

# VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CORTE DE ROCHAS BRANDAS COM O SEU ÍNDICE DE DURABILIDADE

## VARIATION OF WEAK ROCKS SHEAR STRENGTH WITH THEIR SLAKE DURABILITY INDEX

Falcão Neves, P., *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, pfalcaoneves@mail.ist.utl.pt*  
Costa e Silva, M., *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, matilde.horta@ist.utl.pt*  
Reis e Sousa, M., *Centro de Geotecnia do IST, Lisboa, Portugal, reis.sousa@mail.ist.utl.pt.*

### RESUMO

Este trabalho teve por objectivo verificar as variações entre as características de corte e o índice de durabilidade (desgaste) de rochas brandas ou semi-brandas. Para isso, sobre provetes preparados de amostras de quatro tipos diferentes de rocha, foram realizados ensaios de corte directo e ensaios de durabilidade (Slake Durability Test), também designados por ensaios de desgaste em meio húmido.

Foram estabelecidas correlações entre os parâmetros resistentes, coesão e ângulo de atrito e o índice de durabilidade que reflecte a degradação do material rochoso ao longo do tempo utilizando para tal uma análise de regressão multilinear.

### ABSTRACT

The work intended to verify relationships between shear strength characteristics and the slake durability index of weak and semi-weak rocks. For this purpose, direct shear and slake durability (under wet conditions) tests were conducted on four different rock types.

Correlations between strength parameters (cohesion and friction angle) with slake durability indices were established, reflecting the degradation of rock materials through time, using a multilinear regression analysis.

### 1 – INTRODUÇÃO

É sabido que muitos maciços rochosos, numa primeira fase, considerados sãos, vão sofrendo diferentes graus de alteração ao longo do tempo, passando a apresentar comportamentos mistos de solos e rochas. É por se considerar tal ocorrência relativamente frequente, que se abordarão adiante aspectos relacionados com a durabilidade.

A avaliação da estabilidade de taludes, depende de parâmetros topográficos, geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos, climáticos e outros externos que possam induzir alterações no estado de tensão do maciço, nomeadamente nas tensões de corte

O deslizamento de grandes massas é o resultado de modificações das tensões de corte actuantes, ou porque se verificou um acréscimo desta no talude (em resultado da remoção do suporte lateral ou da base, de acções de sobrecarga, de acções dinâmicas ou do aumento de pressões laterais), ou porque se verificou uma redução da resistência ao corte do material (fruto de alterações na composição e textura do material, por efeito de reacções químicas, ou por efeitos de aumento da pressão intersticial nos poros, sobretudo no caso dos solos).

O factor de segurança ao deslizamento é assim normalmente determinado pelo quociente entre a resistência ao corte do material e as tensões de corte instaladas na superfície potencial de deslizamento.

A determinação deste factor de segurança depende de: parâmetros topográficos (identificação do talude no que respeita à sua localização através de coordenadas geográficas); parâmetros geológicos (a informação que respeita à litologia, grau de alteração do maciço, grau de fracturação, principais descontinuidades, suas atitudes, espaçamentos, aberturas, preenchimentos); parâmetros hidrogeológicos (parâmetros hidromecânicos, índice de adsorção, permeabilidade, capilaridade, teor de água); parâmetros geotécnicos (informação no que respeita a parâmetros geomecânicos, comportamento resistente, coesão, ângulo de atrito, resistência à tracção, índice de durabilidade); parâmetros climáticos (informação climática como registos da precipitação, amplitudes térmicas, etc.); e outros parâmetros externos que possam induzir alterações nas tensões de corte, (por exemplo acções desenvolvidas pelo homem: existência de obras locais, a sua influência em termos de cargas a transmitir ao maciço ou eventual influência nas redes de drenagem naturais do maciço; parâmetros de funcionamento de infraestruturas de protecção, caudais máximos nas valetas, furos drenantes, etc.).

A sobreposição desta informação permite, de acordo com o estabelecimento de critérios de segurança, a definição de zonas com diferentes graus de potencial instabilização de encostas e taludes.

O cálculo do factor de segurança é feito com base em valores observados “in situ” e/ou medidos em laboratório. Contudo, esta abordagem não prevê a variabilidade e incerteza dos parâmetros intervenientes e sobretudo, não permite avaliar a diminuição das características resistentes dos maciços rochosos devida à durabilidade, ao longo do tempo.

Esta situação é particularmente crítica naqueles taludes que são formados por maciços rochosos brandos, onde a durabilidade causada pelo clima é mais intensa, provocando a rotura de taludes que antes eram considerados estáveis (Figura 1).

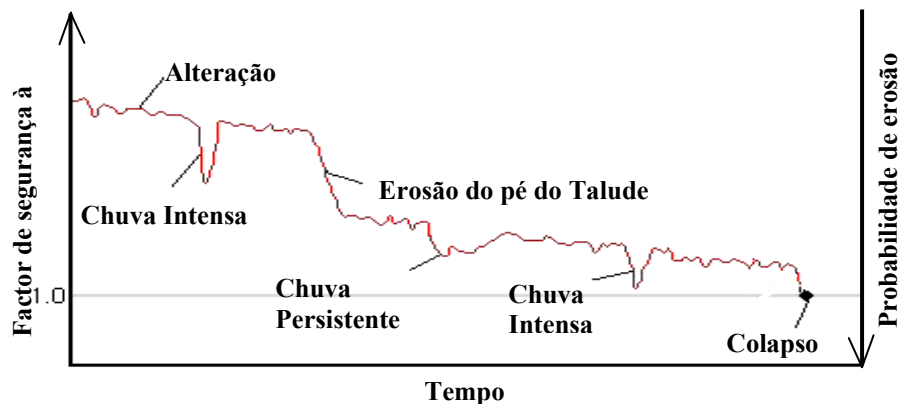


Figura 1 – Probabilidade de erosão de um talude com a precipitação ao longo do tempo.  
(Adaptado de Tony Price, 2004)

Assim, em Engenharia de Taludes, podem apontar-se os seguintes tipos de variabilidade e incerteza na sua caracterização geológica e geomecânica (Dinis Gama 1983):

Variabilidades:

- de natureza geológica, resultantes da composição heterogénea dos solos e rochas que dão origem a propriedades mecânicas afectadas por anisotropias, anelasticidades, efeitos de descontinuidades, etc;
- provenientes de erros de observação, devidos a deficiências do próprio observador, dos instrumentos utilizados na medição, do meio ambiente onde é efectuada a avaliação e até devidos às perturbações causadas no objecto observado pelo sistema de medida;

- resultantes de erros de amostragem, onde se destacam a escolha imprópria do tamanho da amostra e a sua representatividade, a eficiência do processo de amostragem escolhido;

Incertezas:

- ocorrência de cargas inesperadas ou imprevistas durante a vida útil do talude;
- ignorância do comportamento real do talude;
- imperfeição das observações e medidas de dados necessários ao projecto;
- simplificações ou aproximações empregues nos métodos de análise de instabilidade.

## 2. DURABILIDADE E A SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE DE TALUDES AO LONGO DO TEMPO

A durabilidade é entendida como uma característica do material e pretende medir a maior ou menor susceptibilidade à erosão em meio húmido de um dado maciço rochoso.

A erosão é uma variável fundamental para o estudo da estabilidade dos taludes. Vários autores têm ensaiado correlações entre a evolução observada e características de resistência mecânica, tal como referido em Marques (1997), 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).

No mecanismo que leva ao deslizamento de massas considera-se que a diminuição da resistência ao corte é, sobretudo, devido à acção da água na rede de fracturas principais. Assim, como nestes deslizamentos de massa, se verifica a instabilização de grandes volumes e as superfícies de deslizamento mais prováveis variam em profundidade, de acordo com a variação do nível freático, estes mecanismos são aqui estudados atendendo sobretudo aos valores de precipitação acumulada. Os valores de precipitação acumulada são correlacionados com a variação dos níveis piezométricos, de acordo com o historial local observado.

Consideram-se parâmetros essenciais com interesse geotécnico para a caracterização do tipo de material, o índice de durabilidade (determinado segundo as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas para o ensaio Slake Durability Test) bem como os parâmetros resistentes, coesão e ângulo de atrito do material.

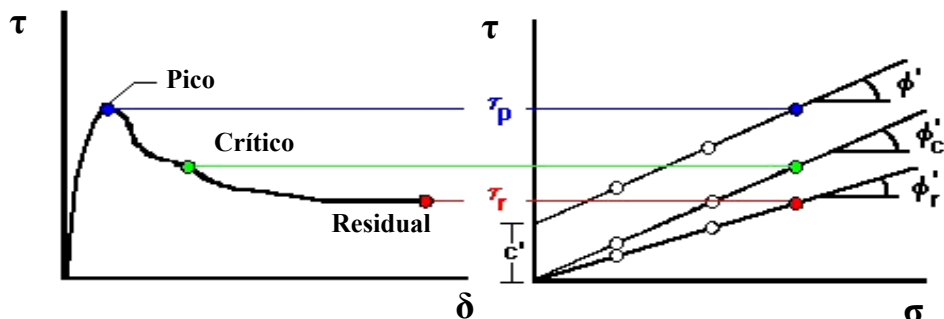


Figura 2 – Variação típica da resistência ao corte do material rochoso.

O interesse conferido a estes últimos parâmetros, advem do índice de durabilidade ser determinado com base na perda de peso verificada após imersão e rotação da amostra, colocada

no dispositivo de ensaio, determina-se assim uma resistência ao desgaste. O desgaste conduz inevitavelmente a uma alteração da resistência ao corte do material (Figura 2).

Achamos, no entanto pertinente, uma referência particular à importância da durabilidade. O estudo detalhado desta grandeza será efectuado em laboratório, ensaiando amostras de material proveniente dos taludes em estudo no equipamento de Slake Durability .

### 3 – ENSAIOS LABORATORIAIS

Foram ensaiadas sobre quatro litologias diferentes, retiradas de taludes com diferentes localizações geográficas. Todos estes materiais foram considerados rochas brandas ou semi-brandas. Realizaram-se ensaios de corte directo e ensaios de durabilidade (Slake Durability Test). As quatro litologias ensaiadas foram: uma marga clara com minerais arenosos, (designada de marga clara-gresosa), uma marga escura, um calcário margoso com apreciável percentagem de minerais arenosos (designado de calcário margo-gresoso) e um arenito cinzento de grão grosseiro. A amostra de marga clara-gresosa e a amostra de calcário margo-gresoso foram colhidas na encosta das Portas do Sol de Santarém, a amostra de marga escura foi colhida numa pedreira de rocha calcária na zona de Santa Iria de Azóia e a amostra de arenito foi colhido na falésia do Vimeiro. As amostras de marga eram amostras indeformadas.

Quanto à amostra de arenito e às amostras de marga, tanto a sua estrutura como a sua textura, evidenciavam claramente que se tratava de rochas brandas a muito brandas.

Relativamente ao calcário margo-gresoso, dada a coerência que aparentava, foram também efectuados ensaios de compressão uniaxial e de compressão diametral sobre provetes preparados da amostra daquela rocha, para se determinar a resistência à compressão uniaxial e à tracção, por forma a classificar, quanto à consistência, aquele tipo de rocha. Os valores obtidos nestes ensaios, que são apresentados nas Tabelas 1 e 2, indicam tratar-se de uma rocha semi-branda.

Tabela 1 – Resistência à compressão uniaxial – calcário margo-gresoso

Provete	Secção (cm <sup>2</sup> )	Forças de rotura (kN)	Tensões de rotura, $\sigma_t$ (MPa)	
			Individual	Média
1	13,8	22,9	16,6	13,8
2		18,8	13,6	
3		16,9	12,2	
4		17,4	12,6	

Tabela 2 – Resistência à compressão diametral - calcário margo-gresoso.

Provete	Dimensões (mm)		Forças de rotura (kN)	Tensões de rotura, $\sigma_t$ (MPa)	
	Diâmetro	Espessura		Individual	Média
1	42,0	22,7	4,58	3,06	2,59
2		22,0	3,38	2,33	
3		22,2	4,91	3,35	
4		21,6	3,06	2,15	
5		22,8	3,14	2,09	
6		22,8	3,11	2,07	
7		23,2	4,34	2,84	
8		24,3	5,13	3,20	
9		23,0	3,74	2,46	
10		19,5	3,03	2,36	

### 3.1 - Ensaios de corte directo

Os ensaios de corte directo tiveram por objectivo determinar as características de resistência das rochas quando sujeitas a esforços de corte.

Das amostras de cada um dos quatro tipos de rocha em estudo foram preparados provetes para serem submetidos a ensaio de corte directo; do arenito foram preparados três provetes e dos demais tipos de rochas foram preparados quatro provetes. Dadas as acentuadas diferenças entre as características resistentes das margas e as do calcário margo-gresoso e do arenito, facto que obrigou a utilização de equipamentos distintos. As amostras de marga foram ensaiados num equipamento de corte utilizado em ensaios de solos e os provetes preparados da amostra de calcário margo-gresoso e da amostra de arenito foram ensaiados em equipamento de corte utilizado em ensaios de rochas consistentes.

Das amostras de cada tipo de marga foram preparados, por meio de talhe com ferramenta cortante, quatro provetes cilíndricos com o diâmetro de 62 mm e a altura de 20 mm. Com o auxílio de máquina de disco diamantado, foram preparados quatro provetes de calcário margo-gresoso e três provetes de arenito, provetes esses que tinham a forma primática com altura de 80 mm e com secção quadrada da ordem de 50 cm<sup>2</sup>. Todos os provetes ensaiados estavam saturados.

O ensaio de corte directo consistiu, basicamente, na aplicação de uma força normal à esperada superfície de rotura do provete, seguida da aplicação de uma força tangencial crescente até que ocorresse a rotura. O ensaio de cada provete foi constituído por duas fases distintas. Numa primeira fase, depois de instalado o provete na máquina de ensaio, transmitiu-se-lhe a força correspondente à tensão normal previamente definida para o ensaio. Concluída a primeira fase, e mantendo constante a tensão normal, iniciou-se a segunda fase do ensaio, designada por fase de corte. Esta fase consistiu em aplicar ao provete uma força tangencial crescente até que se verificasse a rotura (resistência máxima) do material em ensaio. Atingida a resistência máxima (pico), continuou a transmitir-se força tangencial ao provete até que entre as duas superfícies de rotura se registasse um deslizamento da ordem de 7 mm, por forma a ser determinada a resistência residual.

Qualquer das máquinas utilizadas nos ensaios está equipada com sistemas independentes de aplicação de forças normais e de forças tangenciais e com sistemas medidores de deslocamentos que permitem medir os deslocamentos tangenciais no provete, ocorridos durante o ensaio.

Os resultados obtidos nos ensaios de corte estão traduzidos na Tabela 3 onde se indicam os valores médios dos parâmetros resistentes (coesão e ângulo de atrito) para cada uma das litologias.

Tabela 3 – Valores médios das resistências ao corte resultantes dos ensaios laboratoriais.

Litologia	Resistência	Coesão (Kpa)	Ângulo atrito (°)	Coefficiente Correlação
Marga clara-gresosa	Pico	21	26	0.992
	Residual	17	26	0.995
Marga escura	Pico	108	16.5	0.976
	Residual	67	12.5	0.967
Calcário margo-gresoso	Pico	2190	48	0.998
	Residual	190	38	0.999
Arenito cinzento grão grosseiro	Pico	560	58	0.998
	Residual	160	48	0.999

### 3.2 – Ensaios de durabilidade (Slake Durability Test)

Estes ensaios destinaram-se a determinar os índices de durabilidade (resistência ao desgaste) dos quatro tipos de rocha atrás referidos (marga clara-gresosa, marga escura, calcário margo-gresoso e arenito), quando sujeitas a ciclos de secagem e molhagem em condições severas.

Para a realização deste tipo de ensaio utilizou-se um equipamento adequado, *Slake Durability Apparatus*.

O ensaio de durabilidade da rocha consiste, fundamentalmente, em sujeitar o material rochoso a ciclos de secagem e molhagem.

Das amostras de marga clara-gresosa, marga escura e calcário margo-gresoso foram preparados quatro provetes e da amostra de arenito foram preparados dois provetes. Cada provete foi constituído por dez pedaços de rocha com forma aproximadamente esférica, com cerca de 50 g de peso cada, perfazendo assim, cada provete, um total de material rochoso com cerca de 500 g. Na fase respeitante à molhagem de cada ciclo, os pedaços de rocha foram contidos dentro dos tambores metálicos do equipamento, tambores estes parcialmente imersos em água e submetidos a movimento de rotação por um período de tempo de dez minutos, a que corresponderam 200 rotações.

Quer no início do ensaio quer imediatamente após cada uma das fases de molhagem, os provetes foram secos em estufa a 105°C, durante um período de tempo da ordem de 24 horas, e determinados os respectivos pesos secos.

Os provetes de marga foram submetidos a três ciclos de secagem e de molhagem e os provetes de calcário margo-gresoso e os de arenito foram submetidos a quatro ciclos.

Os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade estão traduzidos nas Tabelas 4 a 7. Naquelas Tabelas indicam-se, relativamente ao peso seco do provete antes do início do ensaio, a percentagem de material rochoso retido no tambor após cada ciclo (material não desgastado) e são postos em destaque os valores correspondentes ao 2º ciclo do ensaio, valores estes que, conforme recomendado pela ISRM, definem o índice de durabilidade da rocha ensaiada.

Tabela 4 – Resistência ao desgaste em meio húmido (durabilidade) – marga clara-gresosa.

PROVETE	Índice de durabilidade, $I_d$ (% retida)		
	Ciclo		
	1º	2º	3º
1	39,2	<b>34,2</b>	32,4
2	23,2	<b>18,2</b>	17,3
3	30,9	<b>28,1</b>	26,8
4	51,0	<b>47,5</b>	45,9
Valores médios	36,1	<b>32,0</b>	30,6

Tabela 5 – Resistência ao desgaste em meio húmido (durabilidade) – marga escura.

PROVETE	Índice de durabilidade, $I_d$ (% retida)		
	Ciclo		
	1º	2º	3º
1	68,2	<b>44,4</b>	25,8
2	67,9	<b>43,0</b>	26,1
3	67,1	<b>54,0</b>	38,8
4	72,2	<b>63,8</b>	54,2
Valores médios	68,8	<b>51,3</b>	36,2

Tabela 6 – Resistência ao desgaste em meio húmido (durabilidade) – calcário margo-gresoso.

PROVETE	Índice de durabilidade, I <sub>d</sub> (% retida)			
	Ciclo			
	1º	2º	3º	4º
1	95,5	<b>92,6</b>	90,6	89,0
2	96,2	<b>94,0</b>	92,2	90,8
3	95,2	<b>93,0</b>	91,0	89,7
4	94,3	<b>91,0</b>	88,3	86,0
Valores médios	95,3	<b>92,6</b>	90,5	88,9

Tabela 7 – Resistência ao desgaste em meio húmido (durabilidade) – arenito cinzento de grão grosseiro.

PROVETE	Índice de durabilidade, I <sub>d</sub> (% retida)			
	Ciclo			
	1º	2º	3º	4º
1	83,7	<b>78,0</b>	74,3	71,9
2	84,9	<b>79,3</b>	75,5	72,2
Valores médios	84,3	<b>78,6</b>	74,9	72,0

### 3.3 – Correlação entre os parâmetros resistentes e o índice de durabilidade

Para a compreensão da variação dos parâmetros resistentes com o índice de durabilidade utilizou-se um processo estatístico de regressão multivariada.

Verificou-se a existência de correlação entre os três parâmetros estudados e determinados laboratorialmente, que se traduz pela Equação 1.

$$I_D = 16,67 c^{0,234} \phi^{-0,005} \quad \text{(Equação 1)}$$

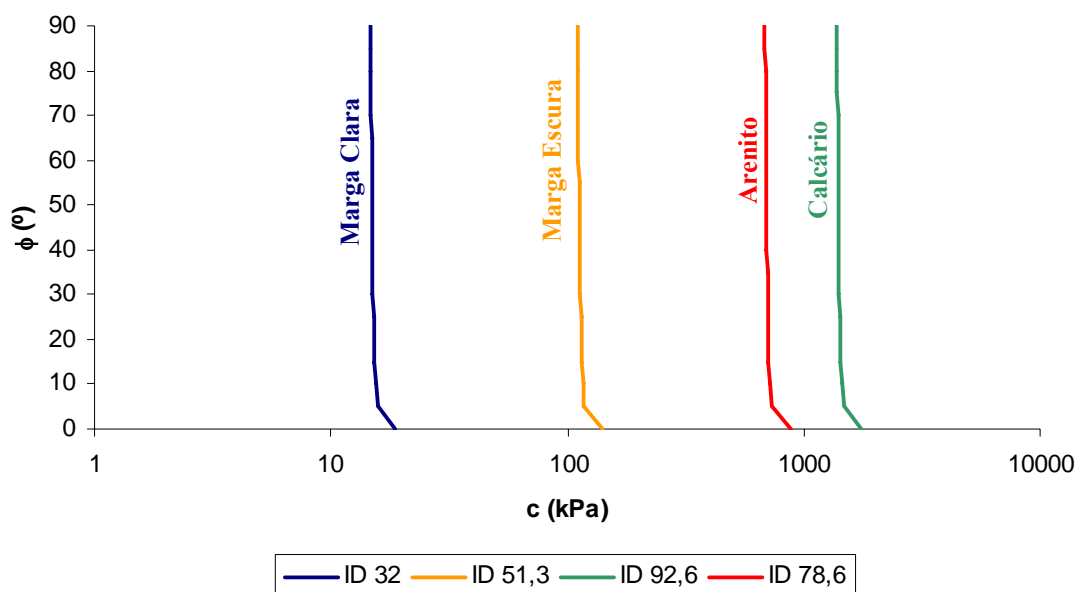


Figura 3 – Evolução do índice de durabilidade da rocha com a coesão e ângulo de atrito.

Esta expressão foi determinada através de métodos estatísticos de regressão multivariada, obtendo-se uma correlação de 0,98 (regressão obtida através do programa computacional Mlinreg).

Na Figura 3 apresenta-se a evolução do índice de durabilidade da rocha (2º ciclo) com a coesão e ângulo de atrito (valores de pico) obtidos para todas as litologias. Esta representação gráfica foi obtida através da expressão anterior, para os valores de ID correspondentes às amostras ensaiadas.

Relativamente aos parâmetros resistentes residuais não se estabelecem correlações estatísticas com o ID por se considerar que o índice de correlação obtido, da ordem dos 86%, não indicia fiabilidade estatística. Julgamos pois ser necessário proceder a novas investigações com um maior número de amostras.

#### **4 - CONCLUSÕES**

Neste trabalho pretendeu-se avaliar possíveis correlações entre o Índice de Durabilidade e as características de corte utilizadas para o cálculo do factor de segurança de taludes (coesão e ângulo de atrito). Esta tentativa não pretende ignorar a multiplicidade de aspectos e propriedades envolvidos na determinação da resistência à erosão dos taludes; porém, deve ser encarada como uma contribuição no sentido de facilitar a aquisição de informação qualitativa, a partir de amostras de rocha fragmentadas, sem qualidade para a realização de outros tipos de ensaios laboratoriais correntes como os ensaios de corte directo.

Para além da esperada influência da litologia no processo de degradação, verificou-se ainda que, é a característica resistente coesão aquela que mais é influenciada por este processo. Tal facto, é facilmente compreendido, se atendermos a que este ensaio, em meio húmido, se destina a desagregar, ou seja limita-se a quebrar as eventuais ligações entre partículas.

Já no que respeita ao ângulo de atrito interno, esta influência é menos notada, dado que no ensaio não se promove o impacto e, portanto, não há variação significativa do calibre das partículas.

A regressão multilinear utilizada para os valores de pico (Equação 1), ilustra estas considerações que se teceram, uma vez que os expoentes da coesão e ângulo de atrito têm grandezas completamente diferentes.

#### **REFERÊNCIAS**

Marques, F., “As arribas do litoral do Algarve – Dinâmica, processos e mecanismos”. Dissertação doutoramento, Fac. Ciências da Univ. Lisboa. 1997.

Sunamura, T. 1992. *Geomorphology of Rocky Coasts*. John Wiley and Sons, Chichester.

Dinis da Gama, C. (1983): “Métodos computacionais de projecto de taludes em mineração”. Tese de livre docência, Universidade de S. Paulo, Brasil.