

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 resistência ao 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.

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 performed on four different rock types.

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

1. INTRODUÇÃO

É sabido que muitos maciços rochosos, numa primeira fase, considerados são, 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, ou porque se verificou um acréscimo das tensões actantes 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 sua composição e textura, por efeito de reacções químicas, ou por efeitos de aumento da pressão intersticial, 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 discontinuidades, suas atitudes, espaçamentos, aberturas, preenchimentos); parâmetros hidrogeológicos (parâmetros hidromecânicos, índice de adsorção, permeabilidade, capilaridade, teor em 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 sua alterabilidade, ao longo do tempo.

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

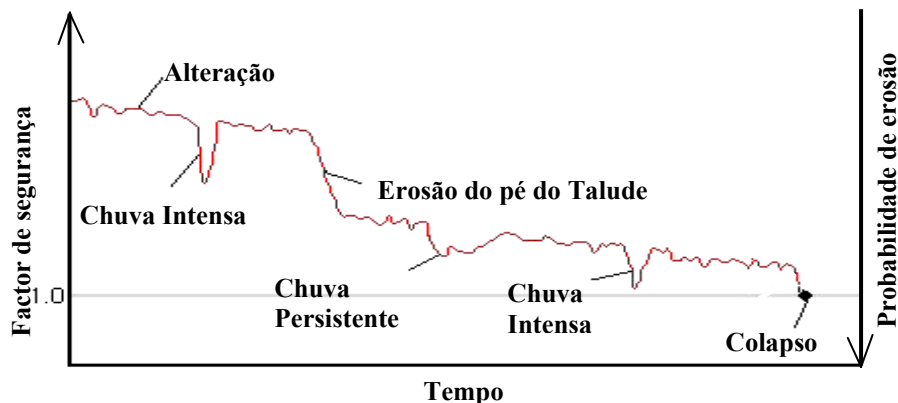


Figura 1 – Probabilidade de erosão de um talude com a precipitação ao longo do tempo.
(Adaptado de Tony Price, 2004)

Assim, em Engenharia de Taludes, podem apontar-se os seguintes tipos de variabilidade e incerteza na sua caracterização geológica e geomecânica [3]:

Variabilidades:

- de natureza geológica, resultantes da composição heterogénea dos solos e rochas que dão origem a propriedades mecânicas afectadas por anisotropias, anelasticidades, efeitos de discontinuidades, 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 durabilidade 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 [1], a resistência à compressão simples, determinada directamente; estimada com o martelo de Schmidt ou com o penetrómetro de bolso; a resistência ao corte e a coesão, a resistência à tracção e à penetração (segundo vários autores referidos em [2]).

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.

O interesse conferido a estes últimos parâmetros, advém do índice de durabilidade ser determinado com base na perda de peso verificada após imersão e rotação da amostra colocada no dispositivo de ensaio, pelo que se determina assim uma resistência ao desgaste. A alteração conduz inevitavelmente a uma diminuição da resistência ao corte do material.

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 amostras de 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 colhida 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 tratavam 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 de forma a classificar, quanto à resistência, aquele tipo de rocha. Os valores médios obtidos nestes ensaios ($\sigma_c = 13,8$ MPa e $\sigma_t = 2,59$ MPa) indicam tratar-se de uma rocha semi-branda.

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 ensaios 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 cm². 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 ensaios de corte conduziram aos registos gráficos apresentados nas figuras 2 a 5, evidenciando correlações elevadas.

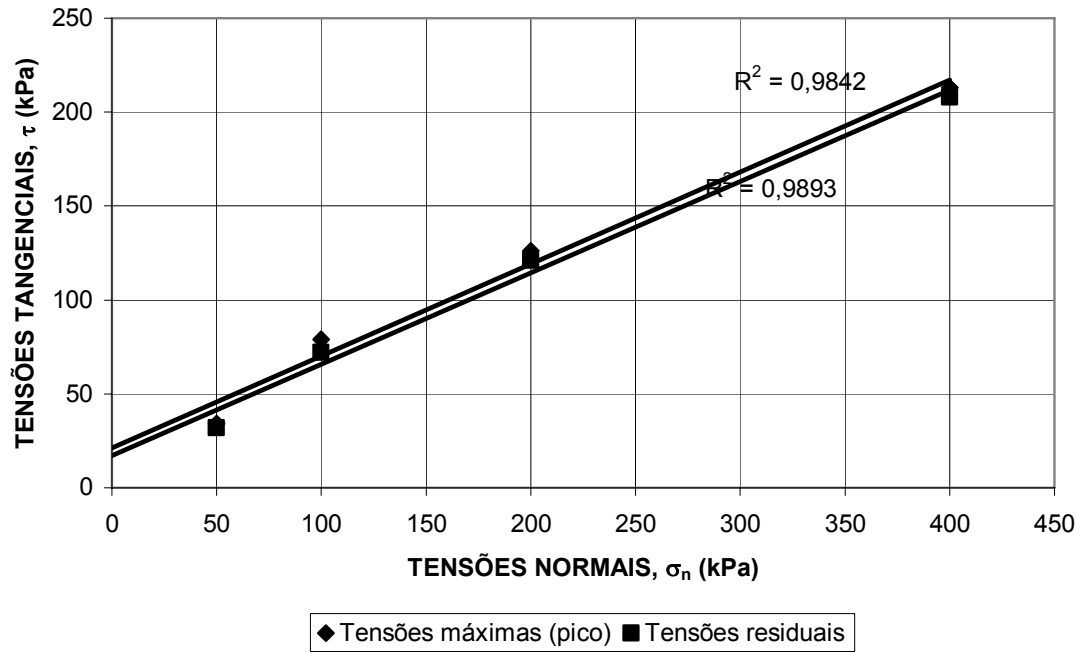


Fig. 2 - Ensaio de corte directo margem clara-gresosa

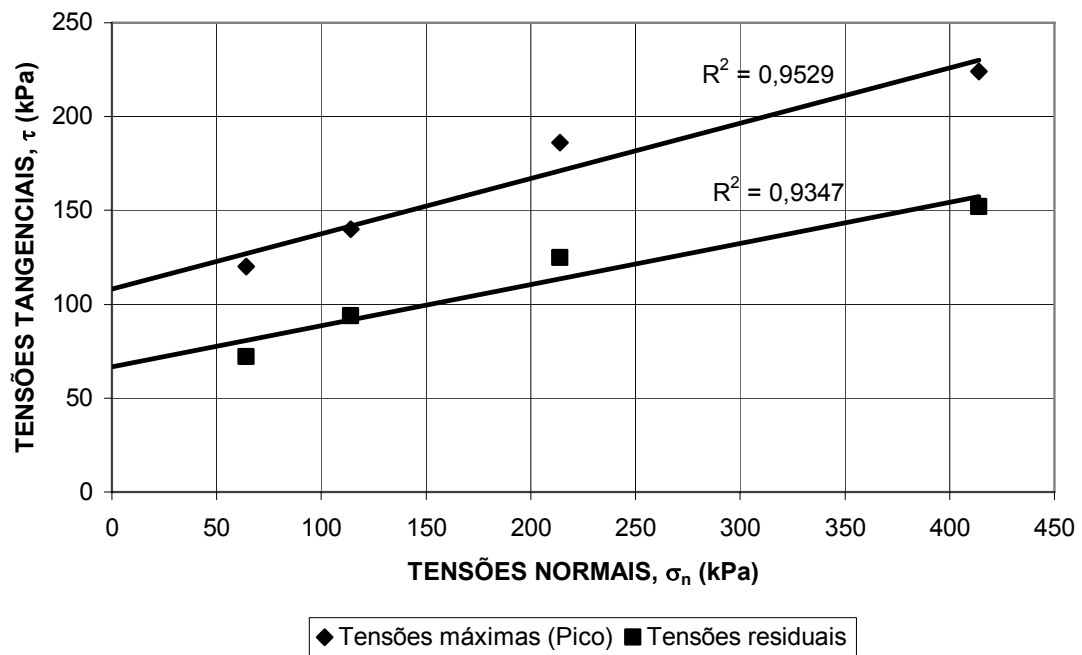


Fig. 3 - Ensaio de corte directo margem escura

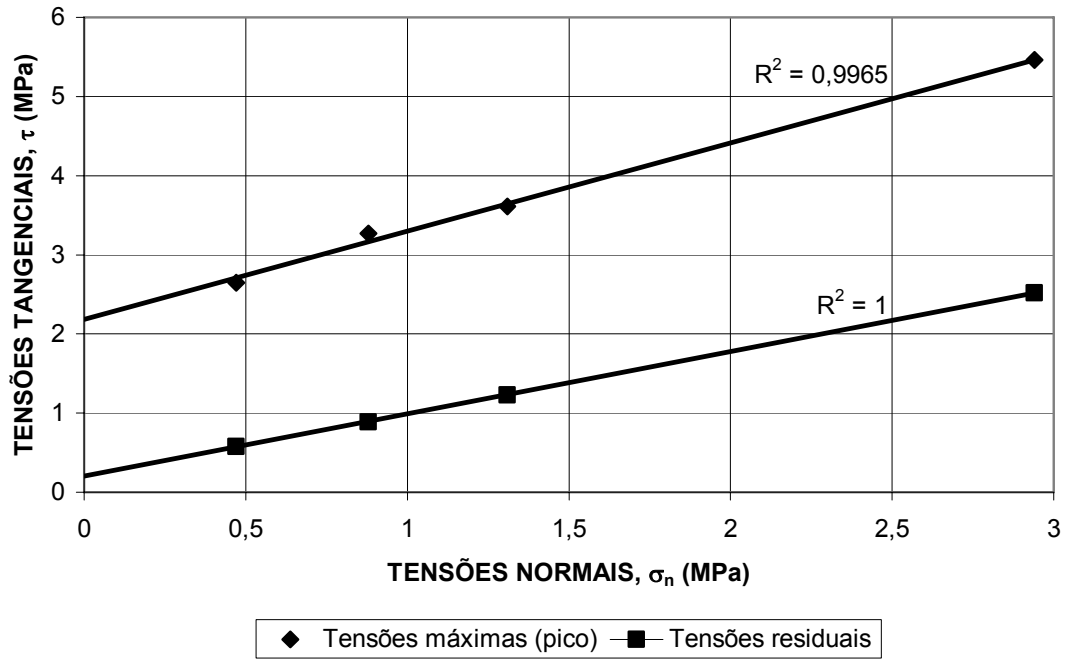


Fig. 4 - Ensaio de corte directo calcário margo gresoso

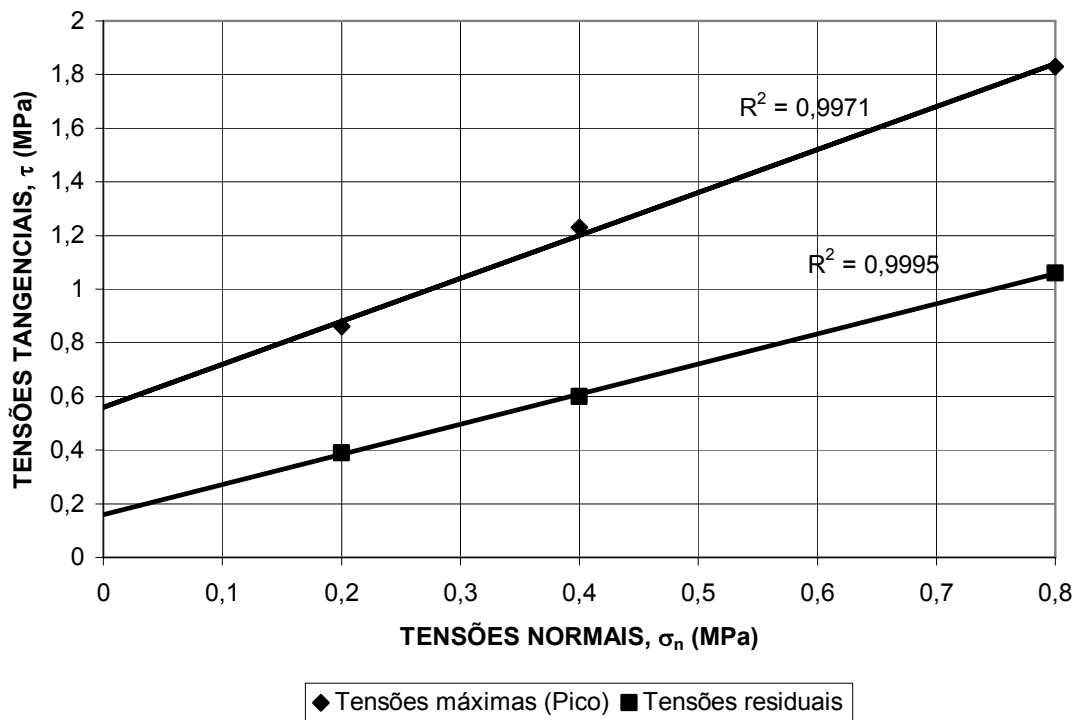


Fig. 5 - Ensaio de corte directo arenito cinzento de grão grosseiro

Os resultados obtidos nestes ensaios, estão traduzidos na Tabela 1, onde se indicam os valores médios dos parâmetros resistentes (coesão e ângulo de atrito) para cada uma das litologias.

Tabela 1 – Valores médios dos parâmetros de corte resultantes dos ensaios laboratoriais.

| Litologia | Coesão (kPa) | | Ângulo atrito (°) | |
|---------------------------------|--------------|----------|-------------------|----------|
| | Pico | Residual | Pico | Residual |
| Marga clara-gresosa | 21 | 17 | 26 | 26 |
| Marga escura | 108 | 67 | 16,5 | 12,5 |
| Calcário margo-gresoso | 2190 | 190 | 48 | 38 |
| Arenito cinzento grão grosseiro | 560 | 160 | 58 | 48 |

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 rotação em tambores em meio húmido seguidos de secagem.

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 arredondados, com cerca de 50 gf de peso cada, perfazendo assim, cada provete, um total de material rochoso com cerca de 500 gf. 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 | | |
| | 1° | 2° | 3° |
| 1 | 39,2 | 34,2 | 32,4 |
| 2 | 23,2 | 18,2 | 17,3 |
| 3 | 30,9 | 28,1 | 26,8 |
| 4 | 51,0 | 47,5 | 45,9 |
| Valor médio | 36,1 | 32,0 | 30,6 |

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

| PROVETE | Índice de durabilidade, I_d (% retida) | | |
|-------------|--|-------------|------|
| | Ciclo | | |
| | 1° | 2° | 3° |
| 1 | 68,2 | 44,4 | 25,8 |
| 2 | 67,9 | 43,0 | 26,1 |
| 3 | 67,1 | 54,0 | 38,8 |
| 4 | 72,2 | 63,8 | 54,2 |
| Valor médio | 68,8 | 51,3 | 36,2 |

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

| PROVETE | Índice de durabilidade, I_d (% retida) | | | |
|-------------|--|-------------|------|------|
| | Ciclo | | | |
| | 1° | 2° | 3° | 4° |
| 1 | 95,5 | 92,6 | 90,6 | 89,0 |
| 2 | 96,2 | 94,0 | 92,2 | 90,8 |
| 3 | 95,2 | 93,0 | 91,0 | 89,7 |
| 4 | 94,3 | 91,0 | 88,3 | 86,0 |
| Valor médio | 95,3 | 92,6 | 90,5 | 88,9 |

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

| PROVETE | Índice de durabilidade, I_d (% retida) | | | |
|-------------|--|-------------|------|------|
| | Ciclo | | | |
| | 1° | 2° | 3° | 4° |
| 1 | 83,7 | 78,0 | 74,3 | 71,9 |
| 2 | 84,9 | 79,3 | 75,5 | 72,2 |
| Valor médio | 84,3 | 78,6 | 74,9 | 72,0 |

3.3 Correlação entre os parâmetros resistentes e o índice de durabilidade

Para uma melhor compreensão da influência da coesão e ângulo de atrito com o índice de durabilidade estabeleceram-se correlações que se verificaram ser “fortes” para o primeiro parâmetro (Fig. 6 e 7) e bastante “fracas ou inexistentes” para o segundo parâmetro. Relativamente a este último pode ser prematuro retirar conclusões pois que se observa uma grande influência com a litologia (margas clara e escura de granulometria muito fina e calcários gresoso e arenito de grão grosseiro).

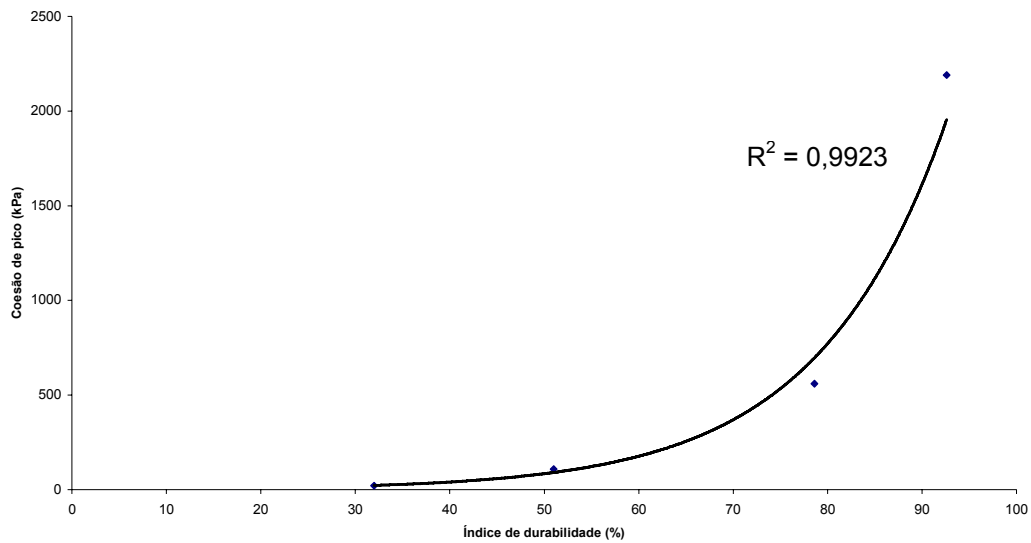


Fig.6 – Variação do índice de durabilidade com a coesão de pico.

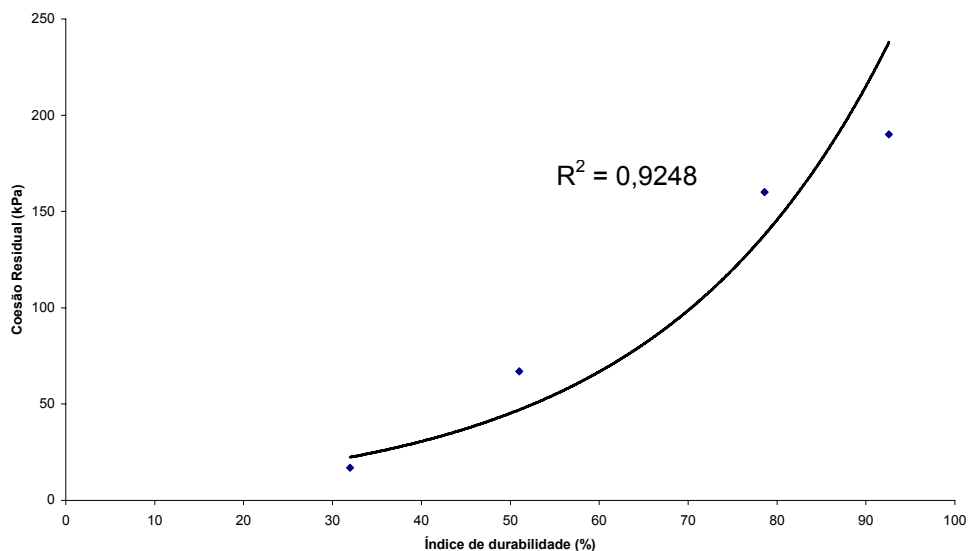


Fig.7 – Variação do índice de durabilidade com a coesão residual.

Relativamente aos parâmetros ângulo de atrito (pico e residual) não se estabelecem correlações com o I_d por se considerar que o índice de correlação obtido, é inferior a 59% quer para o valor de pico quer para o residual. Julgamos pois ser necessário proceder a novas investigações com um maior número de amostras das mesmas litologias ora ensaiadas.

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.

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, como se comprova com as correlações obtidas, da ordem de 92% para a coesão residual e cerca de 99% para a coesão de pico.

Já no que respeita ao ângulo de atrito interno, a variação com o I_d é pouco significativa. Esta observação que não deve ser conclusiva poderá vir a ser ou não comprovada após a realização de um maior número de ensaios para as litologias aqui estudadas.

5. REFERÊNCIAS

- [1] Marques, F., (1997) - As arribas do litoral do Algarve – Dinâmica, processos e mecanismos. Dissertação doutoramento, Fac. Ciências da Univ. Lisboa..
- [2] Sunamura, T. 1992 – Geomorphology of Rocky Coasts. John Wiley and Sons, Chichester.
- [3] Dinis da Gama, C. (1983) - Métodos computacionais de projecto de taludes em mineração. Tese de livre docência, Universidade de S. Paulo, Brasil.