3 hectares e 2,5 hectares de terrenos coluvionares, e com declives gerais compreendidos entre 13° e 17°. Particularizando para o caso do vale de Porto Brandão, os depósitos de vertente apresentavam uma espessura média próxima de 3 m e o nível freático encontrar-se-ia a profundidade rondando 1 m.

BIBLIOGRAFIA

- COTTER, J.C.B. (1956) – O Miocénico marinho de Lisboa (obra póstuma). Comunicações. Serv. Geol. Portugal, Lisboa. Suplemento ao tomo. XXXVI.
- LAMAS, P.C. (1989) – Carta de Riscos de Movimentos de Terrenos dos Taludes da Margem Sul do Tejo (Cacilhas - Trafaria). Dissertação de Mestrado, U.N.L., Lisboa.
- LAMAS, P.C. (1998) – Os Taludes da Margem Sul do Tejo - Evolução Geomorfológica e Mecanismos de Rotura. Dissertação de Doutoramento, U.N.L., Lisboa.
- LAMAS, P.C., RODRIGUES-CARVALHO (2002) – Mecanismo de rotura na escarpa entre Cacilhas e Arealva (Almada). Actas 8º Cong. Nac. Geotecnia, vol.2, LNEC, Lisboa.
- LAMAS, P.C., RODRIGUES-CARVALHO (2003) – Sector de Taludes entre a Ponte e Trafaria (Almada). Caracterização de um escorregamento rotacional. Actas do VI Cong. Nac. Geologia, Dep. Ciências da Terra, Monte de Caparica.
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. & Costa, C.N. (1986) – Modificações nas escarpas da Margem Sul do Tejo entre 1958 e 1975 – Um exemplo de utilização da detecção remota para o estudo da influência antrópica nos processos geológicos e naturais. Bol. Geotécnico 2, SAGT/UNL, Monte de Caparica.
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. & LAMAS, P.C. (1987) – Carta de movimentos de terrenos dos taludes da Margem Sul do Tejo. Bol. Geotécnico, SAGT/UNL, Monte de Caparica.
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. *et al.* (1989) – Nota descritiva da geologia da margem sul do Tejo (Cacilhas - Trafaria), na escala 1/2000. Relatório interno, SAGT /UNL, Monte de Caparica.
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. *et al.* (1991) – Notícia Explicativa da carta de cadastro hidrogeológico da margem sul do Tejo (Cacilhas-Cova do Vapor), Relatório interno, SAGT /UNL, Monte de Caparica.
- RODRIGUES-CARVALHO, J.A. *et al.* (1989) – Evolução da linha de costa Cacilhas - Cova do Vapor, Relatório interno, SAGT/UNL, Monte de Caparica.
- SILVA, A.P.F. da (1990) – Cartografia Geotécnica Assistida por Computador. Dissertação de Mestrado, U.N.L., Lisboa.

EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TALUDES NATURAIS E DE ESCAVAÇÃO

ANTÓNIO LUÍS DE ALMEIDA SARAIVA¹ e PEDRO GOMES CABRAL SANTARÉM ANDRADE²

PALAVRAS-CHAVE: taludes, instabilidade, classificação, caracterização.

KEY WORDS: slopes, unstability, classification, characterization.

RESUMO

O desencadear da instabilização de um talude, (natural, escavação ou aterro) é, por norma, o resultado da acção de um conjunto variado de factores entre os quais se pode referir a água como agente condicionante e desencadeante, a par, entre outros, da atitude das descontinuidades e da geometria do talude, da intensidade e homogeneidade/heterogeneidade do grau de alteração, da litologia, da intensidade de compartimentação e das características das descontinuidades, e da capacidade de desintegração dos materiais constituintes (solos e/ou rochas).

Neste trabalho analisam-se várias situações em que se tem verificado o início da instabilização em taludes naturais e de escavação em litologias diferenciadas (granitos, xistos, metagrauvaques, calcários, etc.), bem como as origens da instabilização e as respectivas evoluções temporais dos mesmos no IP3, no IC8, na EN17 e em Frades, Régua e Sagres que em alguns casos têm originado modificações muito acentuadas, bem como as respectivas causas.

¹ Departamento de Ciências da Terra, 3000-272 Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Correio electrónico: asaraiva@ci.uc.pt.

² Departamento de Ciências da Terra, 3000-272 Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Correio electrónico: pandrade@ci.uc.pt.

ABSTRACT: How the natural and the excavated slopes degrade with time

Slope instability occurrence (natural, excavation and landfill slopes) is usually the result of a varied set of factors such as: water as a conditioning and inducing agent, orientation of discontinuities, slope configuration, intensity and homogeneity/heterogeneity of the weathering degree, lithology, discontinuities parameters and block size and the weakening or disintegration of the slope's composing materials (soils and/or rocks) when exposed to weathering processes.

The authors analyse several situations that have led to stability problems in natural and excavation slopes in different lithologies (granites, schists, metagraywaques, limestones, etc.). Also, they analyse stability problems and their causes and the slopes' chronological evolution in IP3, IC 8, EN17, EN234, Frades, Régua and Sagres that, in some cases, are responsible for great changes.

1. INTRODUÇÃO

A instabilização de taludes tem ou pode ter consequências importantes quer nas pessoas quer nos bens (figuras 1 a 4).



Fig. 1 – Deslizamento no Cabril (Janeiro de 2001).



Fig. 2 – Deslizamento na estrada de acesso à ETAR de Miranda do Corvo (Abril de 2001).



Fig. 3 – Deslizamento de Aldriz (Maio de 2001).



Fig. 4 – Deslizamento na estrada Régua-Pinhão (Janeiro de 2003).

Em fins de 2000 e até Maio de 2001 ocorreu, em Portugal, um intenso período de precipitação que teve como consequência o desencadear de numerosas manifestações de instabilidade que originaram perdas económico/financeiras significativas porque afectaram numerosas vias de comunicação (principalmente estradas), provocaram a destruição de habitações e um número significativo de mortes. Neste ultimo caso podem referir-se os deslizamentos ocorridos em:

- Ariz: Originou uma morte;
- Azinheira: Originou três mortes;
- Frades: Originou quatro mortes (figura 5).



Fig. 5 – Deslizamento em Frades (Dezembro de 2000).

Em alguns casos a instabilidade processa-se na sequência da modificação das condições de equilíbrio dos taludes naturais. Uma tal situação pode desenvolver-se durante ou após a realização de escavações, algumas das quais, especialmente nas vias de comunicação, podem atingir grandes alturas.

2. MOVIMENTAÇÃO DOS TERRENOS

Em função da velocidade e da morfologia da movimentação dos terrenos podem considerar-se os seguintes tipos de movimentos (VARNES, 1978):

- Desprendimentos;
- Basculamentos;
- Deslizamentos rotacionais e translacionais;
- Fluxo
- Extensões laterais (raros em Portugal);

A velocidade a que se processa a movimentação dos terrenos pode ser classificada em (TURNER & SCHUSTER, 1996):

358

Movimentação	Velocidade	Designação
Extremamente rápida	5 m/s	Desmoronamento
Muito rápida	3 m/min	
Rápida	1,8 m/hora	Escorregamento
Moderada	13 m/mês	
Lenta	1,65m/ano	Fluência
Muito lenta	16 mm/ano	
Extremamente lenta		

2.1. DESMORONAMENTOS

Os desmoronamentos consistem na queda de blocos de rochas que podem ter dimensões muito variáveis e ocorrer quer em taludes muito escarpados, quer em falésias. A movimentação dos blocos desprendidos pode processar-se por ressaltos, rolamento ou por deslizamentos e desenvolver-se a velocidades elevadas (superiores a 100 Km/h).

É possível considerar os desmoronamentos primários e os secundários. Aqueles resultam do “desligamento” de blocos são a pouco alterados devido à acção da compartimentação e estes envolvem a movimentação de “fragmentos” que sempre estiveram fisicamente desligados da falésia e apenas nela alojados.

Nos maciços rochosos os desmoronamentos dão origem à queda de blocos que podem apresentar dimensões variáveis. Podem ser originados pela intensa fracturação dos maciços rochosos ou pela erosão diferencial que é um dos factores potencialmente responsáveis pela formação de consolas (figura 6) que originam um equilíbrio instável.

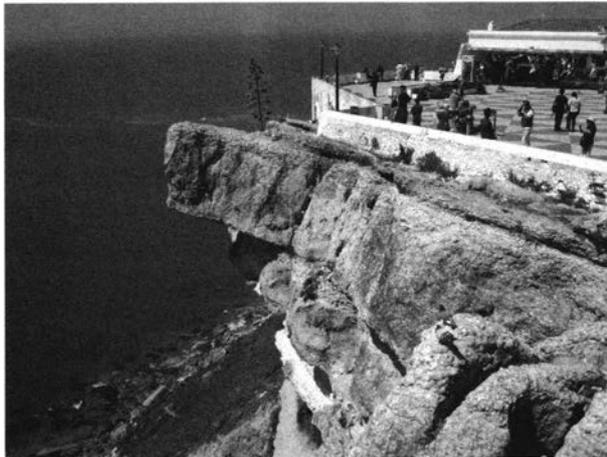


Fig. 6 – Formação de uma consola no Sítio (Agosto de 2002).

O avanço preferencial da erosão no nível menos resistente implica uma concentração progressiva de tensões nos níveis superiores. Assim, caso estes sejam pouco resistentes, ou se apresentem acentuadamente fracturados (figura 7), a ruptura pode processar-se por flexão e/ou tracção com o conseqüente basculamento dos blocos individualizados. No entanto, caso o nível se apresente muito fracturado e a matriz rochosa seja resistente, o basculamento é apenas desencadeado pela excentricidade do peso.

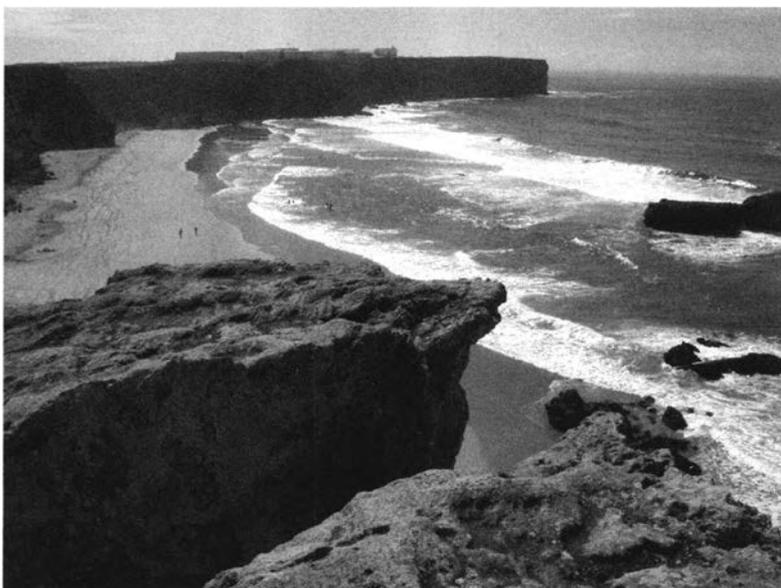


Fig. 7 – Fractura de tracção em Sagres (Setembro de 2002).

Deve anotar-se que a concentração de tensões no bordo do nível débil subjacente pode originar o desenvolvimento de um assentamento diferencial que pode implicar o desencadear de deslizamentos em cunha e a queda do bloco por ruptura na base.

2.2. BASCULAMENTOS

O basculamento ocorre por acção das forças que têm tendência a provocar a rotação dos blocos em redor de um ponto situado abaixo do centro de gravidade. O basculamento pode desencadear-se devido à acção do peso dos blocos, pressão da água nas diaclases e à movimentação de blocos adjacentes. O basculamento pode desenvolver-se quer em rochas, quer em solos, e afectar volumes muito significativos. Desenvolve-se, com frequência, nas rochas que apresentam uma foliação penetrativa acentuada, como é o caso das rochas xistentas (figura 8).

Podem considera-se as seguintes variantes:

- Basculamento flexural;
- Basculamento de blocos;
- Basculamento de blocos e flexural;
- Mecanismos secundários de basculamento.



Fig. 8 – Basculamento em Cardigos (Agosto de 2002).

2.2.4. CONDIÇÕES DE OCORRÊNCIA DE BASCULAMENTOS

Para que possa ocorrer um basculamento do tipo flexural é necessário que previamente já se tenham desencadeado movimentos entre os planos de foliação do maciço. Tal acontecerá quando a perpendicular aos planos de foliação tiver uma inclinação inferior a ϕ_j (ângulo de atrito). Se esta condição existir, o basculamento ocorrerá se $(90-\delta)+\phi_j < \alpha$ (δ representa o pendor da foliação e α a inclinação da superfície do talude) (GOODMAN, 1989). Deve anotar-se que para o desencadear do basculamento é necessário que a direcção da superfície do talude e a das superfícies de foliação tenham um afastamento que não ultrapasse os 30° .

3. DESLIZAMENTOS

Os deslizamentos podem ser do tipo rotacional (circular) e do tipo translacional (planar e em cunha).

3.1. DESLIZAMENTOS CIRCULARES

Neste tipo de deslizamentos a superfície ao longo da qual se dá a ruptura tem, em corte, uma forma que na generalidade das situações é côncava e, em planta, uma forma em arco (figura 9). No entanto devido à ocorrência de eventuais superfícies de anisotropia a forma pode ser diferenciada. Este tipo de movimentos



Fig. 9 – Início de um deslizamento circular na EN 17 (Janeiro de 2001).

pode ocorrer em solos argilosos homogêneos, solos arenosos ou em maciços rochosos intensamente diaclasados (de um modo aleatório) ou alterados em que as pressões intersticiais da água são suficientemente elevadas para originar a ruptura.

3.2. DESLIZAMENTOS TRANSLACIONAIS

A movimentação processa-se como consequência da ruptura ao longo de superfícies planares. A movimentação pode ocorrer ao longo de uma única superfície (normalmente deslizamentos planares, figura 10) ou ao longo da recta de intersecção entre dois planos (deslizamentos em cunha, figuras 11 a 13).

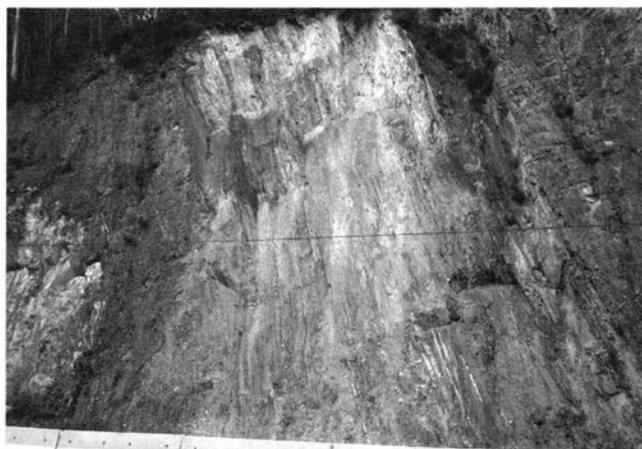


Fig. 10 – Deslizamento planar no IP3 (Agosto de 2002).

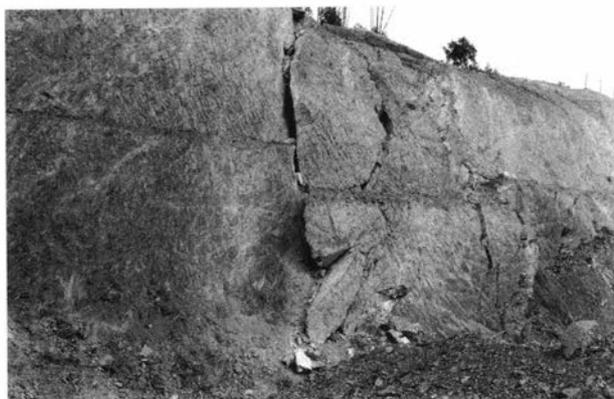


Fig. 11 – Fase inicial de um deslizamento em cunha (Nó da Raiva, IP3, 1995).



Fig. 12 – Fase intermédia de um deslizamento em cunha (Nó da Raiva, IP3, 1995).



Fig. 13 – Fase final de um deslizamento em cunha (Nó da Raiva, IP3, 1995).

Neste último caso, e em determinadas situações, a movimentação pode processar-se ao longo da descontinuidade que evidencia a inclinação mais elevada. As superfícies de deslizamento podem ser planares, em escadaria ou poligonais.

Um outro tipo de deslizamentos são os que englobam componentes de deslizamentos circulares e planares. São constituídos por superfícies acentuadamente não circulares formadas pela combinação de uma parte planar, curva ou em escadaria e por uma base plana. Geralmente evidenciam a presença de heterogeneidades que muitas vezes são materializadas por um nível pouco resistente ou por uma interface entre o domínio meteorizado e o não meteorizado.

3.3. FLUXOS

Os movimentos que se enquadram nesta categoria podem ser, entre outros, os fluxos de detritos (figura 14), os fluxos de solos e os fluxos de fragmentos rochosos.

Em algumas classificações também se enquadram neste tipo de movimentos os fenómenos de “creep” e de solifluxão. Neste tipo de movimentos (fluxos) a água desempenha, geralmente, um papel primordial no desencadear da instabilização do maciço que passa a ter um comportamento de um líquido viscoso. A superfície ao longo da qual se desenvolve a ruptura geralmente não é preservada. A velocidade com que se processa a movimentação é similar à de um líquido viscoso.



Fig. 14– Fluxo de detritos (Coimbra, 1993).

4. BIBLIOGRAFIA

CRUDEN, David M. & VARNES, David, J. (1996) – Landslide Types and Processes. In Special Report 247: Landslides. Investigation and Mitigation (TURNER, A. KEITH & SCHUSTER, ROBERT L. eds.), Transportation Research Board, National Research Council, pp. 36-75.

GOODMAN, R. E. (1989) – Introduction to Rock Mechanics. 2nd edition. John Wiley & Sons.

VARNES, David J. (1978) – Slope Movement Types and Processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (R. L. SCHUSTER and R. J. KRIZEK, eds.), Transportation Research Board, National Research Council, pp. 11-33.

SLOPE BEHAVIOUR IN HIGHWAYS: A DECADE OF DETERIORATION IN METAMORPHIC ROCKS WITH VOLCANO-SEDIMENTARY ORIGIN ALONG THE IP4 (NE PORTUGAL)

A. A. SÁ¹, M. PORTUGAL FERREIRA² e C. C. PIRES¹

PALAVRAS-CHAVE: taludes artificiais, estabilidade, deterioração, factores, unidades vulcano-sedimentares, detritos.

KEY WORDS: artificial slopes, stability, deterioration, factors, volcano-sedimentary units, debris.

ABSTRACT

A decade after the opening of the IP4 (principal itinerary Porto-Bragança) between Mirandela and Macedo de Cavaleiros, it is stimulating and possible to evaluate the amount of rock material removed from the excavated slopes, in the intermediate to low grade metamorphic Lower Palaeozoic rock units along a segment of twenty kilometres. These units comprehend the quartzphyllites, greenstones and greenschists, metarhyolites and metamorphic tuffs and tuffites of a broad synform.

The deterioration types, the volume of the debris, the major dimension of the rock fragments and the length of deteriorated sites are evaluated against the rock types, the density, orientation and opening of the discontinuities, degree of weathering, geometry of the slope and the prevalent foliation. The deterioration susceptibilities (RDA+e) found for the whole length of these highway slopes, range from 54 to 99 (the full interval ranges from 6 to 160). It can be tested against an attempted index of actual deterioration of the slopes (ADS) which is found to range between 8 and

¹ Departamento de Geologia – UTAD – Ap. 1013, 5001-911 Vila Real.

² Centro de Geociências – Dep. Ciências da Terra, FCTUC, 3000-272 Coimbra.

18 (the full interval is 4 to 20). It has been found that these two indices show a positive correlation expressed as $ADS = 0,26RDA - 5,64$ for an $R^2 = 0,56$. If it were used the (RDA+e), the correlation would be worse. The most deteriorated segment is located in the thermally recrystallized and preferentially fractured volcano-sedimentary units that crop out in the western limb of the Romeu antiform.

RESUMO:

O comportamento de taludes de rodovias: uma década de deterioração em rochas metamórficas de origem vulcano-sedimentar ao longo do IP4 (NE Portugal)

Uma década após a abertura do troço do IP4 entre Mirandela e Macedo de Cavaleiros (itinerário principal Porto-Bragança) é estimulante avaliar a quantidade de material rochoso caído dos taludes escavados em rochas metamórficas do Paleozóico Inferior, numa extensão de vinte quilómetros. Estas unidades compreendem quartzofilitos, xistos verdes, metarriolitos, tufos metamórfico e tufitos de uma sinforma aberta.

Os tipos de deterioração, o volume de detritos, a dimensão dos maiores fragmentos rochosos e a extensão dos locais deteriorados foram avaliados tendo em atenção o tipo de rochas, a densidade, a orientação e abertura das descontinuidades, o grau de alteração, a geometria do talude e a foliação predominante. As susceptibilidades de deterioração (RDA+e) encontradas para a extensão total destes taludes situam-se no intervalo 54 a 99 (o intervalo total varia entre 6 e 160); foram testadas contra um índice de deterioração real dos taludes, aqui proposto como ADS, o qual varia entre 8 e 18 (o intervalo total vai de 4 a 20). Os índices RDA apresentam uma correlação positiva que se expressa como $ADS = 0,26RDA - 5,64$ para um $R^2 = 0,56$. Se fosse usado o (RDA+e) a correlação seria mais pobre. O segmento mais deteriorado encontra-se nas unidades vulcano-sedimentares, com recristalização de contacto e preferencialmente fracturadas, do flanco oeste da antiforma do Romeu.

INTRODUCTION

368

The intrinsic qualities of the rock slope foundations and the type and classes of instabilities as well as the resulting collapsed rock materials thereon incident are closely related (PERRY & O'REILLY, 1990; GONZÁLEZ DEL VALLEJO *et al.*, 2002).

Consequent to the surveying of the machined slopes, along a 20 km segment of the highway IP4 (Porto – Bragança), carried by SÁ (1999), it is here shown some of the deterioration phenomena that have been found on the different units of a lithostratigraphic sequence, dated from the Lower Palaeozoic, which is

composed of phyllites-micaschists and their overlaying para-ophiolitic suite – greenstones, greenschists, metarhyolites, graded metavolcaniclastics and quartzphyllites.

As a matter of fact, the slopes and the road-way deterioration range from the visual impact to the complete blockade or even the induced failure of the road-way structure (SOBRINHO, 1988; ZIKA, 1990; BASKERVILLE *et al.*, 1993). It is here made an attempt to check the index of Rock Deterioration Assessment (RDA), which is here also evaluated with a slightly modified configuration, against the Actual Deterioration of the Slopes (ADS). In fact, it was possible to assess this deterioration ten years after the road cutting. The assessed indices can be obtained strictly on the basis of the visual characterisation of the slopes.

GEOLOGICAL SETTING AND THE COLLECTED DATA

The terrains herein envisaged, which belong specifically to the denominated Lower Allochthonous Thrust Complex (LATC) of the Galiza – Trás-os-Montes Zone (GTMZ), are composed of two lithologic suites; the Lower Unit is essentially made of micaschists and the Upper Unit comprehends metamorphic rocks after a volcano-sedimentary sequence and its prograded acidic, intermediate and basic submarine flows and volcanoclastics (SÁ *et al.*, 2000a).

Upwards the LATC it is found the Ophiolitic Thrust Complex (OTC), with relevant affinities to the LATC. Here, from top to bottom, it can be seen the following sequence: greenstones (amphibolites), sheeted dyke complex of greenstones (amphibolites), flaser gabbros, melagabbros and serpentized lherzolites (RIBEIRO *et al.*, 1990).

As these highway slopes were excavated in early 1990's and the Rockslope Deterioration Assessment (RDA) was estimated in 1998, it was considered the need to assess the actual deterioration with a campaign of field work focused on the sites with previously determined values of RDA following NICHOLSON & HENCHER (1997). So, four parameters were considered (SÁ *et al.*, 2000b) and adequately dimensioned:

- a) the average spacing of the discontinuities;
- b) the average openings of the discontinuities;
- c) the strength of the rock mass;
- d) the degree of weathering.

For this particular case study, due to its rather anisotropic rock fabric, a fifth parameter was considered:

- e) the dihedral angle between the “slope plane” and the major discontinuity(ies) of the rock mass (Table 1).

Table 1 – Factors corresponding to the dihedral angle (5th parameter) between the slope plane and the major discontinuities of the rock mass.

	Value
> 50°	1
40° – 50°	3
20° – 40°	8
10° – 20°	15
< 10°	25

Table 2 – Susceptibility classes using RDA method vs. Susceptibility classes using RDA method and the 5th parameter (SÁ *et al.*, 2000b).

Site	ΣRDA	RDA Classes	5 th parameter	ΣRDA+e	Final Class
2	64	4	8	72	4
2A	70	4	3	73	4
3	66	4	1	67	4
3A	61	4	8	69	4
8	53	3	1	54	3
13	67	4	8	75	4
13A	66	4	15	81	5
14	67	4	8	75	4
17	69	4	3	72	4
18	82	5	1	83	5
19	83	5	3	86	5
19A	90	5	8	98	5
20	78	4	8	86	5
20A	85	5	1	86	5
21	84	5	15	99	5
25	77	4	8	78	4
25A	66	4	3	69	4
25B	75	4	3	78	4
26	65	4	1	66	4
27	65	4	3	68	4
29	62	4	8	70	4
34	75	4	3	78	4
39	79	4	1	80	5
46	63	4	3	66	4

The existence of discrete faults, as well as the technology used to make the road cut, and the height and tilt of the slopes are also used to compute the weighted sum that stands for the susceptibility index. Herein the deterioration susceptibilities fit within the interval 54 to 99 (the full interval ranges from 6 to 160).

The ADS index, which considers the factors (see Table 3):

- a) type of deterioration (rock fall, landslide, toppling and creep);
- b) length of the deteriorated slope;
- c) volume of the slided rock material;
- d) dimension (estimated weight) of the major blocks.

All these factors can be evaluated and classified very quickly during the field surveying and should be photographically recorded in order to make possible the relative analysis of the series of sites. This relative evaluation is necessary if the surveying is discontinuous and performed by several operators.

Table 3 – Indices of Actual Deterioration of Slopes (ADS), Rock deterioration Assessment (RDA) and transformed RDA (RDA+e). Legend for the factors of ADS. Type – Rock fall=4; Landslide=3; Toppling=2; Creep=1; the second factor counts with 50%; Length - <5 m=1; 5-10 m=2; >10m=3; Volume – considering the length of 25 meters, <1 m³=1; 1-5m³=2; 5-10 m³=3; 10-100 m³=4; 100-500 m³=5; Major block weight - <20 kg=1; 20-50 kg=2; 50-100 kg=3; >100 kg=4.

Site n.º	Type	Length	Volume	Block dim.	ADS	RDA	RDA+e
2	4	2	4	3	13	64	72
2A	4	1	2	1	8	70	73
3	5	3	4	2	14	66	67
3A	5	3	4	1	13	61	69
8	4	1	2	3	10	53	54
13	4	3	2	1	10	67	75
13A	4	3	2	1	10	66	81
14	4	1	2	2	9	67	75
17	5	2	3	3	13	69	72
18	5	3	4	2	14	82	83
19	6	3	5	4	17	83	86
19A	6	3	5	4	19	90	98
20	6	3	5	4	18	78	87
20A	6	3	5	4	18	85	86
21	5	3	5	3	16	84	99
25	5	3	4	3	15	77	78
25A	5	3	4	2	14	66	69
25B	5	3	4	3	15	75	78
26	5	3	4	3	15	65	66
27	1	2	4	2	9	65	68
29	1	2	4	3	10	62	70
34	6	3	5	3	17	75	78
39	5	3	6	3	17	79	80
45	1	3	3	3	10	63	66

If the RDA is modified to include the parameter e) which emphasises the role that the major joints or foliations play in the cases of rock fall and in some cases of landslides, the transformed RDA (RDA+e) shifts to higher values. The classes that were used for the new index have been maintained as they are used when the parameter is the classical RDA. In this case study only three sites (13A, 20 and 39) ought to be considered as shifted from the 4th to the 5th classes. There are clearly sites where the deteriorated type is in the group of the rock fall.

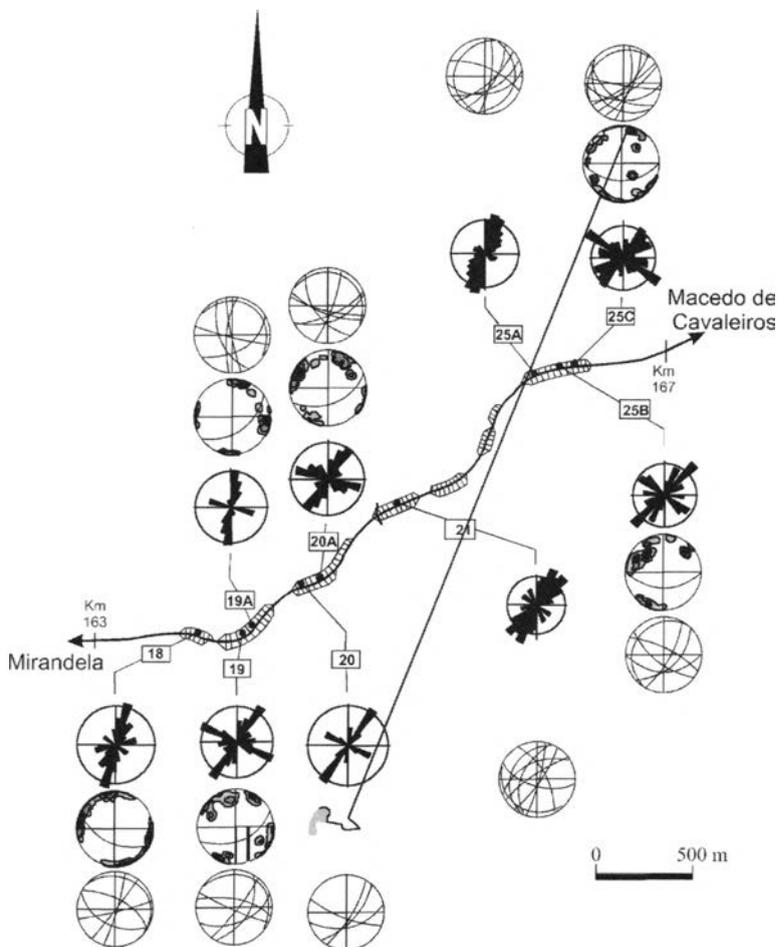


Fig. 1 – Segment of the highway between sites 18 and 25. The set of three stereograms made for each side shows a) density of the joint families; b) the density of joint plus the attitude of slope and c) attitude of major families of discontinuities (adap. SÁ, 1999).

In fact, it could have been an attempt to emphasise the role of the pair of the discontinuities that are more influential for the movement of the rock material.

It was expected that the reformulated RDA as RDA+e would give a better picture of the potential deterioration of the slopes.

The sites where the deterioration has been more active (consequently the RDA and ADS have the higher values – Tables 1, 2 and 3) have been telescoped from the overall map with the discontinuities (Fig. 1).

In this map are shown all the geometric features that should be considered in the processes of mechanical degradation of the rock slopes namely the azimuth and the dip of the slope, the major foliation of the metamorphic rocks, the geometry of the families of joints. The stereograms might be used to propose which are the joint sets potentially active, namely to induce the sliding of blocks controlled joints that make dihedral angles plunging to the slope.

CONCLUSIONS

The surveying of the IP4 highway slopes along a stretch of 20 km was intended for its detailed geological and geotechnical analysis, namely for the diagnosis of their instability. This survey gives a sound picture of the discrete sections with sizeable potential of risk. The risks are to be assigned to multiple classes, degrees of instabilities, and mechanisms of deterioration.

The evaluation of the susceptibility for deterioration and the also the assessment of the actual deterioration have been made with very simple techniques and with the minimum equipment. The cost of a study like this is to be taken into account. Furthermore, the factors used to evaluate the Rockslope Deterioration Assessment (RDA) rely on the observation that fairly trained geologist or engineer is qualified to carry on.

It is clearly emphasised that the mechanisms of deterioration and the grading of instability are strongly dependent from the geometry of the slope and from lithological and tectonic parameters. So, the expert geological identification and the forecasting of the behaviour, consequent to the petrographic, structural and weathering parameters, ought to be taken into account for the construction and maintenance of the road slopes – techniques and costs. They help to choose the geometry of the slope as well as their monitoring devices, the drainage and sustenance systems and the remediation techniques.

The evaluation of the deterioration susceptibilities of the highway slopes was made using the method RDA modified with a factor relative to the dihedral angle between the “slope plane” and the major discontinuity(ies) of the rock mass.

This geotechnical survey, which was made ten years after the highway construction, adds a good amount of information to the pre-construction surveying and to the forecast made five years after the road opening.

It is made clear that the most serious situations of deterioration occur in the high way slopes excavated in the volcano-sedimentary rock units (quartzphyllites with interlayered metarhyolites, namely where they show sulphides of exalative parentage), and also where the attitude of the mesoscopic tectonic structures is adequately oriented to maximize the deterioration mechanisms.

It is also clear that the southern slopes of the highway were properly shaped with steeper dips and without the “stairs” that appear to have been “carved” as a “mirror” image of those carved on the northern slopes, where they are really necessary.

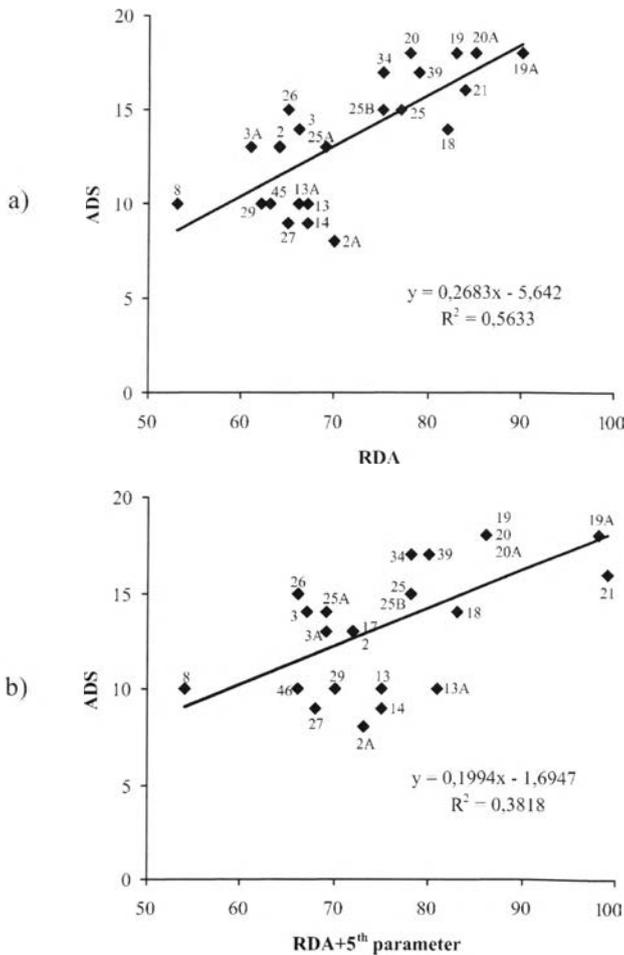


Fig. 2 – Correlation between a) on the top the index of Rockslope Deterioration Assessment (RDA) and the index of Actual Deterioration of the Slopes (ADS) and b) on the bottom the modified index of Rockslope Deterioration Assessment (RDA+e) and the index of Actual Deterioration of the Slopes (ADS).

If the pre-construction detailed and expert geological-geotechnical surveying is apt to optimize the road project, as well as its construction and maintenance, the prograding of the deterioration can be minimized if the new findings are incorporated in the "remediation prescription". This is much so as one takes into consideration the assessment of the parameters visualized on the rock materials detached from the slopes after the first decade of the slopes life.

In fact, it is here shown that the prospected vulnerability evaluated on the basis of the morphology of the slope, rock types, weathering degrees and the mechanical discontinuities of the rock units is positively correlated with the dimensioned rock masses detached from the highway slopes ($ADS=0,26RDA-5,64$ for an $R^2=0,56$) (Fig. 2).

REFERENCES

- BASKERVILLE, C. A.; LEE, F.T. & RATTÉ, C. A. 1993. *Landslide Hazards in Vermont*. U.S. Geological Survey Bulletin 2043, USGS, Denver. 23p.
- BETRÁN-MORENO, L. 1990. Characteristics of the mass movements in road slopes in Colombia. *6th Int. IAEG Congress*, Balkema, Rotterdam, IV: 2093-2098.
- GONZÁLEZ DEL VALLEJO, L. I.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. & OTEO, L. 2002. *Ingeniería Geológica*. Cap. 9: Taludes, pp. 430-487. Pearson Educación, Madrid.
- KOUKIS, G.; TSIAMBAOS, G. & SABATAKAKIS, N. 1997. Landslide movements in Greece: Engineering geological characteristics. In Marinos, Koukis, Tsiambaos & Stourmaras (eds). *Engineering Geology and the Environment*: Balkema, Rotterdam, II: 789-792.
- NICHOLSON, D. T. & HENCHER, S. 1997. Assessing the potencial for deterioration of engineered rockslopes. In Marinos, Koukis, Tsiambaos & Stourmaras (eds). *Engineering Geology and the Environment*,. Balkema, Rotterdam, II: 911-917.
- OLIVEIRA, R. 1979. *Taludes naturais e de escavação*. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 23p.
- PERRY, J. & O'REILLY, M. P. O. 1990. A survey of slope condition on British motorways. *6th Int. IAEG Congress*, Balkema, Rotterdam, IV: 2271-2278.
- RIBEIRO, A.; PEREIRA, E. & DIAS, R. 1990. Alloctonous Sequences. In Dallmeyer, R.D. & Martinez Garcia, E. (Eds). *Pre-Mesozoic Geology of Iberia*, Springer Verlag, Berlin: 220-236.
- SÁ, A. A. 1999. *Deterioração e requalificação de taludes em unidades tipificadas de metavulcanitos e metassedimentos (Mirandela – Macedo de Cavaleiros, NE Portugal)*. MSc. Thesis, unpubl., FCTUC, Universidade de Coimbra, Coimbra. 241p.
- SÁ, A.A., PIRES, C.A.C. & PORTUGAL FERREIRA, M.R. 2000a. Refined lithostratigraphy from the Lower Alloctonous Unit westwards of the Morais Massif (NE Portugal). In: *Variscan-Appalachian dynamics: the building of the Upper Paleozoic basement*. Basement Tectonics 15, A Coruña, Spain, Program and Abstracts: 275-277.
- SÁ, A.A.; PIRES, C.A.C. & PORTUGAL FERREIRA, M.R. 2000b Deterioration and Remediation of Hgway Slopes on Ophiolitic Rocks: case study on NE Portugal. *31st International Geological Congress*, Rio de Janeiro, Brazil. CD-Rom Abstracts.
- SOBRINHO, R. R. S. 1988. Uma abordagem em direção à previsão de movimentos de massa – o caso da Rio-Santos (Trecho Itaguaí–Conceição de Jacaré). *Geociências* 7, São Paulo: 43-76.
- YINGQING, Z. 1994. A expert system for the prediction of slope stability. *7th Int. IAEG Congress Lisboa*, Balkema, Rotterdam, V: 4483-4488.
- ZIKA, P. 1990. Engineering-geological evaluation of the rock cuts stability along the D1 highway. *6th Int. IAEG Congress*, Balkema, Rotterdam, IV: 2423-2427.

ÍNDICES REMISSIVOS

PALAVRAS CHAVE

água subterrânea	93	estudos geotécnicos	157
Alqueva	171	etringite	287
aspectos turísticos	299	exsudações	287
aterro	179	factores de deterioração	367
aterro sanitário	107	fissuração	263
aterros de resíduos	237	Foz-Coa	299
barreiras de confinamento	237	fragmentos	367
caracterização in situ	333	fundação de barragem	171
carbonato de cálcio	287	fundações	145, 157
cemitério	93	gel	287
Ciência Viva	317	Geoengenharia	199
classificação	355	Geologia de Engenharia	145, 199, 251
Coimbra	333	geometria fractal	79
condutividade hidráulica	237	georrecursos	317
construção cívil	299	granito	263
contaminação	93	hidrogeologia	93
contaminação salina	275	hidrogeologia urbana	133
correlação linear	237	impacto ambiental	93
deslizamento	211	instabilidade	333, 355
deterioração	275	Lisboa	133
diapiros	145	lixeira	79
dispositivos tripotenciais	107	maciços graníticos	79
ensaios	145	materiais de construção	275
escavabilidade	251	mecanismos de ruptura	345
escorregamento	211	meteorização	263
escorregamento planar	345	método eléctrico de resistividade	107
estabilidade	367	mineralizações de urânio	121
estruturação	227	Miocénico	133
estudos de sítios	157	modelo hiperbólico	227

monitorização	107, 185	retroanálise	345
multi-scale analysis	79	riscos naturais	211
ordenamento	121	rocha ornamental	263
património geológico	317	rochas carbonatadas	333
pedreira	299	rochas vulcano-sedimentares	367
planta geológica-geotécnica	171	Setúbal	317
problemas geotécnicos	133	solo residual	227
propriedades físicas	333	solos e rochas	145
propriedades físico-mecânicas	263	solos finos portugueses	237
propriedades geotécnicas	237	sustimento	185
prospecção	185	taludes	355
prospecção e ensaios	157	taludes artificiais	367
radioactividade natural	121	túneis não urbanos	199
reações álcalis-agregado	287	túneis urbanos	199
reconhecimento de superfície	185	unidades líticas	333
reconhecimento do maciço	185	velocidades sísmicas	251
redes de fracturas	79	xisto ardósífero	299

AUTORES

A. P. Silva	157	Jorge Neves	171
A. S. Gonçalves Antunes	275	José A. Ganihlo Lopes Velho	145
A. Veiga	145	José A. Rodrigues - Carvalho	157, 345
Alberto da Silva Lima	93	José Carlos Kullberg	317
Alcides José Castilho Pereira	121	José Manuel Matos Dias	121
Alexandre Oliveira Tavares	333	Luís Gonçalves	171
Ana I. A. S. S. Andrade	107	Luis José Andrade Pais	227
Anabela Veiga	145	Luis José Proença Neves	121
António José Mendes Roque	237	Luis M. Ferreira Gomes	299
António L. Almeida Saraiva	355	Luis M. Sousa	263
António M. Nunes Mateus	79	M. A. Gonçalves	79
Artur Abreu e Sá	367	M. S. Rocha	317
Carlos Alberto Simões Alves	275	Manuel Maria Godinho	121
Carlos Augusto Coelho Pires	367	Manuel Oliveira e Silva	133
Celso Lima	185	Maria Alexandra Chaves	157
Cláudia S. F. Marques Amado	145	Mário Quinta Ferreira	145, 251
Fernando Ferreira	171	Martim R. Portugal V. Ferreira	367
Fernando Monteiro Santos	79	Nadir Plasencia	185, 199
Fernando Ornelas Marques	79	Nelson E. Viegas Rodrigues	107
Fernando P. Ortega Figueiredo	251	P. C. Lamas	157, 345
Fernando Pereira Noronha	287	P. Gabriel de Almeida	299
G. Barbosa de Almeida	133	P. Pamplona	93
Isabel Fernandes	287	Paulo Hagendorn Alves	211
Isabel Moitinho de Almeida	133	Paulo Sá Caetano	317
J. C. A Gonçalves	93	Pedro Cabral Santarém Andrade	355
J. M. S. Matias	275	Rogério Bordalo Rocha	317
J. Pamplona	93	S. Antunes	93
João Lopo Mendonça	133		

