



P
**ARA DESENVOLVER
A TERRA**
MEMÓRIAS E NOTÍCIAS
DE GEOCIÊNCIAS
NO ESPAÇO LUSÓFONO

Quinta-Ferreira, M., Barata, M. T.,
Lopes, F. C., Andrade, A. I.,
Henriques, M. H., Pena dos Reis, R.
& Ivo Alves, E.

Coordenação

CARACTERIZAÇÃO DAS INSTABILIZAÇÕES DE TALUDES DE ESCAVAÇÃO NO AREEIRO, COIMBRA, PORTUGAL

CHARACTERIZATION OF THE CUT SLOPES FAILURES IN AREEIRO, COIMBRA, PORTUGAL

M. Quinta-Ferreira¹, P. S. Andrade²; L. L. Lemos³, A. A. Saraiva⁴

Resumo – Procedeu-se à análise de diferentes situações de instabilidade de taludes de escavação que se verificaram nos “Grés de Silves” na zona do Areeiro em Coimbra. A reduzida inclinação dos planos de estratificação que originaram a instabilização, a presença de camadas de pelitos acinzentados e a ocorrência de precipitação intensa constituem os aspetos mais marcantes das instabilizações. O estudo de campo e de laboratório permitiu concluir que a resistência dos pelitos decresce progressivamente, sendo influenciada essencialmente pela descompressão e alteração, desenvolvendo-se condições favoráveis à instabilização quando aumenta a pressão da água.

Palavras-chave – Deslizamentos; Triásico; Pelitos; Alteração; Coimbra.

Abstract – Various instability situations on excavation slopes that occurred in the “Grés de Silves” in the Areeiro area, Coimbra, are evaluated. The reduced dip angle of the bedding planes that led to instability, the presence of the grey mudstone layers and the occurrence of heavy precipitation are the most striking aspects of the failures. The field and laboratory study concluded that the strength of the mudstones decreases progressively in time and is mainly influenced by decompression and weathering, creating conditions favourable to instability when pore water pressure increases.

Keywords – Landslides, Triassic, Mudstones, Weathering, Coimbra.

^{1 2 4} Departamento de Ciências da Terra. Centro de Geociências. Largo Marquês de Pombal. Universidade de Coimbra. 3000-272 Coimbra. Portugal; ¹mqf@det.uc.pt, ²pandrade@det.uc.pt, ⁴asaraiva@det.uc.pt

³ Departamento de Engenharia Civil. Centro de Engenharia Civil. Polo II. Universidade de Coimbra. Rua Luís Reis dos Santos. 3030-788 Coimbra; llemos@dec.uc.pt

1 – Introdução

462

Desde o ano de 2004 verificaram-se várias situações de instabilização na zona do Areiro, em Coimbra, apresentando algumas semelhanças geométricas, mas condições de instabilização diferenciadas. De modo a definir as causas destas instabilizações efetuou-se um estudo de campo, com a recolha de informação dos vários episódios de instabilização e, posteriormente realizaram-se ensaios de laboratório. A partir do trabalho desenvolvido procurou-se entender as causas das instabilizações, em situações geológicas que não faziam antever a ocorrência de deslizamentos, devido à reduzida inclinação das camadas, com cerca de 15° a 16°.

A primeira instabilização de que temos registo ocorreu em Março de 2004, durante os trabalhos de escavação para a construção da estrada a nascente da Escola do Areiro. Tratou-se de uma pequena escavação com alguns metros de altura máxima, numa extensão de cerca de 100 m segundo a diretriz da estrada (Fig. 1-a). Em Dezembro do ano seguinte, em 2005, ocorreu a segunda instabilização, mas agora a oeste da Escola do Areiro (Fig. 1-b). Passados alguns meses, em Março de 2006, ocorreu nova instabilização após a escavação resultante da preparação da plataforma para a urbanização da Quinta do Areiro, durante a construção do muro de suporte em gabiões, que pretendia estabilizar o talude escavado. Esta instabilização foi limitada superiormente por uma falha subvertical, que limitou o desenvolvimento da rotura, evitando que chegasse até à habitação na parte superior do terreno (Fig. 1-c). No final de 2007 verificou-se nova instabilização por baixo da escola do Areiro, mas com menores dimensões que a ocorrida anteriormente. Em Abril de 2010 ocorreu uma instabilização no talude de escavação da rotunda do Areiro (Fig. 1-d). Em Maio do ano seguinte houve mais uma instabilização na rotunda do Areiro, dando continuidade para norte à instabilização anterior.

2 – Contribuição da geologia para as instabilizações

A geologia local é constituída por materiais sedimentares da unidade dos “Grés de Silves” datados do Triásico (PALAIN, 1976; AZERÊDO et al., 2003; SOARES et al., 2007), sobrepondo-se aos xistos Proterozóicos da unidade designada como série negra. Na área estudada observam-se arenitos e conglomerados de cores avermelhadas cuja origem está relacionada com a deposição fluvial, também se regista a presença de níveis pelíticos de tonalidades acizentadas, cuja formação está associada à sedimentação lacustre de profundidades reduzidas (MIRANDA et al., 2010).

Anteriormente à recente intervenção humana no terreno, os processos da geodinâmica externa (alteração, erosão e transporte), modelaram a geomorfologia do terreno, conferindo um declive mais suave à vertente do lado do Areiro, em relação à Quinta da Portela, do lado oeste do vale, dado que a estrutura geológica inclina suavemente para oeste. Na Fig. 2 apresenta-se um perfil do terreno segundo um alinhamento aproximadamente EW, ilustrando o declive dos dois lados do vale, sendo evidente o baixo declive do lado do Areiro, onde foram registadas as instabilizações.



Fig. 1 – Aspeto de algumas das instabilizações ocorridas no Areiro. a) Estrada a nascente da escola do Areiro, em Março 2004; b) Talude da escola do Areiro, em Dezembro de 2005; c) Urbanização da Quinta do Areiro, em Março de 2006; d) Rotunda do Areiro, em Abril de 2010.

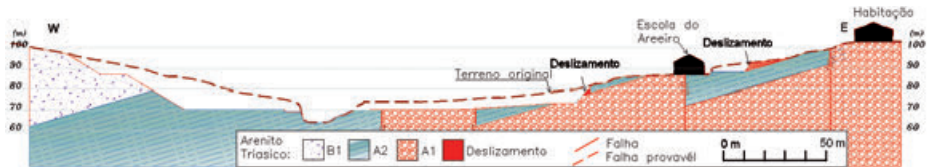


Fig. 2 - Perfil interpretativo orientado de oeste (W) para este (E) no vale do Areiro. À esquerda situa-se a Quinta da Portela e à direita a zona do Areiro. A1, A2 e B1 – termos do Grés de Silves segundo PALAIN (1976).

Sabendo-se que as camadas de arenito mergulham genericamente para oeste, com pendores rondando 15° a 16° , não parecia provável a ocorrência de qualquer problema de instabilização, numa formação essencialmente arenítica, que se caracteriza por apresentar ângulos de atrito elevados. Os pelitos (siltitos e argilitos) que se encontram intercalados nas bancadas areníticas em zonas condicionadas estratigráficamente, apresentam uma espessura que varia entre 0,1 m e 0,3 m e têm superfícies de descontinuidade quase lisas a lisas (Fig. 3). As unidades areno-conglomeráticas possuem espessuras superiores às definidas pelos pelitos e as suas superfícies de

descontinuidade são ligeiramente rugosas a quase lisas. A família principal das descontinuidades corresponde aos planos de estratificação das camadas areno-conglomeráticas e pelíticas.



Fig. 3 – Presença de pelitos intercalados nas unidades areno-conglomeráticas.

Considera-se que as características e dimensões das instabilizações foram essencialmente condicionadas pela geologia local, ao definir zonas, delimitados por falhas, em que as camadas pelíticas (silto-argilosas) intercaladas nos arenitos sofreram rotura pontual, ocasionando a queda dos taludes de escavação. A rotura das camadas dos pelitos resultou da sua baixa resistência ao corte, após a atuação dos processos de degradação desencadeados pela intervenção humana. A evolução das características dos pelitos, que sendo originalmente uma rocha branda, se transformam progressivamente num solo de baixa resistência ao corte, foi investigada recorrendo à realização de vários ensaios de laboratório, procurando determinar quer as características mineralógicas destes materiais, quer as suas propriedades físicas e mecânicas condicionantes da estabilidade.

3 – Características das amostras intactas

Os pelitos encontrados “in situ” possuem propriedades físicas que resultaram da evolução das condições geológicas desde a sua formação, tendo sofrido fortes tensões verticais devido ao recobrimento e à diagénese, resultado a formação uma rocha branda.

Para avaliar as características físicas das amostras intactas, foram efetuados ensaios com o porosímetro de mercúrio, cujos resultados se apresentam na Tabela 1. A escolha do porosímetro de mercúrio resultou da necessidade de utilizar uma técnica que não destruísse a estrutura interna da amostra, que se sabia ser muito evolutiva em contacto com a água (ISRM, 2007). Para identificar a mineralogia dos pelitos foram realizados ensaios de Raios-X. Para a fração grosseira foram identificados quartzo, feldspato potássico, mica e vestígios de dolomite. Na fração fina, correspondente às argilas, foram identificadas a ilite como mineral dominante, a caulinite e interestratificados ilite-vermiculite (QUINTA-FERREIRA et al., 2011).

Tabela 1 – Resultados dos ensaios com o porosímetro de mercúrio.

Amostra N°		A11-1	A11-2	A11-3	A11-4	A11-5
Área total dos poros	(m ² /g)	11.36	6.51	6.75	5.36	12.61
Diâmetro médio dos poros	(μm)	0.031	0.042	0.033	0.049	0.028
Peso volúmico seco γ_d	(kN/m ³)	20.79	21.81	22.56	22.11	20.80
Peso volúmico real γ_s	(kN/m ³)	25.56	25.77	25.85	25.94	25.51
Porosidade	(%)	18.64	15.35	12.73	14.79	18.46

465

4 – Propriedades índice das amostras remexidas

Na sequência da alteração e desagregação da rocha branda, devido à descompressão em presença da água, formam-se solos cujo comportamento condiciona grandemente a estabilidade dos taludes estudados. Para melhor conhecer as características destes solos invulgares foram caracterizadas três amostras remexidas (A11.1, A11.3 e A11.5) através da análise granulométrica e dos limites de consistência. As amostras colhidas foram secas e reduzidas a pó. Ao material destinado aos ensaios de consistência foi adicionada água e deixado repousar, por um período de 24 horas antes da realização dos ensaios. A Tabela 2 resume os resultados dos ensaios de consistência bem como do tamanho das partículas.

De acordo com a carta de plasticidade de Casagrande as amostras estudadas são classificadas como CL (argilas de baixa a média plasticidade). A atividade das amostras A11.1 e A11.5, com o valor próximo de 1, confirma os ensaios de Raios-X os quais indicam a ilite como mineral argiloso predominante. Para a amostra A11.3, a argila que possui é de alta atividade, no entanto apenas tem uma percentagem de 5% de argila.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de consistência e do tamanho das partículas.

Amostra N°	Granulometria (%)			Consistência (%)			A	Classificação do solo
	Argila	Silte	Areia	w_L	w_p	IP		
A11.1	17	51	32	37,5	20,3	17,2	1,0	Argila siltoosa de atividade intermédia
A11.5	15	55	30	40	22,4	17,6	1,2	
A11.3	5	65	30	31	20,5	10,5	2,1	Argila siltoosa de atividade alta

w_L – Limite de liquidez. w_p – Limite de plasticidade. IP – Índice de plasticidade. A – Atividade da argila (IP / % de argila).

5 – Resistência ao corte

Para a determinação da resistência ao corte foram realizados ensaios no aparelho de corte rotativo de Bromhead. A amostra tem uma forma anelar, uma altura de 5 mm, um diâmetro interno de 70 mm e externo de 100 mm, preenche o anel inferior, sendo cortada contra uma placa de bronze suficientemente rugosa para evitar o deslizamento na interface da placa com o solo, formando-se assim uma superfície de rotura no solo

a escassos milímetros da interface. A carga normal é aplicada através da placa superior utilizando um sistema de pesos e alavanca formando uma razão de 10:1. O prato inferior roda a uma velocidade constante e o prato superior reage contra dois anéis dinamômetros aplicando um momento torsor à amostra. As deformações verticais do anel superior podem ser medidas através de um defletómetro. O deslocamento horizontal é calculado através da medição da rotação angular. As amostras são preparadas com um teor em água próximo do limite de plasticidade, deixadas a uniformizar durante 24 horas e colocadas na cavidade anelar por pressão com os dedos e uma pequena espátula, evitando a retenção de ar. O solo em excesso é retirado, a superfície nivelada e o conjunto colocado no prato de rotação. O excesso de solo é utilizado para a determinação do teor em água inicial (Tabela 3).

A amostra foi consolidada por estágios para uma tensão de 400 kPa, e submetida ao corte até a condição residual ser estabelecida. A resistência máxima inicial obtida nesta primeira fase foi assumida como representativa da resistência ao corte na condição normalmente consolidada ou a volume constante. A resistência ao corte residual foi então sucessivamente determinada para tensões normais inferiores, como se indica na Tabela 4.

Tabela 3 - Teor em água inicial dos solos ensaiados no corte rotativo.

Amostra N°	A11.1	A11.3	A11.5
Teor em água inicial (%)	20,2	25,6	25,0

Tabela 4 – Sequência de estágios utilizada nos ensaios de corte anelar.

Estágio N°	Consolidação para 400 kPa	1	2	Consolidação a 400 kPa e de seguida a 200 kPa	3 [#]	4	5	6
Tipo		1º corte	corte			corte	corte	corte
Tensão Normal (kPa)		400	200		200	100	50	25

[#] Corte de uma estrutura na condição residual sobreconsolidada (OCR=2)

Após a condição residual ter sido estabelecida no estágio 2, a amostra foi sobreconsolidada, consolidando-a sob uma tensão de 400 kPa e descarregando-a novamente para a tensão de 200 kPa. A amostra foi novamente cortada à tensão de 200 kPa, investigando-se o modo de corte de acordo com a proposta de LUPINI et al. (1981). Os resultados mostram um comportamento frágil no primeiro corte (Fig. 4) e um comportamento dúctil no estágio 3, o que sugere um modo deslizante, ou seja uma superfície de rotura com as partículas completamente orientadas na direção de corte.

Depois de uma superfície de corte formada por partículas orientadas na direção de corte, um processo de sobreconsolidação não origina um aumento de resistência devido à diminuição da porosidade.

A partir do estágio de corte inicial sob a tensão normal de 400 kPa (Fig. 4) é possível obter o ângulo de resistência ao corte para a condição normalmente consolidada assumindo para a coesão o valor zero. Estes valores são apresentados na Tabela 5.

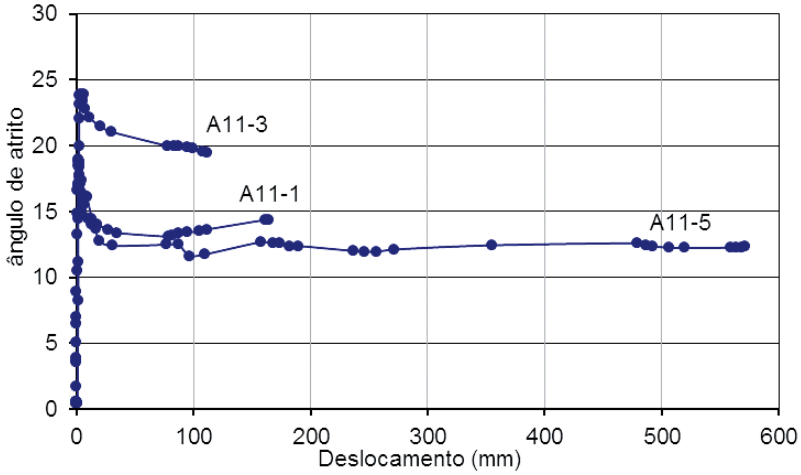


Fig. 4 - Primeiros estágios de corte com tensão normal de 400 kPa.

De acordo com LUPINI et al. (1981), as amostras A11-1 e A11-5 mostram um modo de corte deslizante.

Tabela 5 - Resistência normalmente consolidada e residual, expressa em termos de ângulo de atrito, considerando ausência de coesão.

Amostra N°		A11.1	A11.5	A11.3
Ângulo de atrito de pico (°)	ϕ'_{vc}	18,9	18,7	23,9
Ângulo de atrito residual (°)	ϕ'_R	13,0	12,0°	19,4°

Na Fig. 5, apresenta-se a comparação entre a resistência ao corte residual obtida para os pelitos com os valores apresentados por LUPINI et al. (1981).

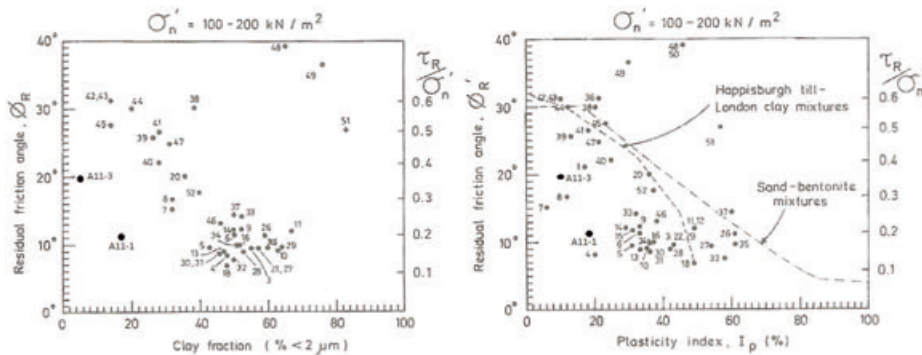


Fig. 5 - Comparação entre a resistência ao corte residual obtida para os pelitos com os valores de outros solos apresentados por LUPINI et al. (1981).

6 – Compressibilidade

468

As amostras foram reduzidas a pó, tendo sido adicionada água destilada até teores em água próximos do limite de liquidez. De seguida as amostras foram moldadas no anel edométrico, tendo sido realizado o ensaio, duplicando as cargas, a cada 24 horas. Os índices de compressibilidade e de expansibilidade obtidos para as amostras A11-1 e A11-3 estão representados na Tabela 6. Considerando as porosidades de 18,5% obtidas no porosímetro de mercúrio a partir das amostras indeformadas conclui-se que poderão ter existido tensões efetivas máximas da ordem de 15 MPa para justificar aquelas porosidades com base nos resultados dos ensaios edométricos.

Tabela 6 - Índices de compressibilidade (C_c) e de expansibilidade (C_s)

Amostra	A11-1	A11-3
C_c	0,238	0,162
C_s	0,041	0,024

7 – Análise da estabilidade

De entre os vários taludes existentes na zona do Areiro, foi escolhido o talude da rotunda do Areiro para uma análise mais pormenorizada, procurando entender o comportamento do talude. Para a escolha deste talude foi relevante tratar-se do talude de escavação mais alto, com cerca de 12m de altura e que sofreu vários episódios de instabilização no passado.

Analisou-se a estabilidade com base na análise cinemática recorrendo ao método de MARKLAND (1972), com o refinamento do HOCKING (1976), e ainda a análise do equilíbrio limite de uma rotura planar.

Para o método de MARKLAND (1972) mediram-se a direção, pendor e rugosidade de 176 descontinuidades, tendo a projeção estereográfica possibilitado a identificação de três famílias de descontinuidades principais: A) N24°W;15°SW; B) N26°W;67°SW; C) N55°E;82°SE.

A estratificação corresponde ao sistema A e representa 55% das descontinuidades medidas. As instabilizações observadas ocorreram nesta família. Sendo o talude essencialmente constituído por arenitos, com ângulos de atrito acima de 35°, não há a possibilidade de ocorrer deslizamento por estes materiais.

Os pelitos intactos apresentam características de rocha branda com elevados ângulos de atrito. Com a execução das escavações ocorre a descompressão das faces expostas do maciço e a conseqüente degradação dos pelitos, dando origem a materiais terrosos. Os ensaios de laboratório mostraram que a resistência de pico dos pelitos degradados (18,7° a 23,9°) é superior à inclinação da estratificação, pelo que de acordo com o método de MARKLAND (1972) e o refinamento de HOCKING (1976) não deveriam existir instabilizações nestas circunstâncias.

Sabendo-se no entanto que as instabilizações dos taludes de escavação ocorrem essencialmente após períodos de chuva (QUINTA-FERREIRA et al., 2005, 2006), analisaram-se as condições do equilíbrio limite de uma rotura planar conducentes à instabilização. Enquanto no tempo seco se desenvolvem tensões de sucção (negativas) que estabilizam o talude, pelo contrário com a chuva acumula-se água nos terrenos,

umentando a tensão neutra. Por analogia com as instabilizações ocorridas, considerando um bloco com 8 m de comprimento por 2 m de espessura, com uma inclinação de 16° da superfície de deslizamento numa camada de pelito alterado, um ângulo de atrito de pico de 19° associado a uma pressão de água de apenas 0,4 m acima da superfície de deslizamento, é suficiente para reduzir o fator de segurança para um valor unitário, desencadeando a rotura do talude.

Os ensaios de laboratório permitiram concluir que as amostras remexidas, apresentavam um ângulo de atrito residual que podia descer aos 12°, justificando a fácil ocorrência de deslizamentos pela família A, após ser ultrapassada a resistência de pico na sequência de pequenos movimentos segundo a superfície de rotura, propiciados pela decompressão da face do talude.

8 – Considerações finais

Analisam-se diversas situações de instabilização de taludes de escavação, ocorridas ao longo de cerca de 8 anos, na Formação da Conraria (base do termo A2) dos Grés de Silves (PALAIN, 1976), na zona do Areiro em Coimbra. Procurou-se entender as causas das instabilizações, em situações geotécnicas que não faziam antever problemas de instabilidade. Nos taludes afloram essencialmente arenitos siliciosos interestratificados com finas camadas de pelitos, mergulhando cerca de 16° para oeste.

Fazendo uma análise comparativa dos dois lados do vale, Areiro a este, e Quinta da Portela a oeste, foi possível concluir que a estrutura geológica, a geomorfologia e as características dos pelitos são fatores que influenciam a ocorrência dos deslizamentos. Estas condições permitem a ocorrência de instabilizações segundo planos de reduzida inclinação para a face do talude, do lado do Areiro, mesmo para taludes de escavação de apenas alguns metros de altura, enquanto no lado oposto do vale, na Quinta da Portela, taludes com mais de 20 m de altura se apresentam estáveis.

Com base nos ensaios de laboratório realizados concluiu-se que os pelitos terão sofrido no passado uma compressão da ordem dos 15 MPa, o que equivale aproximadamente à carga resultante da espessura do termo A2 dos Grés de Silves.

O ângulo de atrito, quer dos arenitos, quer dos pelitos intactos, é muito superior à inclinação das camadas, não permitindo a ocorrência de deslizamentos segundo os planos das camadas. Verificou-se no entanto que os pelitos sofrem degradação no tempo, quer devido ao alívio de carga resultante das escavações efetuadas nos taludes, quer devido ao aumento da pressão de água.

O ângulo de atrito de pico dos pelitos degradados pode rondar 19°. No entanto como as tensões de sucção são removidas com o aumento da saturação dos terrenos, calculou-se que uma coluna de água de apenas 0,4 m acima da superfície de corte cria condições capazes de originar a rotura dos taludes.

Na situação atual, a zona da Escola do Areiro e da rotunda do Areiro são os locais que justificam maior preocupação, sendo conveniente efetuar a monitorização destes taludes, em especial nas épocas de maior pluviosidade. Considera-se conveniente a utilização de algumas medidas de estabilização, nomeadamente reperfilear os taludes, evitar a decompressão da face dos taludes, aplicando medidas de contenção, e efetuar a drenagem dos terrenos de modo a evitar a subida das pressões neutras.

A caracterização geológica, em conjunto com os ensaios de laboratório, permitiram entender os mecanismos de instabilização dos taludes do Areeiro. A reduzida inclinação dos planos de estratificação que originaram a instabilização, a presença de camadas de pelitos evolutivos e a ocorrência de precipitação intensa constituem os aspetos mais marcantes das instabilizações.

Agradecimentos – Este trabalho foi financiado pelo Estado Português através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projecto PEst-OE/CTE/UI0073/2011 do Centro de Geociências.

Referências Bibliográficas

- AZERÊDO, A.C., DUARTE, L.V., HENRIQUES, M.H. & MANUPPELLA, G. (2003) - Da dinâmica continental no Triásico aos mares do Jurássico Inferior e Médio. Instituto Geológico e Mineiro, 43p.
- HOCKING, G.A. (1976) - Method for distinguishing between single and double plane sliding of tetrahedral wedges. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics*, 13, p. 225-226
- ISRM (2007) - The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Ulusay and Hudson (eds). ISRM Turkish National Group.
- LUPINI, J.F., SKINNER, A.E. & VAUGHAN, P.R. (1981) - The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique*, 31(2), p. 181-213
- MIRANDA, J., PINA, B., MATOS, V., CALHÔA, A.M., PENA DOS REIS, R. & PIMENTEL, N. (2010) - Estudo das fácies de leque aluvial em afloramento do Triásico Superior de Coimbra. e - *Terra*, 21 (9), 4p.
- MARKLAND, J.T. (1972) - A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slip type of failure is expected. Imperial College Rock Mechanics Research Reprints, 19, p. 1-10
- PALAIN, C. (1976) - Une série détritique terrigène. Les “Grés de Silves”: Trias et Lias inférieur du Portugal. *Memórias, Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa*. 25 (nova série), 377p
- QUINTA-FERREIRA, M., LEMOS, L.L. & PEREIRA, L.M. (2005) - Influência da precipitação na ocorrência de deslizamentos em Coimbra, nos últimos 139 anos. *Geotecnia* 104, p. 17-30
- QUINTA-FERREIRA, M., LEMOS, L.L. & PEREIRA, L.M. (2006) - Influência da precipitação nos deslizamentos e no comportamento dos pelitos do Triásico, em Coimbra”. 10º Cong. Nacional de Geotecnia. Sociedade Portuguesa de Geotecnia 1, p. 61-72.
- QUINTA-FERREIRA, M., ANDRADE, P.S. & SARAIVA, A. (2011) - Instabilidade de taludes de escavação no Areeiro, Coimbra. Simpósio Modelação de Sistemas Geológicos Homenagem ao Professor Manuel Maria Godinho, pp. 329-342. Coimbra, 15 de Janeiro de 2011.
- SOARES, A.F., MARQUES, J. & SEQUEIRA, A.. (2007) - Folha 19-D, Coimbra-Lousã, Carta Geológica de Portugal. Escala 1:50 000. INETI, Departamento de Geologia, Lisboa.