

O ENSAIO DE DURABILIDADE COMO INDICADOR EXPEDITO DA ESTABILIDADE DA SUPERFÍCIE ROCHOSA DAS ARRIBAS COSTEIRAS

SLAKE DURABILITY INDEX AS AN INDICATOR OF EROSION AND SLOPE INSTABILITY IN COASTAL AREAS

Falcão Neves, Paula* *Investigador do Núcleo de Rochas, Centro de Geotecnia do IST, Portugal, pfalcaoneves@mail.ist.utl.pt*

RESUMO

A evolução das arribas litorais resulta de processos erosivos difíceis de quantificar por meio de análises geotécnicas. Para avaliação da erosão superficial da face das arribas, o ensaio de durabilidade pode dar estimativas da ordem de grandeza das velocidades diferenciais de erosão de diferentes tipos de rochas constituintes da mesma arriba, assim como previsões do respectivo grau de estabilidade.

Neste trabalho são apresentados resultados que tentam avaliar a erosão diferencial das rochas constituintes das arribas do litoral atlântico, mais concretamente na região da Ericeira (praia de S. Julião). O número de ensaios e a sua duração sobre o mesmo conjunto de amostras for variável de forma a simular períodos de tempo relativamente extensos, número esse que deverá retratar tanto quanto possível as acções externas: da precipitação, da agitação marítima, do vento e outras. Também se verificou interessante a correlação entre a durabilidade de dois tipos rochosos e os respectivos ângulos de inclinação dos seus taludes.

ABSTRACT

The evolution of coastal cliffs depends on a series of erosion phenomena that are hard to quantify by means of geotechnical analyses. To evaluate rocky cliffed coasts differential erosion according to the variability of strata properties, slake durability tests are useful and may also lead to predictions of their stability conditions.

In this article results of differential erosion in a cliff located near Ericeira (the S. Julião beach) are presented. It was detected that the number and duration of those testes simulate the effects of time regarding the actions of rainfall, sea waves, wind and others. Furthermore, slake durability characterization of two rock types seems to be well correlated with their slope angles.

1. INTRODUÇÃO

As arribas costeiras podem ser analisadas como taludes naturais que sofrem erosão mais ou menos intensa no sopé. Esta erosão provoca aumento do declive do talude ou mesmo a formação de subescavações que favorecem a ocorrência de fenómenos de instabilidade.

Em grande parte das litologias e dos contextos climáticos, o aumento do declive proporcionado pela erosão basal propicia a ocorrência de movimentos de massa de vertente. Os detritos resultantes destes movimentos constituem protecção de sopé mais ou menos duradoura, que impede, durante um dado período de tempo, a continuação da erosão marinha e tendem a ser levados pelas ondas redistribuindo-se pelas correntes litorais, longitudinalmente, ao longo da costa, ou transversalmente, em direcção ao largo e à plataforma continental.

Após a remoção completa dos depósitos de sopé, reinicia-se o processo erosivo sobre o sopé do maciço, que irá conduzir à ocorrência de novos movimentos de massa de vertente. Nesta sequência está implícita uma ciclicidade de eventos de recuo das arribas que a longo prazo, se os processos descritos se mantiverem, mostra um padrão de recuo de tipo paralelo.

A resistência das arribas relativamente ao avanço da erosão é uma variável fundamental para o estudo da estabilidade das mesmas. Vários autores têm ensaiado correlações entre a evolução observada e características de resistência mecânica, tais como a resistência à compressão simples, determinada directamente (Sunamura, 1973) ou estimada com o martelo de Schmidt (Jones e Williams, 1991), ou com o penetrómetro de bolso (Carter e Guy, 1988), a resistência ao corte (Kamphuis, 1987; Jones et al, 1993), e a coesão, a resistência à tracção e à penetração (referidas por Sunamura, 1992) [1].

Este tipo de tentativas de redução numa única variável a multiplicidade de aspectos e propriedades envolvidos na resistência à erosão das arribas tem naturalmente numerosos inconvenientes.

Os agentes erosivos que actuam em diferentes locais do perfil das arribas são muito diversificados, compreendendo, no sopé, a resistência à abrasão mecânica, à alteração, à meteorização pelo sal. Nas zonas do perfil não sujeitas directamente à acção das ondas, são mobilizadas para além da resistência do material à desintegração superficial com causas e processos variáveis, e a resistência do maciço à ocorrência de movimentos de massa de vertente, cujas variáveis principais são a resistência do material rocha ou solo e a sua degradação com a meteorização e descompressão, a orientação e densidade de descontinuidades, a resistência mobilizada ao longo destas e ainda a influência da água superficial e infiltrada.

O conjunto de processos responsáveis pela erosão superficial é relevante na evolução das arribas e pode assumir um papel principal em rochas brandas. Porém, na maioria das litologias, os eventos mais importantes da evolução das arribas são os movimentos de massa de vertente, cuja ocorrência pode constituir fonte apreciável de risco para as actividades humanas.

2. FACTORES QUE AFECTAM A ESTABILIDADE DAS ARRIBAS COSTEIRAS

Os movimentos de massa de vertente ocorrem nos mais variados contextos geológicos e morfológicos. A sua diversidade, em termos de materiais envolvidos, velocidade de deslocamento, tipo de deslocamento, características morfológicas, mecanismos de preparação e desencadeamento, tem levado à uniformização de critérios que facilitem o tratamento de informação com diversas origens e possibilitem a realização de inventários gerais de ocorrência de escorregamentos.

Dadas as características da arriba costeira da praia de S. Julião, constituída por um maciço rochoso com camadas alternadas de calcário e arenito os movimentos característicos possíveis são do tipo planar, em cunha e tombamento.

As causas dos movimentos de massa de vertente podem ser agrupadas em [2]: i) causas externas, que produzem aumento das solicitações sobre os maciços, mantendo-se constante a resistência dos mesmos; ii) causas internas, que motivam redução da resistência dos maciços.

As causas externas incluem: 1 – Modificações da topografia (subescavação, erosão, incisão de linhas de água, escavações ou aterros dos quais resultam aumentos de altura, comprimento ou declive dos taludes); 2 – Descarga (erosão especialmente no sopé, incisão de linhas de água, desaterros); 3 – Sobrecargas (obras ou aterros na zona superior dos taludes, aumento de altura) incluindo solicitações não drenadas; 4 – Vibrações e impactos (sismos, vibrações artificiais, impacto das ondas); 5 – Emersão rápida (descida rápida do nível das águas em taludes total ou parcialmente submersos); 6 – Modificações no regime de circulação de água (precipitações intensas, aumento do peso, aumento da tensão neutra, redução de tensões efectivas por subida do nível freático).

As causas internas incluem: 1 – Rótura progressiva (na sequência de descompressão e de abertura de fissuração); 2 – Alteração (meteorização, gelo-degelo, alteração pelo sal, ratura de ligações pétreas); 3 – Erosão por escoamento subterrâneo (dissolução, erosão interna).

Os dois tipos de causas operam frequentemente associados, preparando a prazo as condições para a ocorrência dos movimentos. Porém as causas próximas ou desencadeadoras dos movimentos são geralmente as mais facilmente identificáveis, o que pode mascarar o conhecimento preciso de todos os processos envolvidos.

3. ARRIBA COSTEIRA DA PRAIA DE S. JULIÃO, ERICEIRA

O perfil da arriba da praia de S. Julião onde se localizou o movimento de massa de vertente, esquematizado na Fig. 1, permitiu o desenvolvimento de um modelo

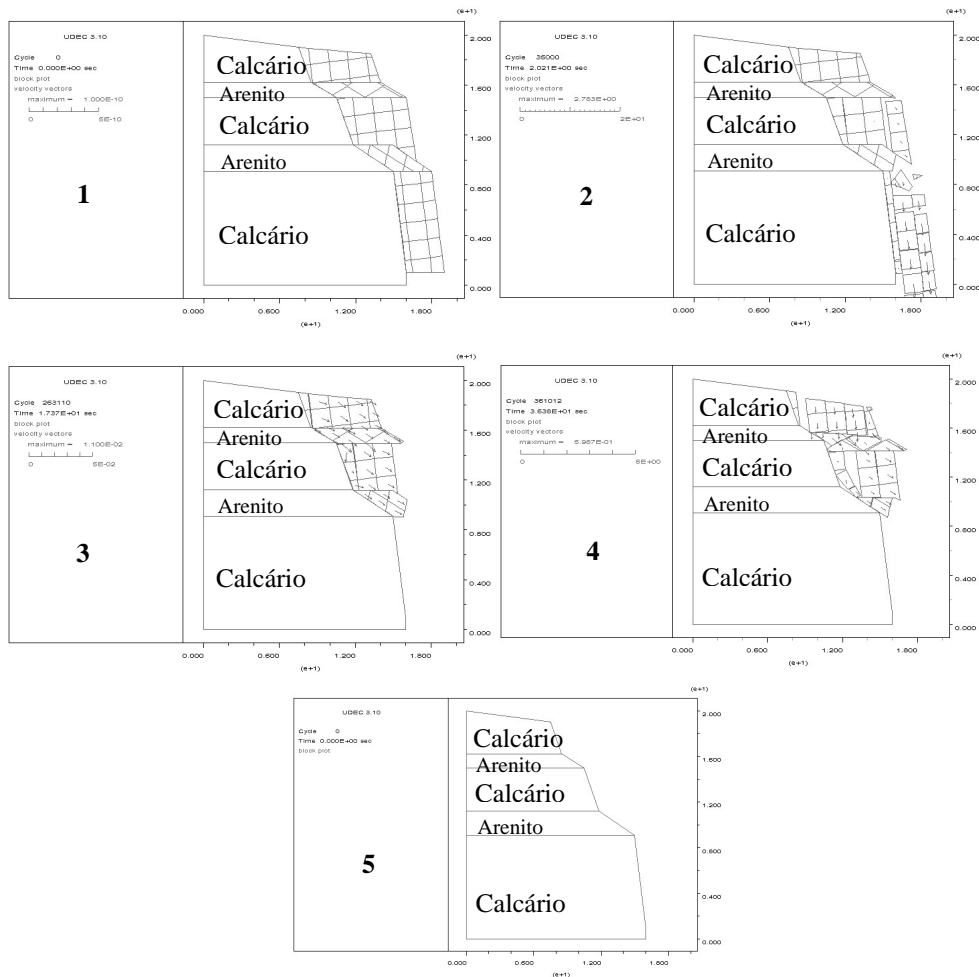


Fig. 1 – Simulação bidimensional do movimento de massa de vertente da arriba da praia de S.Julião, utilizando o programa UDEC (Universal Distinct Element Code).

numérico baseado na aplicação do método dos elementos distintos, que pode ajudar a explicar o fenómeno ocorrido.

A evolução das arribas é condicionada por processos marinhos e sub-aéreos, que provocam a ocorrência de movimentos de massa de vertente essencialmente de tipo planar. A erosão marinha no sopé é mais intensa ao nível do limite superior da faixa entre-marés, onde explora camadas de arenito mais brando e produz sapas com geralmente pouca profundidade. Os sedimentos de sopé existentes, blocos e areias, constituem carga abrasiva que potencia os efeitos da agitação marítima. Acima das sapas, as alternâncias de períodos secos e húmidos produzem variações volumétricas nos níveis mais brandos do maciço rochoso que tendem a sofrer desintegração granular superficial. Qualquer processo tende a deixar em consola as camadas de calcário sobrejacentes, motivando a ocorrência de queda de blocos definidos pelas famílias de descontinuidades, originando blocos mais ou menos irregulares.

A desintegração granular sofrida pelas camadas mais brandas da arriba, arenito, com conseqüente deslocamento do terreno para o exterior do talude provoca a abertura de descontinuidades pré-existentes nas camadas calcárias e propagação de superfícies de rotura através dos níveis dos arenitos, o que tem como possível conseqüência a formação de fendas verticais na parte superior do talude, e superfícies de deslizamento inclinadas na parte inferior do talude.

Este fenómeno pode descrever o ocorrido naquela arriba [3] onde se observam inclinações de superfícies de rotura associadas aos movimentos de tipo planar nas camadas de calcário de cerca de 76° e nas camadas de arenito de cerca de 29° (ver Fig.1).

4. RESULTADOS DE ENSAIOS REALIZADOS

Para o caso em estudo foram realizados vários ensaios laboratoriais sobre amostras de dois tipos de rocha ocorrentes na falésia da Ericeira. Estes ensaios, que foram efectuados sobre amostras de calcário e amostras de arenito, permitiram determinar, para aqueles dois tipos de rocha, as características de velocidade de propagação de ondas sónicas e correspondente módulo de deformabilidade dinâmico, de resistência à compressão uniaxial, de resistência à compressão pontual e de resistência ao desgaste (durabilidade).

Foram submetidos a propagação de ondas sónicas seis provetes cilíndricos, sendo três preparados de amostra de calcário e os outros três de amostra de arenito. Os valores de velocidade de propagação de ondas sónicas ao longo de provetes constituídos por calcário e por arenito permitiram calcular o módulo de deformabilidade dinâmico daqueles dois tipos de rocha. Uma vez determinada a velocidade de propagação de

ultra-sons em cada um dos provetes, calculou-se o módulo de deformabilidade dinâmico da respectiva rocha.

Os resultados obtidos nos ensaios de propagação de ondas sísmicas (tabela 1) efectuados sobre o calcário e sobre o arenito mostram que:

- Dentro de cada um dos tipos de rocha ensaiada, os valores de velocidade de propagação de ondas sísmicas medidos não apresentam dispersão muito significativa (entre 6195 e 6329m/s para o calcário e entre 4174 e 4302m/s para o arenito);
- Os valores do módulo de deformabilidade dinâmico determinados para as rochas ensaiadas indicam que o calcário possui elevadas características de deformabilidade (105 GPa) e que as características de deformabilidade do arenito (41,5 GPa) são muito razoáveis.

Tabela 1 - Velocidade de propagação de ondas sísmicas e módulo de deformabilidade dinâmico

Tipo de rocha	Provete	Peso volúmico (kN/m ³)	Velocidade de propagação (m/s)	Módulo de deformabilidade, E _d (GPa)	
				Individual	Média
Calcário	1	26,107	6195	102,5	105,0
	2	26,186	6282	105,4	
	3	26,244	6329	107,0	
Arenito	1	22,628	4174	40,1	41,5
	2	22,795	4302	42,6	
	3	22,315	4263	41,9	

Os ensaios de compressão uniaxial tiveram por objectivo determinar a resistência à rotura em compressão uniaxial do calcário e do arenito anteriormente referidos. Na Tabela 2 constam os resultados obtidos; nesta tabela, para além do tipo de rocha ensaiada, do número dos provetes e correspondentes secções, indica-se o valor da força que motivou a rotura de cada provete, o correspondente valor da tensão de rotura e, também, o valor médio desta última grandeza, respeitante a cada tipo de rocha.

Os resultados obtidos nos ensaios mostram que dentro de cada tipo de rocha ensaiada, os valores de resistência à rotura apresentam dispersões pouco significativas; o calcário apresenta muito boas características de resistência à rotura em compressão uniaxial (da ordem de 96 MPa), ao passo que os valores de resistência à rotura do arenito são cerca de 2,5 vezes inferiores às do calcário (cerca de 37 MPa).

Os ensaios de carga pontual tiveram por objectivo determinar os valores de índice de resistência à carga pontual, quer do calcário quer do arenito. Aqueles índices traduzem,

de certo modo, os valores de resistência da rocha à tracção. Foram realizados oito ensaios sobre amostras de calcário e oito ensaios sobre amostras de arenito.

Tabela 2 – Resistência à compressão uniaxial

Tipo de rocha	Provete	Secção do provete (cm ²)	Força de rotura (kN)	Tensão de rotura, σ_r (MPa)	
				Individual	Média
Calcário	1	13,72	135,5	98,85	95,7
	2		130,7	95,3	
	3		127,6	93,0	
Arenito	1		51,1	37,2	36,7
	2		46,1	33,6	
	3		53,8	39,2	

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão pontual (Tabela 3) mostram que os valores do índice de resistência ($I_{s(50)}$) determinados para o calcário apresentam significativa dispersão (variam entre 3,8 e 6,1 MPa), sendo de 4,7 MPa o valor médio daquele índice; o arenito apresenta valor médio de índice de resistência ($I_{s(50)}$) 2,4 MPa e os valores determinados nos diferentes ensaios realizados apresentam acentuada dispersão (variam entre 1,5 e 3,1 MPa); os valores de índice de resistência determinados para o calcário indicam que, em termos de resistência à rotura por tracção, aquela rocha exhibe boas características resistentes; os valores de índice de resistência do arenito indicam que, em termos de resistência à rotura por tracção, aquela rocha exhibe razoáveis características resistentes.

Os ensaios de durabilidade (Slake – Durability Index) tiveram por objectivo determinar a resistência à desintegração (desgaste), quer do calcário quer do arenito, quando sujeitos a ciclos de secagem e molhagem em condições desgastantes.

Os resultados obtidos em cada um dos ciclos do ensaio estão traduzidos na Tabela 4 e na Fig. 2. Naquela Tabela realçam-se os valores correspondentes ao 2º ciclo do ensaio, valores estes que, conforme atrás referido, definem o índice de durabilidade da rocha ensaiada.

Os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade mostram que o calcário ensaiado apresenta um elevado índice de durabilidade (99%), o que significa que aquela rocha apresenta grande resistência ao desgaste, mesmo quando sujeita a condições a isso favoráveis; a influência do número de ciclos de ensaio no índice de durabilidade do calcário (Fig. 2) é pouco acentuada; o arenito ensaiado apresenta um médio índice de durabilidade (94,1%), e quando sujeita a condições favoráveis ao desgaste, oferece média resistência à desagregação. A influência do número de ciclos de ensaio no índice

de durabilidade do arenito é muito acentuada (Fig. 2), visto verificar-se uma redução muito significativa (cerca de 6 vezes mais rápida do que o calcário - relação entre declives das rectas de correlação) do índice de durabilidade com o número de ciclos.

Tabela 3 – Resistência à compressão pontual

Tipo de Rocha	Ensaio N°	Diâmetro equivalente da amostra D_e (mm)	Factor de correcção (R)	Força de rotura (kN)	Índices de resistência (MPa)	
					I_s	$I_{s(50)}$
Calcário	1	41,4	0,918	10,0	5,8	5,3
	2	57,8	1,067	11,9	3,6	3,8
	3	45,3	0,956	9,9	4,8	4,6
	4	46,3	0,966	10,2	4,8	4,6
	5	44,1	0,945	8,8	4,5	4,2
	6	48,4	0,985	10,1	4,3	4,2
	7	57,6	1,066	14,1	4,2	4,5
	8	37,5	0,878	9,9	7,0	6,1
VALOR MÉDIO						4,7
Arenito	1	44,6	0,950	4,2	2,1	2,0
	2	45,4	0,957	3,4	1,6	1,5
	3	42,3	0,928	4,2	2,3	2,1
	4	36,9	0,872	4,8	3,5	3,0
	5	41,6	0,921	5,3	3,1	2,8
	6	35,1	0,853	3,3	2,7	2,3
	7	44,0	0,944	5,3	2,7	2,5
	8	35,7	0,859	4,6	3,6	3,1
VALOR MÉDIO						2,4

Tabela 4 – Ensaio de durabilidade (desgaste)

Tipo de rocha	Índice de durabilidade (% retida)				
	Ciclo				
	1º	2º	3º	4º	5º
Calcário	99,4	99,0	98,7	98,5	98,3
Arenito	97,7	94,1	92,7	91,6	90,5

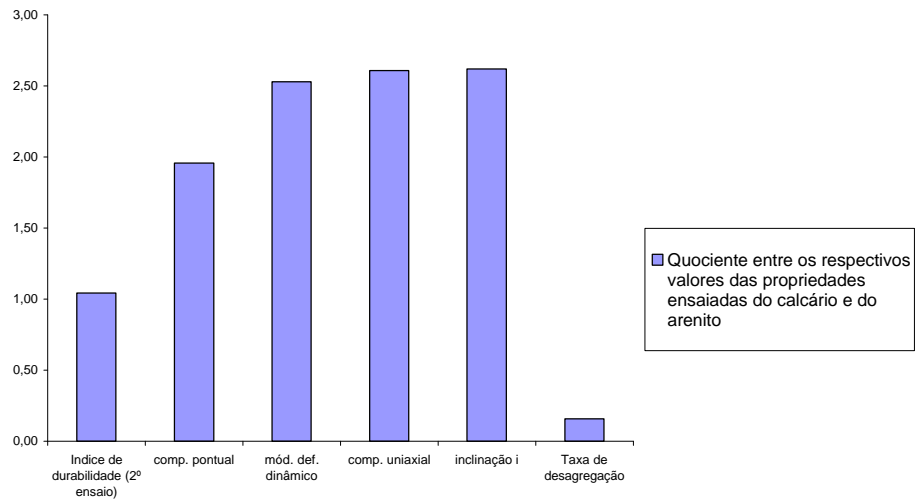


Fig. 2 – Quociente entre os respectivos valores das propriedades geotécnicas determinadas em laboratório do calcário e do arenito

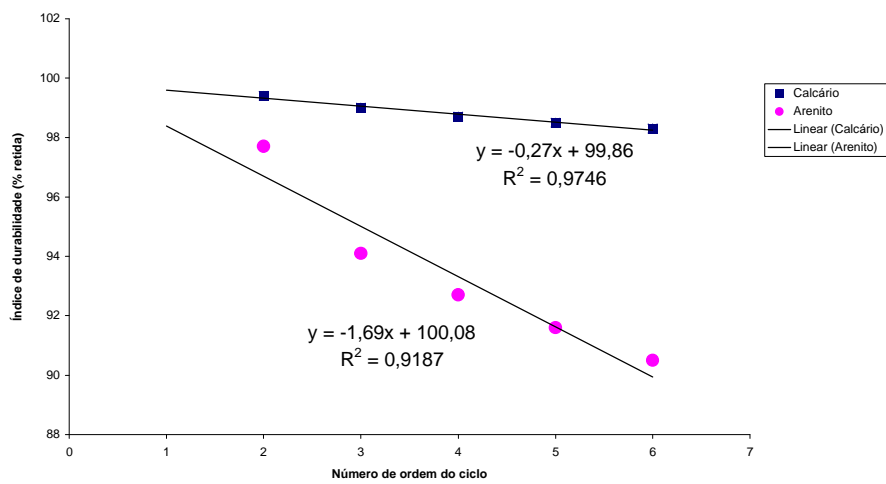


Fig. 3 – Resultados dos ensaios do teste de durabilidade e respectivas correlações

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nos ensaios sobre amostras de calcário e amostras de arenito extraídas na falésia da Ericeira permitem tirar algumas conclusões de ordem geral (ver fig. 3): o calcário possui muito boas características de velocidade de propagação de ondas sónicas e do correspondente módulo de deformabilidade dinâmico, de resistência à compressão uniaxial, de resistência à compressão pontual e de resistência ao desgaste; para o arenito, os valores que quantificam as propriedades anteriormente referidas para o calcário, indicam que as características daquele tipo de rocha se podem considerar razoáveis; de uma maneira geral, os valores que quantificam as características estudadas no calcário, são praticamente duplos dos valores que quantificam idênticas características do arenito.

A taxa de desagregação do arenito é aproximadamente 6 vezes maior que a do calcário.

Os movimentos de massas de vertentes em maciços rochosos constituídos por camadas alternadas de dois tipos de rocha, que apresentam características geotécnicas distintas como as que neste trabalho foram analisadas, aparentam mostrar relação consistente entre a inclinação da camada e o seu respectivo grau de desagregação. Mostra-se assim que este índice de durabilidade pode vir a constituir um indicador expedito da instabilidade da superfície rochosa de arribas costeiras.

REFERÊNCIAS

- [1] Marques, F., “As arribas do litoral do Algarve – Dinâmica, processos e mecanismos”. Dissertação doutoramento, Fac. Ciências da Univ. Lisboa. 1997.
- [2] Terzaghi, K., “Mechanisms of landslides”. Geol. Soc. Am. Eng. Geol., pp 83-123. Berkley. 1950
- [3] Dinis da Gama, C., “Geotecnia ambiental – perspectivas e aplicações”. Revista Geotecnia, nº 90, pp 9-47. SPG. 2000.