

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA  
Coordenação

# A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

## PLANTA GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DA FUNDAÇÃO DA BARRAGEM DE ALQUEVA

J. NEVES<sup>1</sup>, F. FERREIRA<sup>2</sup> e L. GONÇALVES<sup>3</sup>

**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.

<sup>1</sup> Geólogo – EDP Produção EM, Engenharia e Manutenção, S.A., jorge.neves@em.edpproducao.edp.pt

<sup>2</sup> Eng.º Geólogo – fferreira@hidroprojecto.pt

<sup>3</sup> 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,  $v$ ,  $\phi$  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.

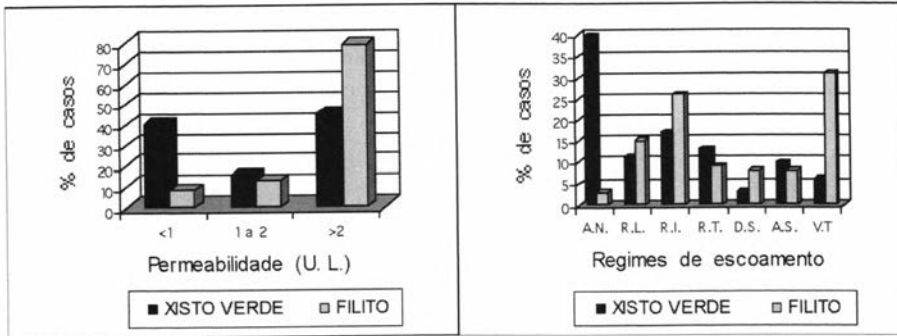
Quadro I – Zonamento geotécnico do maciço rochoso (adaptado de [2]).

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

174

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 <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
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 Intermediário; 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 são 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°-80°W, 30°-45°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 são a 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

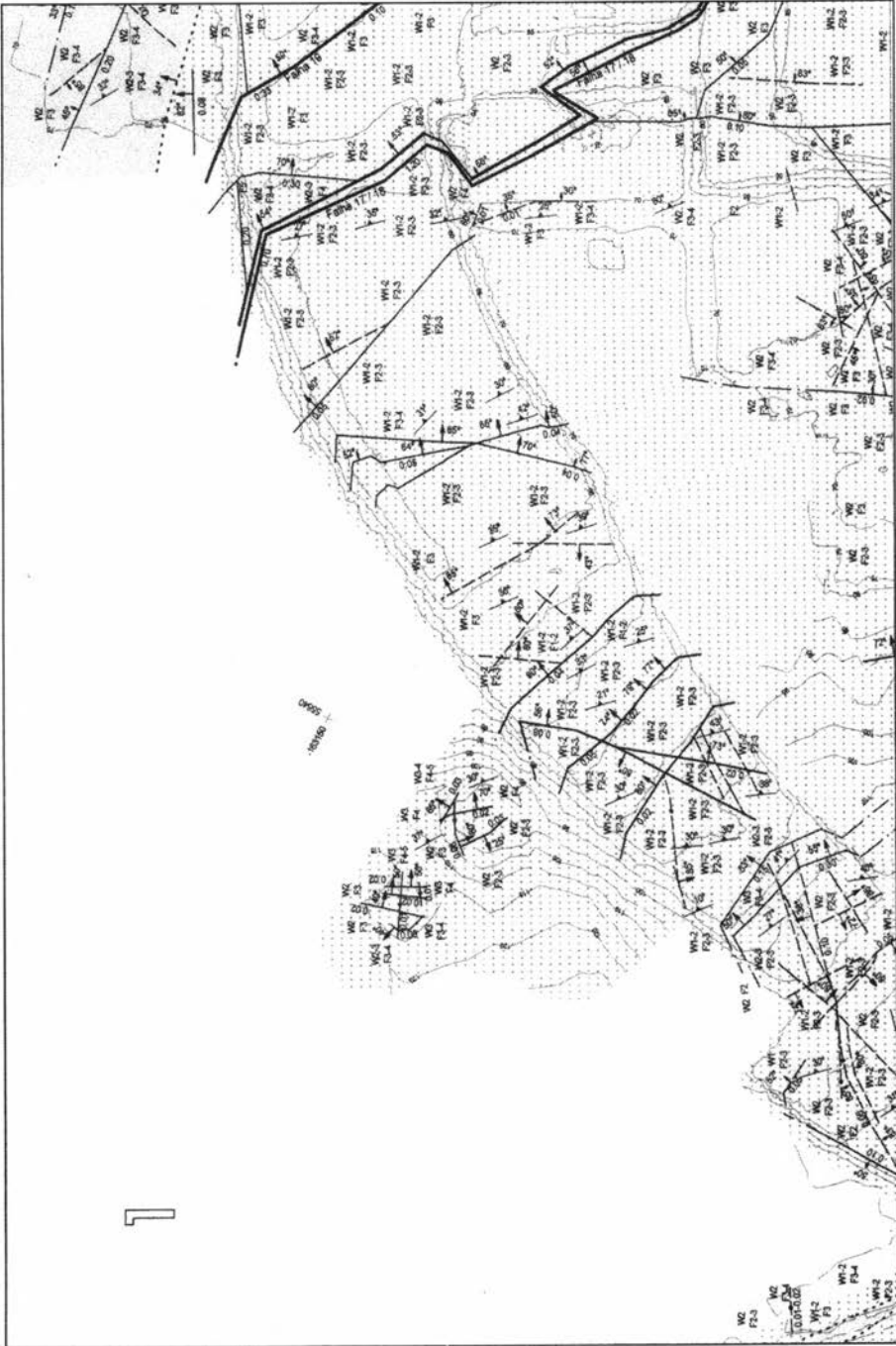
### ESTRUTURAS GEOLÓGICAS

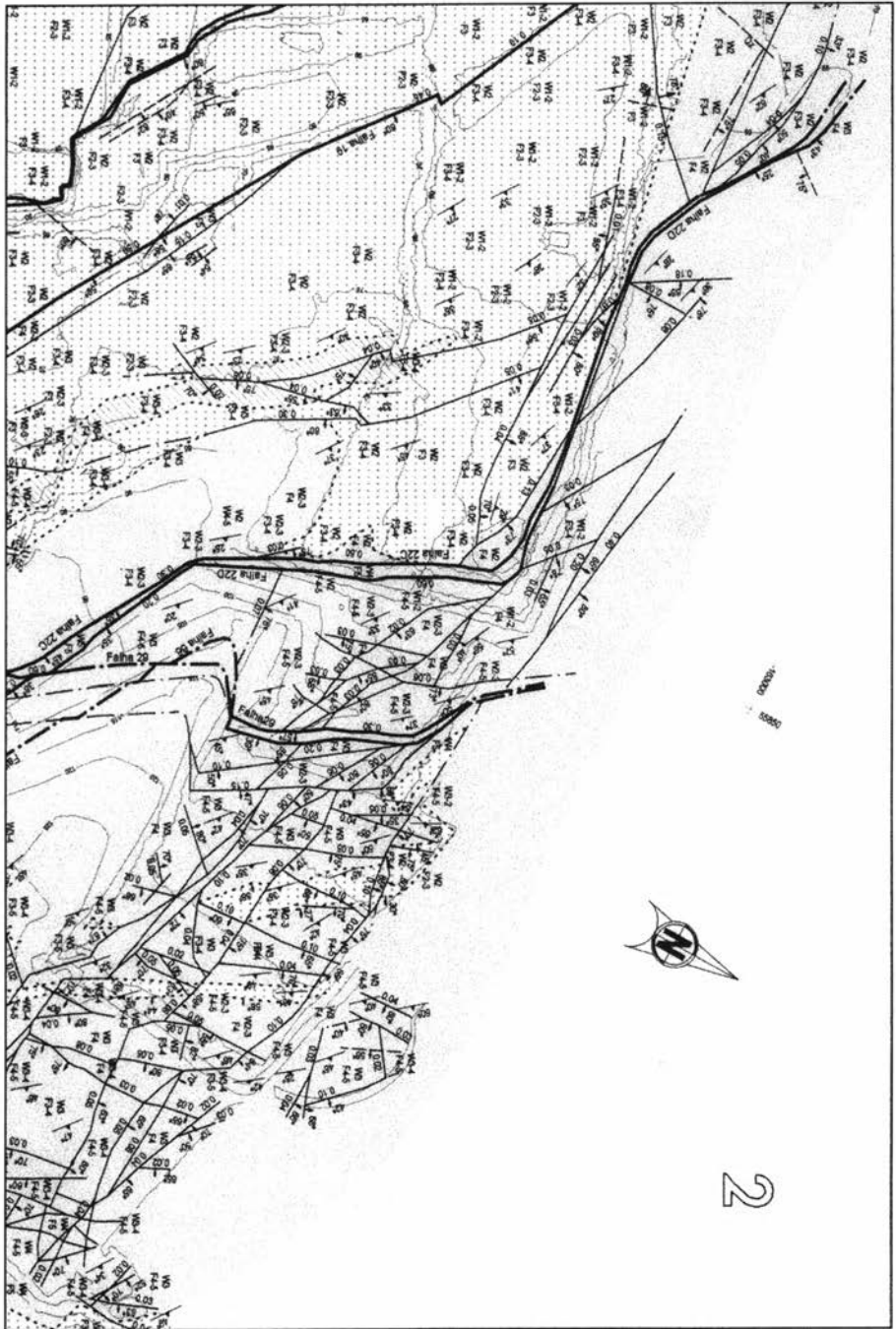
-  Limite geológico
-  Falha - Traçado observado, com indicação de pendor e possança real (em metros)
-  Falha - Traçado observado, com indicação de pendor vertical e possança real (em metros)
-  Falha - Traçado provável (interpolado ou extrapolado)
-  Diaclase extensa (>10m), com indicação de pendor e da espessura do preenchimento
-  Xistosidade

### ESQUEMA DE LIGAÇÃO DAS FOLHAS

180

1	2
3	4





2



