

O presente artigo representa, por isso, um passo doutrinal que, em nosso entender, é muito importante, ao convocar áreas diferentes do "Saber" como a Geografia Física Aplicada e a Engenharia Informática (Figura 2), articuladas no sentido de identificar, monitorizar e, no fundo, gerir de modo optimizado *Sistemas Integrados de Análise de Risco (SIAR)*, conciliando as tarefas clássicas de trabalho de campo e os exercícios a que o geógrafo recorre em sede de manifestação dos fenómenos, a produção de cartografia de risco que daí decorre, com recurso às mais modernas ferramentas e tecnologias de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e a utilização de equipamento *wireless*, moderno, sofisticado e de grande fiabilidade para monitorizar áreas classificadas como "risco elevado".

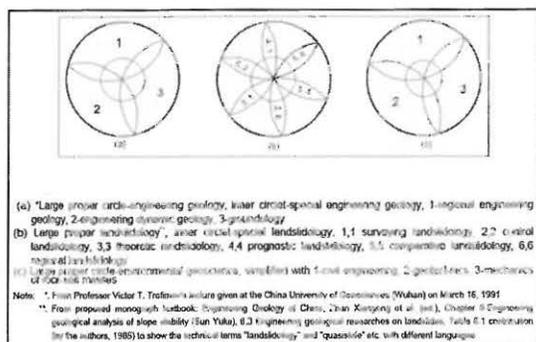


Figura 2
Esquema conceptual ilustrando a interdisciplinaridade requisitada pela análise fenomenológica nos estudos sobre "Landslides" (de acordo com o estudo de T. YAN, C. ZHOU & S. YANG, 2001, p. 35)¹.

Se esta estratégia tivesse sido já implementada no terreno, na infra-estrutura em causa, os autores deste documento não podem deixar de se questionar se as consequências do referido acidente, bem como as dos dois outros que em menos de um ano lhe sucederam, não poderiam ter sido evitadas...

1. A Geomorfologia no estudo dos Riscos Naturais

O largo espectro que caracteriza o estudo dos Riscos Naturais tem na componente geomorfológica uma das fatias mais importantes. Dos preocupantes problemas relacionados com a Geomorfologia fluvial, referindo-se por exemplo, as cheias e inundações rápidas em espaços naturais, mas principalmente

¹ Sublinha-se o facto de estes autores terem introduzido uma expressão, de algum modo, inédita que designaram por "Landslidity", (ver Referências Bibliográficas).

urbanos, onde as vulnerabilidades agravam as consequências dos fenómenos, aos problemas relacionados com a morfoestrutura e a morfodinâmica das vertentes, são inúmeros os perigos e os riscos a que se expõem as sociedades humanas. A segunda das situações referidas, na qual se enquadra o estudo de caso que aqui se apresenta, está amplamente relacionada com problemas de instabilidade de taludes que revelam características particulares ao nível da morfoestrutura e da morfodinâmica, factores que, por outro lado, são frequentemente alterados pela actividade antrópica (BRUNSDEN e PRIOR, 1984; BROMHEAD e IBSEN, 1997; DIKAU *et al.*, 1997, e BURNS, 1999). Uma vertente é sempre um caso particular de equilíbrio morfodinâmico e dentro dela, cada sector comporta-se de forma específica sendo do resultado orgânico e harmónico das partes que depende o equilíbrio (entendido com balanço entre estabilidade/instabilidade) do todo. Entendemos, porém, que existem leis com suporte físico (morfodinâmico) que podem ajudar a compreender o que designámos por "Princípio de Equilíbrio Móvel das vertentes" (SANTOS, 2002) e que, de um modo sucinto mas sistémico se pode traduzir pela relação apresentada na Figura 3.

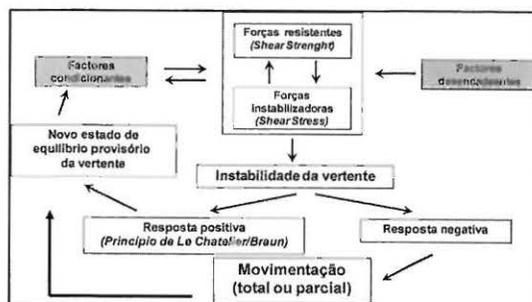


Figura 3
Princípio de Equilíbrio Móvel das Vertentes (SANTOS, 2002a, revista e actualizado).

1.1. Factores condicionantes e Factores desencadeantes

São vários os autores que têm vindo a dedicar grande parte da sua atenção à classificação de factores que intervêm, directa ou indirectamente, no balanço estabilidade/instabilidade das vertentes. Autores como TERZAGHI, HANSEN e FERRER GIJON, influenciaram de forma decisiva a literatura da especialidade, contribuindo para o que consideramos ser um dos mais importantes desideratos da Ciência, ou seja, a definição de uma linguagem coerente e bem emoldurada por um glossário de termos e por um modelo de conceitos em que todos os intervenientes se revejam e, sobretudo, se entendam. Da autoria do *Technical Committee on Landslides* (Figura 4), este documento

internacionalmente aceite, constitui uma das mais importantes ferramentas de inventário, análise e classificação dos movimentos de terreno, em geral, e dos de vertente, em particular.

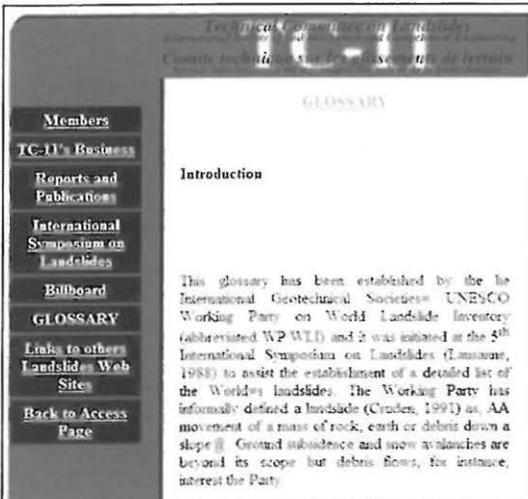


Figura 4
Glossário de "Landslides"¹.

É já clássica a dual segmentação de factores/variáveis, a maioria das quais parametrizáveis, que influem na relação de equilíbrio das vertentes; por um lado, os que resistindo à instabilização concorrem para assegurar a estabilidade da vertente - Factores condicionantes (Quadro I) e, por outro lado, os factores que podem desencadear situações de instabilidade - Factores desencadeantes (Quadro II). É da interacção entre ambos que resulta um balanço, sempre provisório, entre forças resistentes (*Shear strenght*) e forças instabilizadoras (*Shear stress*) o qual se traduz

na relação de equilíbrio dinâmico das vertentes, em geral, e de um determinado sector da vertente, em particular (cfr. Figura 3).

Quadro I

Factores que condicionam a estabilidade das vertentes

FACTORES CONDICIONANTES		
CATEGORIA	TIPO	VARIANTE
ESTRUTURAS	LITOLOGIA	
	ESTRATIGRAFIA	
	TECTÓNICA (DUCTIL E FRACTURANTE)	ACTIVA INACTIVA
	PENDOR	
GEOTÉCNICOS	PLANOS DE DESCONTINUIDADE (ESTRATIFICAÇÃO/MIXTOSIDADE)	
	SEDIMENTOLÓGICOS (RANALOMETRIA E ESPESURA DE DEPÓSITOS E/OUSANTOS DE ALTERAÇÃO)	
	PROPRIEDADES TENSO-DEFORMACIONAIS	
	RESISTÊNCIA DE MATERIAS	
MORFOLOGÍCOS	PIEZOMETRIA	
	DENSIDADE	
	VOLUMETRIA	
HIDROLÓGICOS	NÍVEIS E SUPERFÍCIES DE APLANAMENTO	
	DICLINES (FORMA E VALOR), RUPTURAS DE DECLIVE	
BIOGEOGRÁFICOS	PERFILS DE VERTENTES	
	PROXIMIDADE DE TALUÇOS	
	OCCUPAÇÃO DE USO DO SOLO	
	PERFE DE VEGETAÇÃO	

Quadro II

Factores desencadeantes de instabilidade nas vertentes

FACTORES DESENCADEANTES		
CATEGORIA	TIPO	VARIANTE
CLIMÁTICOS	DURAÇÃO DO PERÍODO SECO	
	PERÍODOS DE RETORNO	PRECIPITAÇÃO MÉDIA QUANTO E CÍCLICO
METEOROLÓGICOS	PRECIPITAÇÃO	INTERMITENTE - EPISÓDICA - PLUVIAL CONTÍNUA - GELADA - PLUVIAL
	REGIME E DÉBITO FLUVIAL	
HIDROLÓGICOS	DINÂMICA HIDROLÓGICA	INFLUÊNCIA DE TALHA TRABALHO DE TALHA
	OPERAÇÕES ENCAIXAS RAPIDAS	DEBILIDADE LÍQUIDA
	OSCILAÇÕES PRECÍPITAS	
	EDUÇOS	DIRECÇÃO, VELOCIDADE, INTENSIDADE E FREQUÊNCIA DOS PROCELOS
OCEANOGRÁFICOS	OSCILAÇÕES EUSTÁTICAS (GLOBAIS OU LOCAIS)	
	OSCILAÇÕES E AMPLITUDES TÍDAS	
OUTROS	ENERGIA MECÂNICA DAS GUEIAS E CORRENTES SUBTERRÂNEAS	
	ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS DOS SISTEMAS TERRESTRE (EROSÃO E FORTIFICAÇÃO)	
	ALTERAÇÕES NÍVEIS E SUPERFÍCIES DE APLANAMENTO E PLACAS DE CONTAÇÃO (PIEZOMETRIA E OUSANTOS DE ALTERAÇÃO)	
	DESENVOLVIMENTO URBANO PARA ÁREAS DE VERTENTES INSTÁVEIS E PLANEJAMENTO DE RECONSTRUÇÃO	
	ALTERAÇÕES OU ABANDONO DAS PRÁTICAS AGRÍCOLAS	
	DESEMPLEAMENTO E FORTIFICAÇÃO FLORESTAIS	
	APLICAÇÃO DE CORDOES ESTÁTICOS ESTABILIZADORES	

O estudo dos factores/variáveis que intervêm no desencadeamento de manifestações de instabilidade em vertentes e taludes deve ser acompanhado por um intenso e detalhado trabalho de inventário que permita a correcta leitura dos contextos geológico e geomorfológico, meteorológico-climático e ambiental que caracterizam os factores condicionantes e os factores desencadeantes. A sublinhar a importância da identificação do maior número possível de factores intervenientes nos movimentos de vertente e, tal como demonstraram, em estudo recente, TURCOTTE, GUZZETTI, RECHENBACH e MALAMUD (*in* HUNGR, FELL, COUTURE e EBERHARDT, 2005), o estudo de fenómenos tão complexos como os "Landslides", deve contemplar aspectos qualitativos e quantitativos sobre a sua origem, através de dados relativos à sua distribuição espacial, em termos absolutos e de frequência relativa, em função do tipo de

¹ No texto inicial do qual se apresenta um excerto em Inglês, pode ler-se que "...Este glossário foi criado pela Sociedade Internacional de Geotécnicos - Working Party on World Landslide Inventory (abreviado WP / WLI - UNESCO) e foi iniciado no 5.º Simpósio Internacional de "Landslides" (Lausanne, 1988) para auxiliar o estabelecimento de uma lista detalhada de "Landslides" de todo o Mundo. O Grupo de Trabalho definiu informalmente um "Landslide" partindo da ideia de CRUDEN (1991) como "A circulação de uma massa de rocha, terra ou detritos ao longo de uma superfície com declive". Subsidiência de grandes volumes de solo e a-avalanches de neve, por exemplo, estão excluídas, mas os fluxos de detritos, por exemplo, são incluídos nesta classificação. Para garantir uma comunicação adequada entre os grupos que trabalham em diferentes idiomas, o WP/WLI assegurou uma relação de termos, conceitos e métodos, passíveis de tradução para, por exemplo, chinês, francês, alemão, espanhol e russo, acordando que a língua inglesa seria a expressão original dos mesmos (WP/WLI, 1993). Apesar disso este documento contém duas versões originais, em Inglês e em Francês, da autoria de CRUDEN e de LEFEBVRE (WP/WLI, 1993), modificadas e adaptadas para definir o *Multilingual Landslide Glossary* (WP/WLI, 1993)".

factores desencadeantes. Defendem aqueles autores, que alguns casos concretos que têm sido objecto do seu estudo, por exemplo, os que tiveram por base o inventário de três contextos de ocorrência de "Landslides", evidenciam "... uma estreita ligação entre a relação frequência/área factual e a sua probabilidade de ocorrência "função de densidade", definida com base numa distribuição gama-inversa a três parâmetros".

1.2. Caracterização física da região vestibular do Rio Tua com base na Cartografia Geológica e Geomorfológica

1.2.1. Geologia

É reconhecida a elevada complexidade geológica de Trás-os-Montes em sectores como os Maciços de Bragança-Vinhais e de Morais. Junto à foz, o vale do Rio Tua revela um contexto geológico passível de menos equívocos quando comparado com os exemplos anteriores, mas não deixa de também características de alguma complexidade assina-

ladas evidenciar ladas por uma estrutura de relevo definida nos materiais dos complexos Autóctone e Alóctone e "Super Grupo Dúrico-Beirão" e nas antiformas de Vila Real - Carviçais e de Lamego-Penedono-Escalhão (Figura 5). Esta complexidade é sublinhada pelos múltiplos contactos litológicos anormais promovidos por acidentes tectónicos, fracturantes e dúcteis (Figura 5). Com génese recente (Plistocénico superior), resultante da progressão para Leste de um processo de "Onda de incisão fluvial" (SANTOS, 2005) que deverá ter envolvido a captura de vários sectores vestibulares de pequenos cursos de água, afluentes directos ou indirectos do Rio Douro, e de bacias endorreicas intramontanhas, a morfologia do vale do Rio Tua, a jusante do Cachão, caracteriza-se pela pronunciada incisão vertical das linhas de água, independentemente de se tratar de relevos talhados em granitóides ou em rochas metassedimentares. Esta situação está bem marcada na paisagem, na qual se destacam escarpas de elevados declives, quase sempre sub-verticais (Figura 6), anunciando processos de instabilidade potencial nas vertentes do vale onde se localiza a linha ferroviária do Tua.

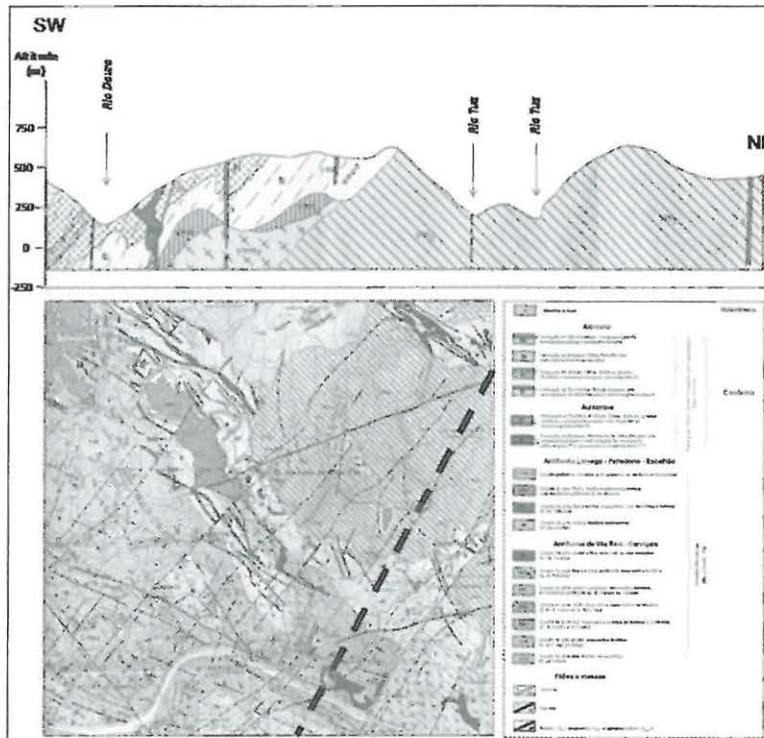


Figura 5

Corte Geológico representativo do sector vestibular do Rio Tua, próximo da área (assinalada) onde ocorreu o acidente ferroviário de 12 de Fevereiro de 2007. Modificado a partir de BERNARDO SOUSA e DUARTE SEQUEIRA (1987), *Carta Geológica de Portugal, folha 10 - D (Alijó)*, 1/50 000.

OBS.: A legenda da carta apresenta-se de forma legível em anexo ao texto no final do documento. A escala vertical do corte não tem exagero, ou seja, é igual à escala horizontal.

1.2.2. Geomorfologia

O conhecimento geomorfológico de qualquer região constitui um importante requisito no sentido da parametrização de variáveis morfoestruturais e morfo-dinâmicas aplicada ao estudo dos riscos naturais. Em particular, a elaboração de cartografia geomorfológica permite sintetizar os principais aspectos a reter para a caracterização física do espaço, disponibilizando a infor-

mação sob a forma gráfica em documento de mapa. São vários os exemplos de estudos que revelam linearidade da correlação entre a correcta "análise e avaliação do risco" e o estudo pormenorizado de base geomorfológica que lhe fica a montante, destacando-se o recente trabalho de REICHENBACH, *et al.*, na obra de GLADE, ANDERSON e CROZIER, (2004).



Figura 6
Enquadramento morfoestrutural do Vale do Rio Tua a jusante do Cachão.
(Fonte: *Google Earth*, escala vertical com exagero de 3 vezes).

No âmbito da preparação de uma dissertação de Doutoramento¹, a bacia do Rio Tua foi objecto de um estudo detalhado ao nível da caracterização geomorfológica, em particular no sector a jusante de Mirandela até à sua confluência com o Rio Douro. Esta caracterização, que reúne aspectos de paleogeografia (paleoambientes, paleotraçados fluviais e interpretação geomorfológica de sectores específicos daquela bacia fluvial) ficou plasmada em documentos cartográficos de pormenor, entre os quais se inclui a caracterização geológica e geomorfológica do sector vestibular do Rio Tua (Figura 7), onde ocorreu o acidente ferroviário de 12 de Fevereiro de 2007. O embutimento das formas a partir da Superfície Fundamental, da qual existem actualmente apenas pequenos relevos residuais, testemunho de uma superfície aplanada em torno dos 800-900 metros de altitude (Figura 7), bem como o desenvolvimento de formas alveolares, típicas da morfologia granítica, constituem traços da personalidade geomorfológica desta região da bacia do Tua, que complementam as informações anteriores e que, em linhas muito gerais, permitem caracterizar o conjunto a área numa perspectiva geomorfológica.

2. O acidente de 12 de Fevereiro de 2007, na linha do Tua (NE de Portugal)

No dia 12 de Fevereiro de 2007, ao final da tarde, ocorreu um acidente ferroviário na Linha do Tua que vitimou três dos cinco ocupantes de uma das composições do Metro-Mirandela. Segundo fontes oficiais da REFER, de início, a interpretação dos factos referia como causa do acidente um deslizamento de terras que arrastou blocos de rocha granítica que, no momento em que a composição circulava naquele local, com ela teriam colidido com forte impacto implicando a sua queda pela vertente até ao fundo do vale. Desta interpretação ressaltam, desde logo, algumas dúvidas:

- 1) O acaso e o infortúnio explicariam o acidente?
- 2) Os relatos dos sobreviventes seriam compatíveis com esta interpretação?
- 3) Existiriam marcas de impacto com tinta verde (da composição) nos blocos rochosos?

Em relação à primeira questão, apesar de possível parece-nos pouco provável tal acontecimento. Em todo o caso, a ter assim ocorrido, esta leitura permitiria um cómodo refúgio na tradicional desculpa do tipo "não havia nada a fazer, foi uma fatalidade", muito conveniente em contextos de apuramento de respon-

sabilidades, civis e, porventura, criminais. Quanto à segunda questão, é do foro público a manifestação de angústia do maquinista, alguns segundos antes do acidente, o que indicia um prenúncio de algo de grave que estaria para acontecer, facto em relação ao qual o condutor terá pressentido que nada poderia fazer para o evitar. Tal significa que, algo já teria ocorrido antes de a composição chegar ao local, km 7 da linha. Por fim, e mais importante, mas também mais razoável, no caso de os blocos rochosos terem atingido directamente a composição circulante, eles deveriam ter marcas de tinta verde. Ora, após nos termos deslocado ao local poucas horas após o acidente pudemos confirmar que tais marcas não existiam e este facto foi documentado em diversas fotos, algumas das quais adiante se revelam.

Existem interpretações alternativas? Sim, existem e são coerentes científica e factualmente. Na madrugada desse mesmo dia ocorreu em território nacional um abalo sísmico com magnitude de 6,8^o com epicentro a SW de Sagres nas proximidades do Banco de Gorringe, abalo que foi sentido em toda a Península Ibérica e cujos registos deixam adivinhar a libertação de grande quantidade de energia elástica dissipada ao longo de falhas de transferência, pelo menos, das mais importantes. Conhecendo o contexto geológico e geomorfológico regional de Trás-os-Montes, onde existem importantes acidentes tectónicos, parece lícito pensar que a dissipação de energia por alguns dos principais acidentes regionais, poderá ter concorrido para a instabilização de alguns taludes, deixando alguns blocos rochosos em equilíbrio precário. Por outro lado, os dias que antecederam o acidente revelaram índices de precipitação elevados, facto que seguramente poderá ter ajudado também a instabilizar os materiais areno-argilosos que se encontravam a meia-vertente, a montante dos blocos graníticos rochosos instáveis. Destes factos, decorre a única das interpretações que, em nosso entender, revela coerência e assegura alguma verdade na interpretação das causas do acidente. A instabilização dos sedimentos areno-argilosos, por saturação tornou plástico o seu comportamento, levando a que um mecanismo do tipo *debris-flow* conduziu aqueles materiais ao fundo da vertente. Diz-nos a experiência de terreno, comprovada por análises por diversas vezes efectuadas ao tipo material envolvido em eventos semelhantes, que a morfodinâmica destes eventos e a cinemática que os caracteriza, poderão ter implicado o arrastar de blocos rochosos instáveis que se localizavam na rota de progressão do *debris flow* e terá sido a sua elevada dimensão, peso e volumetria (Figura 8) associados à também elevada velocidade e aceleração dos corpos em movimento que, colidindo com os carris ter-lhes-ão produzido deformações graves afectando a estrutura e a própria contiguidade topológica (conectividade) da ferrovia.

¹ J. G. SANTOS - "As Bacias de Mirandela, Macedo de Cavaleiros e Vilaça-Longroiva"; estudo de Geomorfologia. Dissertação de Doutoramento, FLUC, 2005.

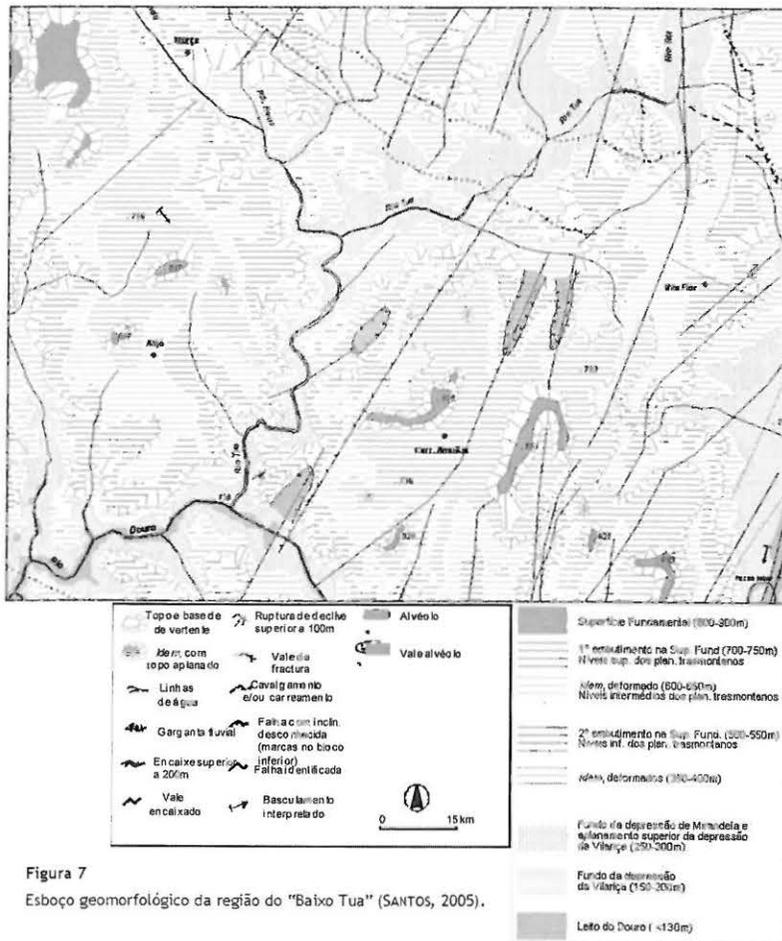


Figura 7
Esboço geomorfológico da região do "Baixo Tua" (SANTOS, 2005).

Estamos em crer que o impacto deverá ter sido de tal forma violento que produziu rupturas nas ligações dos próprios carris deixando a linha suspensa sobre o rio, sem substrato rochoso de suporte. Como será fácil imaginar, ao chegar ao local a composição descarrilou e foi cair no fundo do vale com as consequências conhecidas. Esta interpretação, encontra força de prova nas marcas de choque produzidas pelos blocos rochosos nos carris (Figura 9) e vai ao encontro dos relatos dos sobreviventes ao referirem o grito de angústia do maquinista quando este se terá apercebido (tardamente) de algo de anormal na ferrovia.

É pacífica a conclusão a retirar, ou seja, numa lógica integrada de sistemas de gestão de riscos, a disponibilização de cartografia de riscos geomorfológicos que permitisse a identificação de áreas classificadas com risco mais elevado de instabilização de taludes, complementada pela implementação de um sistema de alerta, prevenção e aviso, teriam concorrido para evitar o acidente. Referimos também que à data da apresentação das conferências que

viriam a dar origem ao texto que agora se apresenta, os autores destacaram publicamente as fortes semelhanças entre os quadros geomorfológicos que caracterizam as linhas do Tua, do Corgo, do Tâmega e, principalmente, do Douro, na qual as vulnerabilidades e, por consequência o risco, são significativamente maiores devido ao volume de passageiros que viajam nesta linha.

3. A importância da Cartografia na Gestão dos Riscos Naturais

Constituindo uma importante rubrica da cartografia de riscos naturais, a elaboração de mapas de perigosidade, vulnerabilidades e de riscos relacionados com movimentos de vertente, tem vindo a evidenciar um franco desenvolvimento, seja em termos metodológicos, seja em termos operacionais, no sentido de dotar as instituições públicas de mecanismos e ferramentas, que em Portugal começam



Figura 8
Pormenores da morfologia e dimensão dos blocos de granito que produziram a deformação dos carris.

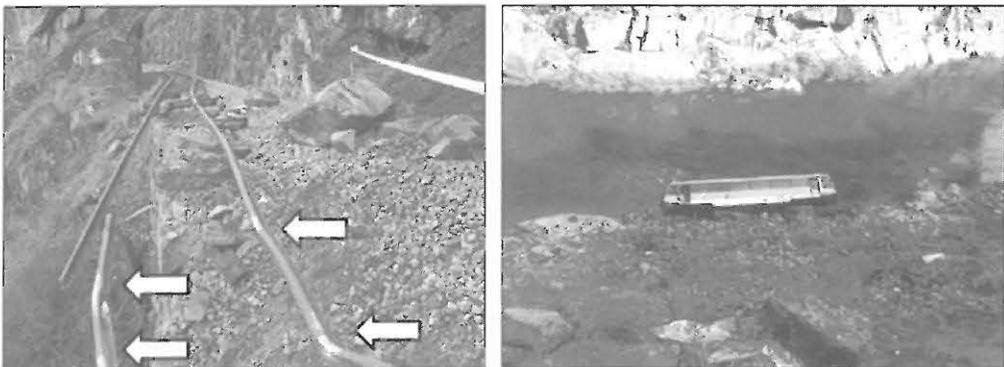


Figura 9
Provas das marcas de impacto dos blocos graníticos directamente nos carris.

já a integrar documentos com força de lei, designadamente quando são vinculados à Protecção Civil. Trabalhos de autores como VAN WESTEN *et al.*, (2002), VAN WESTEN *et al.*, (2005), GLADE (2003) e GLADE *et al.*, (2005), têm servido de referências para a adaptação e uniformização metodológica de critérios a eleger para a elaboração de cartografia de riscos naturais, definindo uma plataforma de trabalho que a breve prazo se pensa poder assumir contornos de aplicação a nível internacional. Em Portugal J.L. ZÉZERE é o geó-

grafo que mais se tem destacado no estudo destes assuntos, integrando desde, por despacho ministerial, uma equipa de trabalho incumbida da missão de " ..elaboração de um guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal para apoio ao processo de decisão na área da gestão dos riscos, abrangendo os vários tipos de riscos naturais e tecnológicos (*Diário da República*, 2.ª série – N.º 210 – 29 de Outubro de 2008).

Na região duriense, desde o Outono-Inverno de 2001 que J.G. SANTOS tem vindo a acompanhar as recorrentes manifestações de instabilidade em vertentes tendo já produzido cartografia de riscos para alguns municípios (como Peso da Régua, Sta Marta de Penaguião e Mesão Frio), utilizando modelos de base empírica e de base estatística, mas sempre com recurso a um inventário e classificação prévia de ocorrências, registadas e georreferenciadas (SANTOS, 2002a e 2002b e SANTOS, 2004). Para a região do Vale do Tua, bem como para infra-estruturas em risco localizadas em contextos geomorfológicos semelhantes, tais como as ferrovias já anteriormente mencionadas, a aplicação destas metodologias para a elaboração de mapas de risco poderia constituir um importante trunfo para o correcto ordenamento do território, aplicados à gestão de riscos e prevenção de acidentes e catástrofes. Quando complementada por tecnologias e sistemas de monitorização e acompanhamento em tempo real da evolução das condições de circulação das composições ferroviárias, a elaboração deste tipo de instrumentos de síntese cartográfica assume particular importância pela aplicabilidade e utilidade prática da informação disponibilizada, num exercício de convergência de saberes e cooperação entre investigadores com diferentes (mas complementares) sensibilidades e formação científica.

4. A componente tecnológica na gestão integrada dos Riscos Naturais

Em virtude das características dos terrenos onde se encontra implantada a generalidade das infra-estruturas ferroviárias, e devido a uma variedade de contextos externos, estas apresentam uma significativa vulnerabilidade a acidentes associados a causas naturais e a actividade humana nos meios circundantes. Tais ocorrências apresentam considerável impacto quer social quer económico, ou mesmo ambiental, estando associadas aos diversos processos de manifestação de instabilidade de vertentes (deslizamentos, desabamentos, fluxos, entre outros).

Para mitigar tais impactos, é de extrema importância desencadear, preventivamente, um conjunto de medidas efectivas que terão de passar pela detecção dos eventos associados aos fenómenos em causa, reforçando, deste modo, uma política proactiva de gestão dos riscos naturais e de actuação em conformidade.

Pelo facto de qualquer política efectiva de gestão de riscos ser fortemente dependente de informação relevante e actualizada, decorrente de um processamento "inteligente" dos dados disponíveis, é crucial o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados (pertinentes e suficientes) a partir das tecnologias de detecção e comunicação disponíveis. O processamento de

dados deverá recorrer à utilização de modelos que permitam identificar e estimar variáveis não mensuráveis e que apresentem, paralelamente, um elevado nível de especificidade subjacente aos fenómenos naturais que são objecto de vigilância. Acresce, inexoravelmente, a necessidade de se dotar o sistema de supervisão das infra-estruturas em causa de meios de gestão de risco que explorem as capacidades inerentes às ferramentas computacionais de apoio à decisão. Dada a indisponibilidade de estruturas físicas de comunicações que se satisfaçam os requisitos subjacentes à arquitectura, a solução a implementar passará inexoravelmente pela integração de dispositivos de comunicação sem fios.

4.1. As Redes de Sensores Sem Fios

As Redes de Sensores Sem Fios (RSSF) podem ser descritas como um conjunto de nós individuais, que operam sozinhos, mas com a capacidade de se agruparem e formarem redes de elevada dimensão, com o objectivo de monitorizar um determinado fenómeno. Cada nó é constituído por um processador simples, ou um conjunto de sensores, alguma memória e um mecanismo básico de transmissão/recepção [1].

O desenvolvimento desta tecnologia apresenta-se muito inovador, e só recentemente tem sido suportado pelos avanços nos circuitos de baixo-consumo, nos processos de miniaturização e nos ambientes sem fios.

O paradigma subjacente às RSSF apresenta diferenças consideráveis quando comparadas com os actuais sistemas de monitorização. Estes últimos limitam-se a registar os valores medidos por sensores, enquanto que nas RSSF os próprios nós oferecem capacidades de processamento, embora com limitações reconhecidas, e de acesso controlado.

4.2. Gestão integrada de Riscos

A partir da identificação das zonas que apresentam problemas de instabilidade das vertentes adjacentes à Linha do Tua, efectuada com recurso a técnicas da Geografia Física, proceder-se à: i) selecção dos sensores mais adequados para a detecção dos fenómenos previstos; ii) definição de uma estrutura em rede que permita receber os dados dos sensores e transmiti-los de forma segura, robusta e com tolerância a falhas; iii) escolha da arquitectura mais adequada para o Sistema Integrado de Gestão de Riscos, de forma a promover a segurança das pessoas e do material circulante.

Através da colaboração interdisciplinar, pretende-se dar o necessário contributo para a prevenção e detecção precoce de situações de risco e de elevada perigosidade, e permitir: i) o desenvolvimento de um sistema de informação (geográfico) que, usando metodologias robustas de

processamento de dados, permita, em tempo-real, detectar, identificar e diagnosticar incidentes ao longo da linha e gerar os necessários indicadores de alarme e de acções que evitem a ocorrência de acidentes; ii) o estudo ao longo do tempo do comportamento dinâmico da linha e da sua envolvente, criando, para o efeito, uma base de dados contendo a informação recolhida pelo sistema.

4.3. Sistema Integrado de Gestão de Riscos

4.3.1. Sensores

A selecção e teste dos sensores apropriados à especificidade do meio e a respectiva configuração topológica destes dispositivos são de crucial importância, tendo em vista a qualidade da detecção e o subsequente diagnóstico da ocorrência. Neste sentido, a escolha dos sensores deve ter, fundamentalmente, em consideração os seguintes aspectos [2]:

- a significância dos sinais de saída dos sensores relativamente à geologia à mecânica/natureza do fenómeno a detectar;
- a melhoria da recolha da informação através de uma rede de sensores recorrendo eventualmente a técnicas de fusão sensorial, podendo algumas das variáveis ser obtidas por via indirecta (sensores virtuais);
- a identificação e tratamento de erros, para além de artefactos, falhas e avarias;
- a avaliação da rede de sensores no que se refere à sua aplicabilidade no âmbito da monitorização remota e na redução do ratio de falsos alarmes.

Alguns exemplos de sensores a integrar numa arquitectura de detecção de riscos relacionados com movimentos de vertente, em função das funcionalidades pretendidas, encontram-se apresentados no quadro seguinte:

Quadro III
Relação entre fenómenos e sensores

Exemplos de fenómenos	Sensor		
	Aceleração	Deslocamento	Ângulo
Queda (<i>Falling</i>)	Sim	Não	Talvez
Desabamento (<i>Topple</i>)	Sim	Sim	Sim
Deslizamento de pedras (<i>Rockslide</i>)	Sim	Sim	Não
Deslizamento rotacional (<i>Rotational slide</i>)	Sim	Sim	Não
Translação Superficial (<i>Shallow translation</i>)	Sim	Sim	Não

4.3.2. Dispositivos de comunicação sem fios

As RSSF são constituídas por dispositivos electrónicos de pequena dimensão denominados, genericamente, por sensores que têm vindo a ser aplicados nas áreas da vigilância, monitorização de pessoas, animais, aquisição de variáveis ambientais, tais como, luminosidade, temperatura, humidade, pressão atmosférica, entre outras aplicações.

Tipicamente, eles são constituídos por sistemas micro-electromecânicos, um microprocessador de baixo consumo, um circuito de radiofrequência e bateria.

Em virtude do seu baixo custo e reduzida complexidade, estes dispositivos têm vindo a merecer a escolha para efeito de aplicações quer industriais que na área dos serviços, embora apresentem algumas limitações das quais se destacam: alcance de transmissão relativamente reduzido (entre os 30 e os 100 metros), baixa capacidade de processamento e energia limitada, quando não conectados a uma fonte de energia externa.

Cada um destes sensores (*motes*), para além de adquirir informação do meio ambiente, é responsável pelo reenvio de mensagens oriundas de outros dispositivos sem fios tendo em vista o seu encaminhamento até a um *gateway*, que representa o ponto de saída da rede sem fios (figura 10).

A integração dos dispositivos de comunicação sem fios numa estrutura em rede deverá permitir receber os dados dos sensores com robustez e tolerância a falhas e transmiti-los de forma segura, recorrendo a encriptação de mensagens.

4.4. Plataforma de Gestão de Riscos

A plataforma de Gestão de Riscos deverá ser composta, fundamentalmente, pelos seguintes módulos: módulo de monitorização, de diagnóstico e sistema automático de geração de alertas/alarmes.

A concepção do módulo de monitorização da infraestrutura ferroviária deverá ter por base a plataforma tecnológica desenvolvida e ter em consideração a análise de requisitos, para além da especificação dos componentes e funcionalidades inerentes ao sistema de Gestão de Riscos.

O módulo de diagnóstico deverá ser capaz de detectar padrões/marcadores e correlacionar eventos que indiciem situações anómalas ou de risco potencial, recorrendo para o efeito à integração de dados de fontes externas (por exemplo, dados meteorológicos) adquiridos em tempo real pelas RSSF.

Quanto ao sistema automático de geração de alertas/alarmes, disponibilizados em tempo real, deverá contemplar a análise de risco e indicação de linhas de acção, utilizando os canais de comunicação mais adequa-

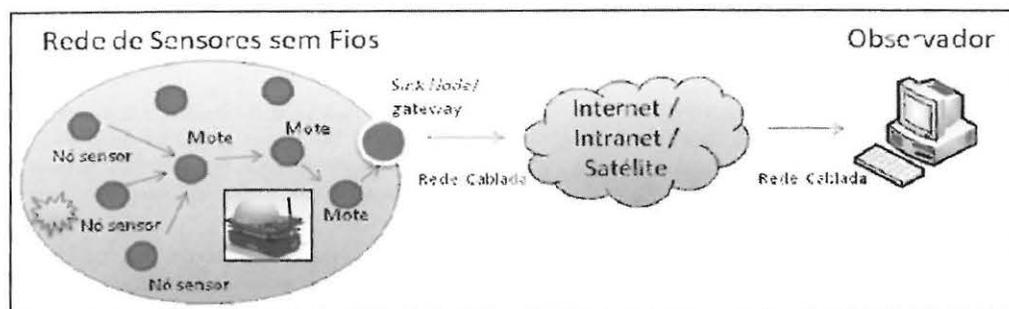


Figura 10
Arquitetura de uma RSSF

dos. O sistema deverá permitir ainda a identificação do coeficiente de risco vigente em cada momento, devendo igualmente disponibilizar informação sobre causas prováveis, em caso de alarme.

A conjugação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com a informação obtida no terreno através das RSSF permitirá a transformação dos dados em informação com características relevantes para o sistema de apoio à decisão, particularmente, em situações críticas.

A recolha da informação num Sistema de Bases de Dados, possibilitará o estudo do comportamento dinâmico da linha e sua envolvente e identificação de situações potenciadoras de risco, através de metodologias de análise computacional, nomeadamente, análise de tendências, identificação e classificação de padrões e correlação de eventos.

Conclusão

O acompanhamento dos problemas que desde 2000/2001 tem vindo a afectar a Ferrovia do Tua, motivou que uma equipa de investigadores da Universidade de Coimbra composta por um Geógrafo há muito dedicado ao estudo de morfodinâmica de vertentes na região em causa e por dois investigadores de Engenharia Informática especializados no desenvolvimento de sistemas de tolerância a falhas, concertasse esforços no sentido de definir uma metodologia de trabalho que, ao longo daquela ferrovia, permitisse identificar as áreas onde as vertentes são mais instáveis. Deste modo, e depois da identificação, inventariação e cartografia dessas áreas, poderia ser implementado no terreno um sistema de monitorização e acompanhamento das condições de circulação das composições ferroviárias, que permitisse a disponibilização de informação em tempo real. De custo reduzido, ao nível de implementação mas também ao nível da sua manutenção, a arquitectura geral de um projecto desta natureza da assentaria nas mais recentes tecnologias de detecção e comunicação sem fios tendo em vista, por um lado, a moni-

torização em tempo real do estado da via férrea e, por outro, ao nível da tomada de decisão, a disponibilização atempada de planos de contingência, aquando da ocorrência de eventuais alarmes.

Neste trabalho descreveu-se uma proposta de cooperação interdisciplinar tendo em vista:

i) a identificação e caracterização de problemas de instabilidade morfostrutural e morfodinâmica das vertentes adjacentes à Linha do Tua cujo traçado acompanha o do próprio rio; ii) a conjugação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com a informação recolhida no terreno através das Redes de Sensores sem Fios; iii) o desenvolvimento de um sistema integrado de supervisão e monitorização; iv) o desenvolvimento de uma plataforma para gestão de riscos naturais em infra-estruturas ferroviárias.

Bibliografia

- AKYLIDIZ, I. F.; WANG, X. e WANG, W. (2005) - "Wireless mesh networks: a survey". *Computer Networks*, 47, pp. 445-487.
- ALFIERI, A.; BIANCO, A.; BRANDIMARTE, P. e CHIASSERINI, C. F. (2007) - Maximizing system lifetime in wireless sensor networks, *European Journal of Operational Research*, 181, pp. 390-402.
- ARNHARDT, C.; ASCH, K.; AZZAM, R.; BILL, R.; FERNANDEZ-STEEGER, T. M.; HOWFELD, S. D.; KALLASH, A.; NIEMEYER, F.; RITTER, H.; TOLOCZYKI, M. e WALTER, K. (2007) - Sensor based Landslide Early Warning System - SLEWS - Development of a geoservice infrastructure as basis for early warning systems for landslides by integration of real-time sensors, *GEOTECHNOLOGIEN Science Report. Early Warning Systems in Earth Management*, pp. 75-88.
- BROMHEAD, E. N. e IBSEN, M.-L. (1997) - "Land-use and climate-change impacts on landslide hazards in SE Britain". *Landslide Risk Assessment*, Balkema, Roterdão, pp. 165-176.
- BRUNSDEN, D. e PRIOR, D. (1984) - *Slope Instability*. New York, John Wiley & Sons, 603 p.

- BURNS, S., (1999)- *Engineering geology and relative stability of the southern half of Newell Creek Canyon, Oregon City, Oregon*. Dissertação de mestrado, Portland, 156 p.
- DIKAU, R.; BRUNSDEN, D.; SCHROTT, L. e IBSEN, M.-L. (1996) - *Landslide Recognition; Identification, Movement and Causes*. John Wiley & Sons, Chichester.
- FERRER-GIJÓN, M. (1987)- "Deslizamientos, Desprendimientos, Flujos y Avalanchas" In CARCEDO AYALA y DURÁN BALSERO (coords.) - *Riesgos Geológicos*. Madrid, IGME, pp. 175-192.
- GLADE, T. (2003) - "Vulnerability assessment in landslide risk analysis". *Die Erde*, 134, pp. 121-138.
- GLADE, T.; ANDERSON, M. e CROZIER, M. J. (2005) - *Landslide hazard and risk*. Ed. John Wiley & Sons, Inc, Ney York, 802 p.
- GUZZETTI, F.; REICHAMBAH, P.; CARDINALI, M.; GALLI, M. e ARDIZZONE, F. (2005) - "Probabilistic landslide hazard assessment: an example in the Collazzone area, Central Italy". In BERGWEISTER, K.; STRAUSS, A. e RICKEMANN, D. (eds.) - *3rd Probabilistic Workshop, Technical Systems and Natural Hazards*, Schriftenreihe des Departments n. 7, pp. 173-182.
- REICHENBACH, P.; GALLI, M.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F. e ARDIZZONE, F. (2004) - Geomorphological Mapping to Assess Landslide Risk: Concepts, Methods and Applications in the Umbria Region of Central Italy". In GLADE, T. ANDERSON, M. e J. CROZIER, J. (Eds) - *Landslide hazard and risk*. John Wiley and Sons, pp. 428-467.
- SANTOS, J. G. (2002a) - "Movimentos de vertente na área de Peso da Régua; análise e avaliação multicritério para o zonamento de hazards em ambiente SIG". VIII Encontros sobre Riscos Naturais, *Territorium*, 9, Coimbra, pp. 53-73.
- SANTOS, J. G. (2002b) - "Cartografia automática do risco de movimentos de vertente; estudo aplicado à área de Peso da Régua, Bacia do Douro (Norte de Portugal)". *Xeográfica*, 2, Santiago de Compostela, pp. 33-57.
- SANTOS, J. G., (2004) - "Movimentos de vertente na bacia do Douro; o exemplo recente do *flow slide* de Armamar". *Territorium*, 11, pp. 21-44.
- TURCOTTE, D. L.; MALAMUD, B. D.; GUZZETTI, F. e REICHENBACH, P. (2005) - "A general landslide distribution: further examination". In HUNGR, FELL, COUTURE e EBERHARDT (eds) - *Landslide Risk Management*, Taylor and Francis Group, Londres, 675-680.
- VAN WESTEN, C. J.; KUMAR PIYA, B. e GURAGAIN, J. (2005) - "Geo-information for urban risk assessment in developing countries: the SLARIM project". In: Geo-information for disaster management Gi4DM". Proceedings of the 1st international symposium on geo-information for disaster management: Delft, The Netherlands, 21-23 March 2005. / ed. by P.J.M. van Oosterom, S. Zlatanova, M. Elfriede. Berlin etc.: Springer, 2005. pp. 379-392.
- VAN WESTEN, C. J.; MONTOYA, A. L.; BOERBOOM, L. G. J. e BADILLA COTO, E. (2002) - "Multi-hazard risk assessment using GIS in urban areas : a case study for the city of Turrialba, Costa Rica". *Proceedings of the regional workshop on best practices in disaster mitigation: lessons learned from the Asian urban disaster mitigation program and other initiatives*, 24-26 September 2002, Bali, Indonesia. pp. 120-136.
- YAN, T.; ZHOU, C. e YANG, S. (2001) - "Landslides and Landslidology". *Journal of Geosciences of China*, Vol. 3, nº 1, pp. 35-38.
- ZÉZERE, J. L. (1997) - *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Dissertação de Doutoramento em Geografia Física, Lisboa, 575 p.
- ZÉZERE, J. L. (2000) - "A classificação dos movimentos de vertente, tipologia, actividade e morfologia". *Apontamentos de Geografia*, série: Investigação, CEG, Lisboa, pp. 1-29.

Anexo I

Legenda da Carta Geológica de Portugal, folha 10 - D (Alijó), 1/50 000.

