

# SOBRE A DETERMINAÇÃO QUANTITATIVA DA ALTERABILIDADE DE ROCHAS – UM CASO DE APLICAÇÃO\*

## About the Quantitative Determination of Rock Weatherability – A Case History

por

J. DELGADO RODRIGUES\*\*

RESUMO – Fazem-se algumas considerações sobre a determinação quantitativa da alterabilidade de rochas e apontam-se algumas dificuldades e limitações que afectam essa determinação. Apresenta-se o estudo de uma rocha dolerítica usada em cubos de pavimentação na cidade de Lisboa, durante o qual foi possível ultrapassar as dificuldades de ensaio, permitindo obter a determinação quantitativa da alterabilidade desta rocha.

SYNOPSIS – Considerations are made on the quantitative determination of rock weatherability, some difficulties and limitations being pointed out. The study of a doleritic rock used for paving blocks is reported. In this study test difficulties could be overcome, and a quantitative determination of rock weatherability was carried out.

### 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

É um facto de observação corrente que as rochas se alteram com o tempo. No decurso deste processo elas apresentam mudanças nas suas características mecânicas e na sua composição química, afectando de forma notória a vida do Homem. É desta forma que são originados os solos, suporte indispensável da vida na Terra; da mesma forma as rochas interferem com a economia das obras de engenharia uma vez que impõem condições para a selecção e tratamento de

---

\* Trabalho apresentado no III International Congress of Engineering Geology. Madrid. September 1978.

\*\* Geólogo, Especialista do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

fundações, para a obtenção de materiais de construção, etc. Além disso, a alteração das rochas contribui para a destruição de testemunhos do património cultural da Humanidade que, com o tempo, sofrem uma evolução que não corresponde à ideia de “duração eterna da pedra” mesmo das mais resistentes à alteração. Esta evolução que exerce tantas influências na vida do Homem, quer positivas quer negativas, processa-se de diversas formas que variam no tipo, nos efeitos, na velocidade, etc.

As rochas utilizadas pelo Homem nas suas diferentes actividades são extraídas de pedreiras onde permaneceram milhões de anos. Por isso, elas encontram-se num estado próximo do equilíbrio ou, pelo menos, elas sofrem uma evolução muito lenta pois, em caso contrário, elas já teriam sido completamente destruídas durante aquele tempo. Em muitos casos tem-se verificado que a mudança das condições de jazida é suficiente para aumentar drasticamente a velocidade de alteração das rochas. São referidos casos frequentes de alteração rápida desenvolvida em anos, meses ou mesmo dias após a modificação das condições de jazida da rocha.

Pode ainda dizer-se que nem mesmo as rochas mais sãs e resistentes podem suportar a acção destruidora dos agentes atmosféricos processada ao longo de séculos, sendo a sua alteração apenas uma questão de tempo.

A avaliação deste tempo, mesmo em termos qualitativos, é um dos principais problemas postos pelo estudo da alteração de rochas, em particular do ponto de vista da Geologia de Engenharia. Tal avaliação, mesmo aproximada, poderia contribuir apreciavelmente para a economia e segurança das obras. A avaliação desta velocidade em rochas com significado artístico ou cultural pode tomar outras nuances uma vez que, para além de eventual função estrutural, a rocha terá um valor intrínseco como objecto artístico ou testemunho cultural. A destruição de tal rocha origina o desaparecimento desse objecto ou testemunho.

Este não será necessariamente o caso com as obras de engenharia que, em geral, admitem a substituição de parte ou do todo da estrutura, sem perda de funcionalidade, uma vez que tal substituição apenas terá efeitos na sua economia e segurança.

A determinação quantitativa da alterabilidade envolve grandes dificuldades uma vez que é necessário considerar parâmetros intrínsecos à própria rocha, bem como parâmetros dependentes do ambiente, razão pela qual este tipo de determinação não é frequentemente efectuado. Se é praticável, tal determinação permitirá obter o conhecimento imediato do tempo de ruína da rocha e/ou da obra. Daí o seu interesse prático.

De acordo com a definição aceite por alguns autores, chama-se alterabilidade à taxa de evolução do estado de alteração da rocha.

Tomando o parâmetro  $i$  para caracterizar o estado de alteração, chamar-se-á alterabilidade,  $j$  a

$$j = \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

sendo  $\Delta i$  a variação sofrida pelo parâmetro  $i$  no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

A alterabilidade terá um valor numérico se o parâmetro  $i$  puder ser quantificado e se a variação do seu valor no intervalo de tempo  $\Delta t$  atingir um valor mensurável. Aquele valor numérico será portanto o quociente da diferença entre dois valores de um dado parâmetro ( $P_1 - P_0$ ) pelo intervalo de tempo decorrido entre os instantes de obtenção desses valores ( $t_1 - t_0$ ).

A determinação da alterabilidade pode ser efectuada no local onde a rocha está utilizada e portanto sem modificação nas características intrínsecas e nas condições do ambiente, ou em laboratório através de ensaios de alteração (envelhecimento acelerado\* ou outros).

Compreende-se que para a determinação quantitativa da alterabilidade somente a experimentação *in situ* dará resultados correctos para uso em Geologia de Engenharia. O grande número de parâmetros envolvidos, alguns dos quais de difícil avaliação, tornam a determinação em laboratório em geral incerta ou mesmo completamente sem significado.

Isto acontece quando se procura reproduzir todos os parâmetros do ambiente (composição química, pH, Eh, temperatura, solicitações, etc.) que determinam o mecanismo de alteração. Quando se acelera tal mecanismo, tais dificuldades aumentam uma vez que pequenas variações nas condições de ensaio podem por vezes ser suficientes para modificar completamente o curso da alteração, tornando a interpretação difícil ou mesmo sem sentido.

A aceleração destes mecanismos em laboratório pode recorrer aos seguintes artificios:

- aumento da agressividade das soluções;
- aumento dos fluídos disponíveis para os processos de alteração;
- mudanças de temperatura;

---

\* Tais ensaios dizem-se acelerados porque se procura acelerar certas reacções modificando um ou mais dos parâmetros do ensaio (granulometria, temperatura, pH, etc.)

- mudanças de pH;
- aumento das superfícies expostas.

Quando um mecanismo é acelerado parece lógico considerar que esta aceleração apenas será justificável se conduzir às mesmas situações embora mais rapidamente. Se, por exemplo, certo processo natural conduzir à formação de caulinite como produto final e o processo artificial, devido à modificação dos parâmetros envolvidos, conduzir à formação de gibsite, o processo artificial não poderá ser considerado como ensaio de envelhecimento representativo. Na Fig. 1 mostra-se que, quando se modifica a acidez da solução de pH = 7 para pH < 4, a solubilidade do  $\text{CaCO}_3$  aumenta enormemente e a alumina, que era praticamente insolúvel, se torna facilmente removível. Os mecanismos de alteração, bem como os seus produtos finais, são fortemente modificados por esta alteração. As dificuldades de ensaio e o pequeno número de situações que possam facilmente ser quantificadas justificam o reduzido número de referências sobre determinação quantitativa da alterabilidade. Os casos de aplicação a obras de engenharia são ainda menos frequentes.

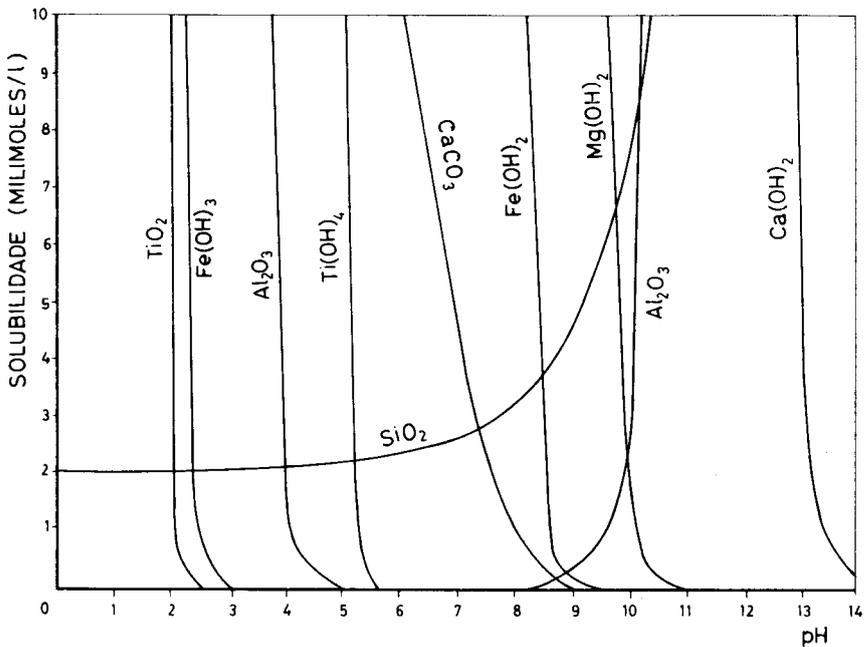


Fig. 1 – Solubilidade de alguns componentes em função do pH, segundo Loughnan, F. 1969

Em resumo, podem apontar-se as seguintes limitações importantes:

- grande duração dos ensaios, em geral;
- modificação ou substituição do mecanismo de alteração;
- dificuldade de comparação de rocha para rocha.

## 2 – ALGUNS VALORES DA BIBLIOGRAFIA

Existem algumas referências a valores de alterabilidade determinados em edifícios datados ou cemitérios e a outros calculados para aplicação à Geomorfologia ou à Pedologia. Não se conhecem referências a valores determinados para situações correntes de Engenharia Civil.

Ollier, C. (1969), cita alguns exemplos numéricos para taxas de alteração. As rochas calcárias, em virtude da sua solubilidade importante, são das rochas mais facilmente tratáveis e, por isso, muitos dos valores quantitativos se referem a este tipo de rochas. Eis alguns dos exemplos citados:

Tipo de calcário	Número de anos para produzir uma polegada de alteração
Kirkby Stephen	500
Tailbrig	300
Penrith	250
Askrigg	240

Outras citações referem-se a valores obtidos para grandes áreas e, portanto, mais do domínio da Geomorfologia. Refere este autor que as águas de escorrência provocam a remoção de  $16 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{ano}$  de carbonato de cálcio, o que equivale a um abaixamento da superfície de  $16 \text{ mm}/1000 \text{ anos}$ . Estes valores são extremamente imprecisos, como facilmente se compreende, chegando alguns autores a valores muito diferentes que dependem das respectivas bases de cálculo.

Ainda Ollier, C. (1969) refere os valores obtidos por Leneuf and Aubert, (1960) como exemplo do cálculo da taxa de ferralitização do granito numa zona de floresta da Costa do Marfim. Dizem estes autores que, sob as condições prevalentes, são necessários entre 22000 e 77000 anos para a completa ferralitização da espessura de 1 m de granito.

Além de toda a imprecisão com que estes valores são calculados (a simples observação destes números bem revela) surge ainda outra limitação muito impor

tante, que consiste no facto de estas taxas não serem constantes ao longo de todo o processo de alteração. Esta constatação, cuja relevância se salienta, justifica que sejam adiantadas algumas considerações.

A remoção de iões da estrutura de um mineral deverá ser mais importante numa fase inicial o que, sendo compreensível por existir maior concentração de iões na estrutura, é muito simplista porque apenas toma em linha de conta uma das variáveis do sistema. Efectivamente, esta remoção dependerá do acesso dos fluidos de ataque e da facilidade de escoamento desses produtos, pelo que a sua maior importância pode não ser na fase mais jovem da alteração da rocha, mas, antes, numa fase intermédia em que a fissuração tem já desenvolvimento considerável.

As taxas de alteração são, dum modo geral, não lineares. Algumas referências sugerem andamento exponencial, não sendo, contudo, unânimes quanto ao seu sentido.

Assim Černohouz, J. and Šolc, I. (1966), apresentam a seguinte fórmula para relacionar a espessura de alteração - d (mm) - em basalto, com o tempo - t (milénios)

$$d = A \log (1 + B t)$$

em que

$$A = 4,64 \pm 0,05$$

$$B = 0,010 \pm 0,001$$

para o caso dos basaltos da Bohemia por eles estudados. A Fig. 2 representa graficamente esta função.

O mesmo andamento se pode verificar na Fig. 3 segundo dados de Schaller, W. and Vlisidis, A. (1959), obtidos de análises da percentagem de  $Fe^{++}$  oxidado espontaneamente em amostras de siderite pulverizada.

A apreciação visual e petrográfica de uma estátua executada em arenito conduziu Winkler, E. (1973), a admitir um andamento também exponencial mas de sentido oposto, isto é, aumento da taxa de alteração com a progressão dessa alteração. A Fig. 4 mostra o gráfico correspondente à evolução observada.

Embora de forma simplificada pode atribuir-se esta diferença a dois tipos diferentes de mecanismos de alteração: um de natureza essencialmente química com taxas de evolução que diminuem com o tempo e outro de natureza essencialmente física cujas taxas aumentam com o tempo.

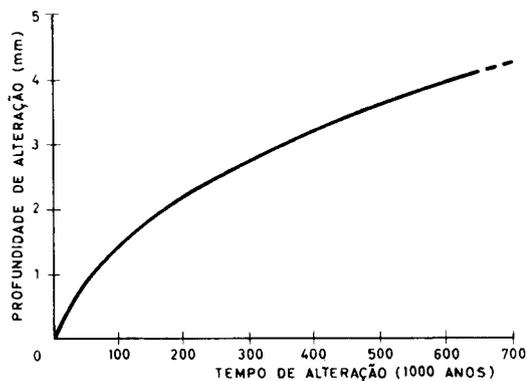


Fig. 2 – Taxa de alteração em basalto da Bohemia. Dados de Černohouz, J. and Šolc, I. 1966

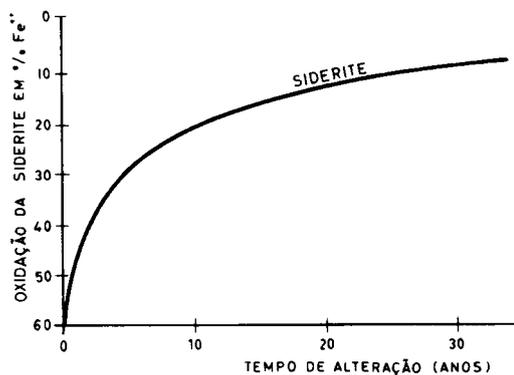


Fig. 3 – Taxa de oxidação do Fe<sup>++</sup> em amostra de siderite pulverizada. Dados de Schaller, W. and Vlisidis, A. 1959

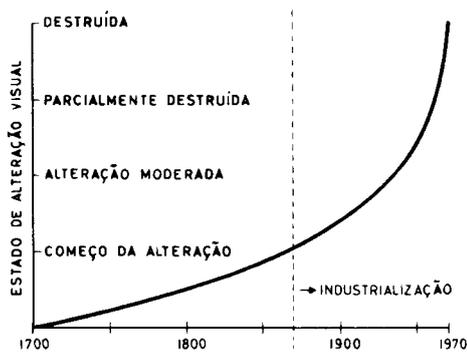
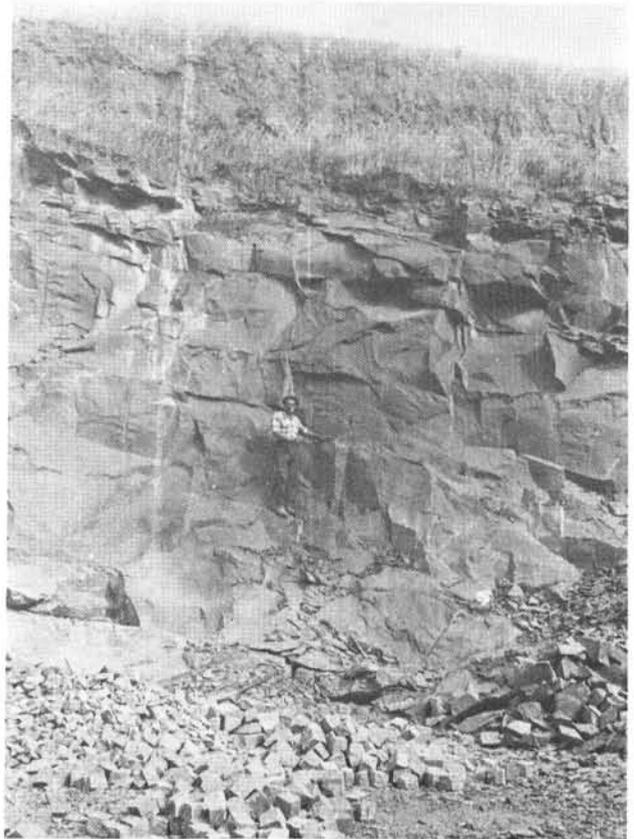


Fig. 4 – Taxa de evolução do estado de alteração de uma estátua de arenito. Segundo Winkler, E. 1973

Considera-se que a exploração destes conceitos não pode ser levada muito longe. Retém-se, no essencial, que a evolução de fenómenos deste tipo só pode ser considerada linear em intervalos de tempo muito curtos. A grande duração que é requerida para se obterem estes valores torna esta via sem interesse para a resolução dos problemas correntes de Engenharia Civil.

### 3 – CASO DE APLICAÇÃO. O DOLERITO USADO NA PAVIMENTAÇÃO DAS RUAS DE LISBOA

Alguns arruamentos da cidade de Lisboa foram pavimentados há alguns anos com cubos de dolerito extraídos das pedreiras de Ribamar na região da Ericeira (Fig. 5).



*Fig. 5 – Ribamar. Ericeira. Vista de uma frente da pedreira.*

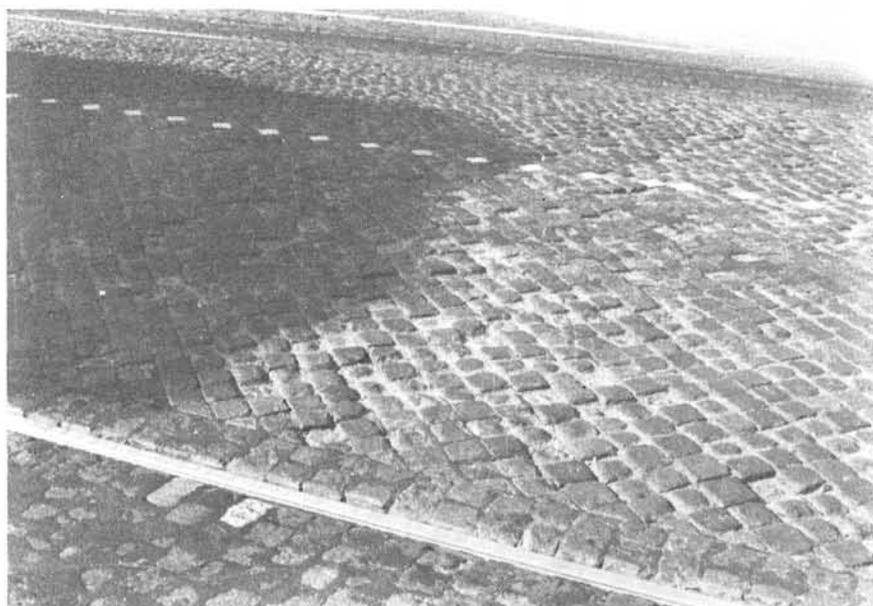
Esta rocha, designada por granito pelos construtores, foi aplicada sem qualquer estudo especial que procurasse avaliar a sua durabilidade.

Pouco tempo depois da aplicação (cerca de um ano para alguns cubos) alguns cubos apresentavam desgaste anormal enquanto outros se arruinavam completamente (Fig. 6).

Num estudo conduzido pelo LNEC em 1962 foi chamada a atenção para a necessidade de se tomar em consideração a alterabilidade dos materiais empregados, pois que parecia ser essa a causa de tão rápida ruína.

Aproveitando a circunstância de se dispor de um material muito alterável cuja idade de aplicação em obra se conhece com razoável aproximação, procura-se, com o presente trabalho, contribuir para o esclarecimento do mecanismo de alteração e obter dados quantitativos sobre a alterabilidade dessa rocha.

Para este estudo dispôs-se de uma amostragem dos citados pavimentos, de alguns cubos idênticos aos empregados nos pavimentos e que tinham ficado armazenados desde a data de execução da obra, bem como de cubos extraídos recentemente de pedreiras localizadas na mesma região que fornecera os outros.



*Fig. 6 – Lisboa. Rua Morais Soares. Aspecto da pavimentação*

As amostras foram assim referenciadas:

- DMS1 a DMS79 – amostras extraídas do pavimento da rua Morais Soares (amostras DMS);
- DA1 a DA36 – amostras armazenadas desde a construção do pavimento (amostras DA);
- D1-1 a D167-8 – amostras colhidas recentemente nas pedreiras em exploração (amostras D)

### 3.1 – Descrição da rocha e caracterização do estado de alteração

A rocha em questão é um dolerito de grão fino e aspecto compacto. Mineralogicamente é constituído por plagioclase do domínio do andesina-labrador, augite pigeonítica, biotite e mineral opaco de óxido de ferro. Ocorrem, como minerais secundários, calcite e produtos de alteração dos minerais ferromagnesianos.

Os feldspatos – os minerais mais abundantes – estão em geral pouco alterados embora bastante microfissurados. Os estudos com Raios X revelaram a presença de montmorilonite dispersa no interior da rocha bem como no solo residual que se encontra na pedreira de onde foram extraídos os materiais.

Pela análise micropetrográfica executada sobre amostras dos três tipos estudados, verificou-se que não existem amostras sãs, antes, pelo contrário, todas as amostras apresentam os seus minerais ferromagnesianos profundamente alterados.

## QUADRO I

CARACTERÍSTICAS DE RESISTÊNCIA DE AMOSTRAS DE DOLERITO

AMOSTRA N.º	E 10 <sup>3</sup> MPa	$\sigma_c$ MPa	V <sub>L</sub> m/s	LOS ANGELES %	FRAGMENTAÇÃO DINÂMICA %
D1	43,0	136	4290		11,0
D2	42,9	137	4079		12,0
D3	46,4	149	4040		11,8
D5	47,1	160	4390		11,3
D6	36,4	135	4210	16	11,9
D8	33,3	120	4020		18,4

Contudo, mesmo apresentando-se assim alterada e microfissurada, a rocha exibe razoáveis características de resistência logo após a sua extração, como se verifica no Quadro I.

Para a determinação da alterabilidade, tal como se propõe, é necessário escolher um parâmetro para a caracterização do estado de alteração.

A velocidade de propagação de ondas longitudinais foi o parâmetro escolhido por ser influenciado pelo estado de alteração além de ser um ensaio não destrutivo.

As determinações das velocidades de propagação foram feitas em laboratório em amostras secas em estufa a 100°C durante 3 dias. Ensaíram-se 76 cubos DMS, 36 DA e cerca de 30 das amostras D.

Enquanto as amostras D e DA pela sua homogeneidade não oferecem problemas de interpretação, as amostras DMS, que se encontram por vezes desgastadas e alteradas numa zona superficial mais ou menos espessa, de velocidade mais baixa, já põem problemas.

Por este motivo escolheu-se para esta interpretação a velocidade mais baixa de uma série de 3 medições por cada cubo. Uma vez que os cubos não se alteram de forma homogênea em todo o seu volume é a velocidade mais baixa que, caracterizando determinada zona do cubo, traduz a máxima alterabilidade do material em estudo, mormente da zona que está mais próxima da desagregação e da ruína.

### *3.2 – Resultados obtidos – Cálculo da alterabilidade*

Na Fig. 7 apresentam-se as percentagens de ocorrência das velocidades nas amostras D, DA e DMS.

É bem visível nas amostras DMS, um deslocamento geral no sentido das velocidades mais baixas. Este deslocamento traduz uma diminuição das suas características mecânicas avaliadas por intermédio da velocidade de propagação de ultrassons, que parece lógico atribuir à alteração do material. Efectivamente, para a pavimentação só se aceitam os blocos de boa qualidade aparente, pelo que, inicialmente, estes blocos deveriam ter velocidades semelhantes às amostras D e DA. As amostras DA que, segundo o empreiteiro ficaram armazenadas desde a construção do pavimento serão, assim, a confirmação do seu estado inicial.

O valor médio das amostras DA é 4340 m/s enquanto o das amostras D é de 4180 m/s. Esta diferença nos valores médios pode ser mais que a dispersão dos

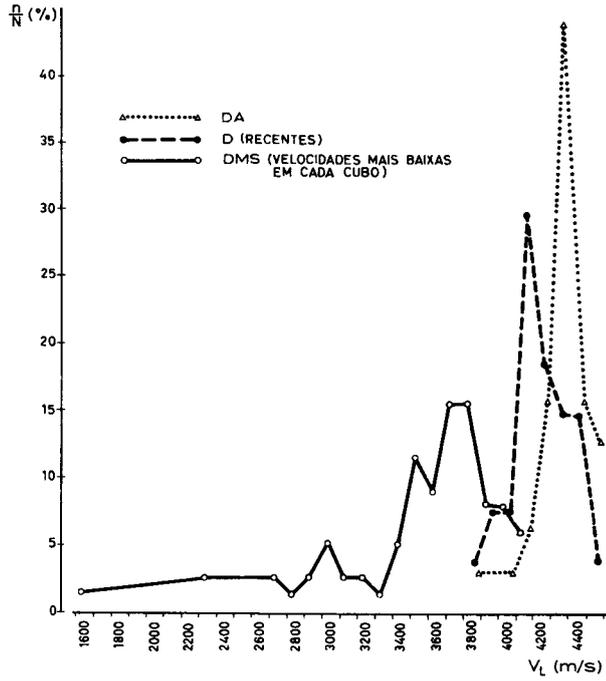


Fig. 7 – Amostras D, DA e DMS. Distribuição de velocidades. Frequências

valores e corresponder a materiais extraídos de zonas diferentes do maciço e ser, portanto, reflexo das suas heterogeneidades. Esta diferença não é, contudo, excessivamente grande e qualquer dos valores fica bem distante de muitos dos valores obtidos para as amostras DMS.

A observação da rocha que se extrai das pedreiras desta zona e a apreciação dos resultados obtidos neste estudo mostram que não é lógico admitir para esta rocha um único valor da alterabilidade. A admitir-se esta óptica, o valor teria que ser calculado a partir do valor médio dos cubos DMS, o que parece carecer de significado. Efectivamente este valor médio seria a média de valores correspondentes a cubos com alterabilidades muito diferentes e não o valor mais provável de um conjunto de valores com uma dispersão natural.

Deste modo, parece mais lógico considerar alguns valores mais comuns e calcular para esses valores as alterabilidades respectivas.

Mesmo assim subsiste a interrogação: que valor tomar para o estado inicial das amostras? A média das amostras DA ou dos cubos recentemente obtidos?

A observação das amostras DMS mostra que os blocos mais alterados (e portanto mais alteráveis) pertencem a uma variedade mais escura do dolerito, semelhante às amostras D6 recentemente colhidas. Também nas amostras DA existem cubos desta variedade que apresentam, no entanto, velocidades ligeiramente superiores às amostras D6 e que não diferem das restantes amostras DA.

Estes factos aconselham que, para cada situação, se considere uma gama de alterabilidades enquadrada por um valor máximo (calculado a partir das amostras DA) e um valor mínimo (calculado a partir dos cubos recentes).

Tendo em conta que os cubos DMS estiveram cerca de 18 anos empregados nas ruas de Lisboa antes de serem removidos para este estudo, calcularam-se as alterabilidades respectivas para alguns dos cubos DMS que apresentavam velocidades mais baixas (cubos DMS 42, DMS 3 e DMS 57 com velocidades de 1610, 2340 e 2380 m/s respectivamente) e ainda as alterabilidades correspondentes ao valor de 3000 m/s que, como se verifica na Fig. 7, pode ser tomado como representando um número razoável de amostras (14 entre 2700 e 3300 m/s).

No Quadro 2 apresentam-se os valores assim calculados.

QUADRO II  
VALORES DE ALTERABILIDADE DE AMOSTRAS DMS

AMOSTRAS DA $V_L$ m/s	AMOSTRAS D $V_L$ m/s	AMOSTRAS DMS		
		$V_L$ m/s	ALTERABILIDADE m/s/ano	
			MÁXIMA	MÍNIMA
4340	4180	1610	150	140
		2345	110	100
		2380	110	100
		3000	75	65

Este Quadro mostra que são relativamente frequentes valores de alterabilidades de 65 m/s/ano\* em cubos que mantém ainda a sua integridade. Em certos casos esses valores atingem 150 m/s/ano. Considerando, como parece razoável, que os cubos já arruinados (e que a observação dos pavimentos mostra que foram bastantes) apresentaram uma alterabilidade pelo menos da mesma ordem de grandeza dos mais alterados que se colheram, chega-se à conclusão que o valor de 150 m/s/ano será mais frequente de que um único valor pode sugerir.

### 3.3 – *Conclusões*

A análise dos resultados obtidos com as amostras de dolerito mostra que o procedimento adoptado é viável para determinação da alterabilidade de materiais rochosos. Este procedimento, ao fornecer valores quantitativos para a alterabilidade, impõe-se sobre qualquer outro. No entanto, a dificuldade de encontrar situações como a presente, sempre que se pretenda determinar uma alterabilidade, mostra que esta via, embora aliciante, é, na maioria dos casos, impraticável. Os dados concretos obtidos para o dolerito mostram, pela primeira vez, numa forma quantitativa e clara, a grande alterabilidade destes materiais, em particular da sua variedade mais escura.

NOTA: A presente comunicação é um extracto do trabalho “Alterabilidade de rochas em problemas de Geologia de Engenharia. Aplicação a casos portugueses” que constituiu a dissertação apresentada a concurso para obtenção do grau de Especialista do LNEC.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ČERNOHOUZ, J. and ŠOLC, I. – “Use of sandstone wanes and weathered basaltic crust in absolute chronology”. *Nature*, vol. 212. Nov. 19, 1966.
- LENEUF, N. and AUBERT, G. – “Attempt to measure the rate of ferrallitisation”. *Trans. 7th Cong. Soil. Sci.*, vol. 4 In OLLIER, C. 1969 – 1960.
- LOUGHNAN, F. – “Chemical weathering of the silicate minerals”. Elsevier. New York, 1969.
- OLLIER, C. – “Weathering”. Oliver & Boyd. Edinburgh, 1969.
- SCHALLER, W. and VLISIDIS, A. – “Spontaneous oxidation of powdered siderite”. *The Am. Mineralogist*, vol. 44. No. 3, 4, March-April, 1959.
- WINKLER, H. – “Stone. Properties, durability in man’s environment”. Springer-Verlag. Wien, 1973.

---

\* Metros por segundo por ano. Diminuição do valor da velocidade de propagação (m/s) por cada ano de aplicação em obra.