

A QUANTIFICAÇÃO DA ALTERAÇÃO E DA ALTERABILIDADE DAS ROCHAS*

The Weathering and the Weatherability Quantification of the Rocks

FERNANDO L. LADEIRA**

ENIVALDO MINETTE***

RESUMO – A quantificação da alteração tem sido apresentada por muitos investigadores, mas a quantificação da alterabilidade parece, tanto quanto os autores estão cômnicos, não ter sido ainda realizada.

Propõem-se novos índices quantificadores da alteração e apresenta-se a metodologia que permite quantificar a alterabilidade de uma rocha; um exemplo de aplicação, é apresentado com dados obtidos em pesquisa realizada.

SYNOPSIS – The quantitative weathering has been pointed out by several investigators. The quantitative weatherability does not seem to have been done, as far as the writers are aware.

New quantitative indexes of weathering are proposed as well as the method which permit the weatherability quantification of a rock; an example of application is given based on data from a research.

1 – INTRODUÇÃO

A alteração de rochas tem sido assunto muito pesquisado e o progresso alcançado tem sido muito grande, especialmente na parte de índices geoquímicos de alteração.

Muitos índices quantificadores da alteração foram propostos dentre os quais salientam-se, o índice micropetrográfico (Mendes et alii, 1966), o índice ultrassônico (Iliev, 1966) e índices geoquímicos (Aires de Barros, 1977, 1978; Onodera et alii, 1974; Parker, 1970; Reiche, 1950, dentre outros).

A quantificação da alterabilidade parece não ter sido ainda realizada, embora autores como Aires Barros (1978), Farran e Thénoz (1965), Delgado Rodrigues (1978), Farjallat (1971) e Farjallat et alii (1979) tenham apresentado alguns casos de rochas que se alteraram em alguns anos ou casos em que essa alterabilidade foi quantificada em anos de laboratório. Em qualquer dos casos, é interessante registrar, contudo, não servem como aplicação para qualquer outro tipo de rocha. Com esta publicação, os autores pretendem apresentar alguns índices geomecânicos quantificadores da alteração e a metodologia para a quantificação da alteração no tempo

* Manuscrito recebido em Março de 1984. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Universidade Federal de Ouro Preto — MG — Brasil

*** Universidade Federal de Viçosa — MG — Brasil

(alterabilidade) de qualquer tipo de rocha. Um exemplo ilustrativo é apresentado com dados obtidos em pesquisa recente.

Uma vez conhecida a alterabilidade de determinada rocha usada como material de construção, ou constitua «in situ» a fundação de uma obra ou ainda forme um talude, fica-se conhecendo a variação experimentada pelo factor de segurança dessa obra, no tempo de vida útil da mesma.

Conhecido o factor de segurança, será possível implantar a obra, na maior parte dos casos, com grande economia.

2 – ALTERABILIDADE DAS ROCHAS

A alterabilidade de uma rocha é a alteração dos seus minerais constituintes, no tempo. A alteração de uma rocha é a modificação das suas propriedades físicas, químicas, geomecânicas ou dinâmicas, causada por agentes externos. Esses agentes podem ser atmosféricos, forças tectónicas, forças dinâmicas (explosões) ou quaisquer outras forças que atenuem ou destruam as forças intermoleculares dos constituintes mineralógicos.

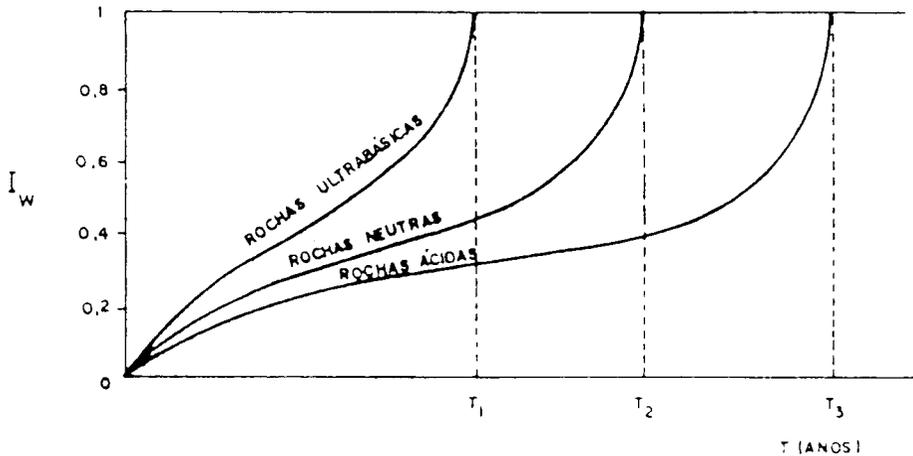


Figura 1 – *Curvas de alterabilidade de rochas ácidas, neutras e ultrabásicas.*

Admitindo que as rochas foram submetidas aos mesmos agentes, cada tipo de rocha tem sua curva característica de alteração no tempo (para uma determinada propriedade física, química, geomecânica ou dinâmica), como mostra a fig. 1. Nesta figura estão representadas três curvas ideais de alterabilidade para três tipos bem distintos de rochas (Ladeira, 1983). Estas curvas mostram que o tempo total (T_1) de alteração para uma rocha ultrabásica é muito menor que o tempo de alteração (T_3) para uma rocha ácida.

Estas curvas hipotéticas representam a evolução da alteração no tempo, de rochas consideradas geotecnicamente sãs, até se transformarem em saprólitos ou mesmo solos. O tempo neste caso pode ser dezenas, centenas ou milhares de anos, um tempo que nem sempre interessa para qualquer tipo de obra. As rochas aparentemente sãs, podem alterar-se em reduzido espaço de tempo (Ladeira, 1984).

A velocidade de alteração de qualquer rocha (ácida, neutra ou ultrabásica) está intimamente relacionada com as características intrínsecas da própria rocha e com os agentes de intemperismo actuantes. Se uma rocha tiver armazenadas tensões (por ter estado sujeita a forças tectónicas importantes) e as puder libertar, esta rocha é potencialmente mais alterável que outra que não esteja nessas circunstâncias; ou se essa rocha tiver sofrido o efeito de ondas elásticas dinâmicas, como por exemplo, a acção de explosivos, esta rocha poderá alterar-se muito rapidamente. Então a velocidade de alteração de qualquer rocha depende:

- 1 – do estado inicial de alteração da rocha, isto é, do ponto de partida A ou B (fig. 2);
- 2 – do estado de tensão remanescente da rocha e a possibilidade de libertação dessas tensões, quando a rocha ficar exposta a um novo ambiente;
- 3 – da acção dos agentes externos.

A variação da velocidade de alteração com o estado de tensão remanescente foi abordado antes. Será importante discutir a influência que a alteração inicial poderá ter na velocidade de alteração de qualquer tipo de rocha. Tome-se para a nossa discussão a figura 1 e particularize-se para uma rocha ácida, apresentando a curva que representa a variação de um índice de alteração (índice de resistência) em relação ao tempo (figura 2).

Na fig. 2 apresenta-se uma classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração.

Se o estado inicial de alteração natural da rocha for A, B ou C, é evidente que a velocidade máxima de alteração natural será obtida quando a rocha passa do estado C para C' e a velocidade mínima será obtida quando a rocha passa do estado A para A'. A velocidade de alteração natural é como se observa, variável no tempo, mas para pequenos intervalos de tempo, pode ser considerada constante. Define-se velocidade de alteração natural (V_{NM}) como sendo:

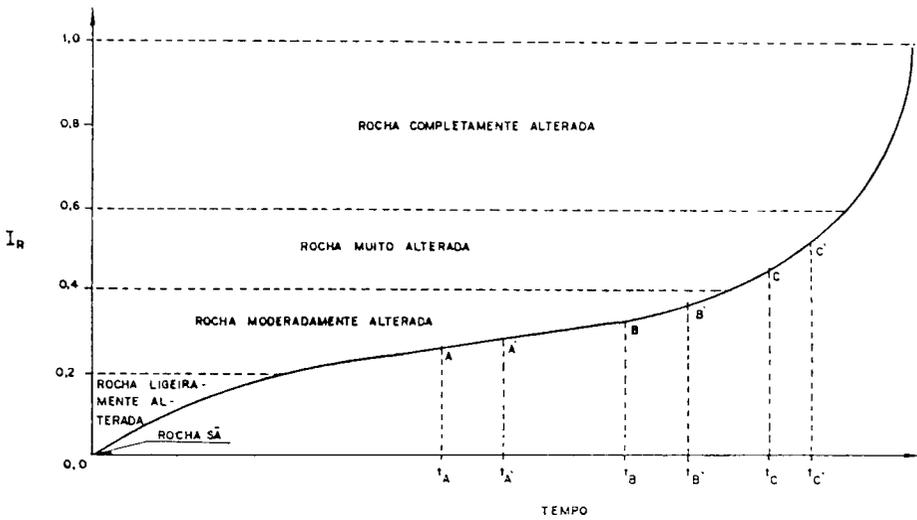


Figura 2 – *Varição da alteração no tempo para o índice de resistência de uma rocha ácida e classificação geotécnica da rocha quanto ao seu estado de alteração.*

$$V_{NW} = \frac{\Delta I_w}{\Delta t}$$

sendo ΔI_w a variação de um índice de alteração e Δt a diferença de tempo. Pode também determinar-se uma velocidade média de alteração natural. O tempo mínimo de exposição da rocha aos agentes naturais de intemperismo em clima tropical é seis meses, devendo colocar-se fragmentos de rochas com diferentes estados de alteração, isto é, rochas com uma alteração ligeira, moderada ou muito alterada. O índice de alteração indicador desses estados pode ser obtido a partir de propriedades físicas, químicas, geomecânicas e dinâmicas. Alguns índices de alteração serão propostos seguidamente.

3 – ÍNDICES DE ALTERAÇÃO DE ROCHAS

A alteração de rochas tem sido caracterizada por alguns índices já anteriormente referidos. Propõem-se e descrevem-se alguns índices de alteração geomecânicos capazes de quantificar a alteração natural e laboratorial de qualquer rocha.

3.1. *Índice de elasticidade* (I_E): o módulo de elasticidade das rochas diminui com o seu grau de alteração. O índice de elasticidade (I_E) que se propõe é dado por:

$$I_E = \frac{E_0 - E_w}{E_0}$$

sendo, E_0 o módulo de elasticidade da rocha sã, e

E_w o módulo de elasticidade da rocha alterada.

Este índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero indica uma rocha sem alteração ($E_w = E_0$) e o valor «um», indica uma rocha completamente alterada ($E_w = 0$).

3.2. *Índice de resistência* (I_R): a resistência de uma rocha diminui com o seu grau de alteração. O índice de resistência (I_R) que se propõe é dado por:

$$I_R = \frac{R_0 - R_w}{R_0}$$

em que R_0 é a resistência à compressão simples da rocha sã, e

R_w é a resistência à compressão simples da rocha alterada.

O valor deste índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero indica uma rocha sem alteração ($R_w = R_0$) e o valor de «um» indica uma rocha completamente alterada ($R_w = 0$).

3.3. *Índice de cisalhamento*: a resistência ao cisalhamento de uma rocha diminui com o seu grau de alteração. O índice de cisalhamento (I_S) que se propõe é dado por:

$$I_S = \frac{S_0 - S_w}{S_0}$$

em que S_0 é a resistência ao cisalhamento da rocha sã, e que S_w é a resistência ao cisalhamento da rocha alterada.

O valor deste índice varia de 0 a 1, sendo que o valor zero corresponde a uma rocha sem alteração ($S_0 = S_w$) e o valor «um», corresponde a uma rocha completamente alterada ($S_w = 0$).

4 – METODOLOGIA PARA A QUANTIFICAÇÃO DA ALTERABILIDADE

Para a quantificação da alterabilidade de qualquer rocha deve proceder-se do seguinte modo:

1. Colectar rocha em diferentes estágios visuais de alteração e determinar o índice de alteração natural para cada estágio, a partir, evidentemente da rocha mais sã, encontrada no local; supondo que a rocha se encontra nos estágios A, B e C de alteração (fig. 2), determina-se por exemplo o índice de resistência (I_R), com base na rocha visualmente mais sã, encontrada no local.

2. Colocar pedaços de rocha (britas ou corpos de prova) com os estados de alteração pré-determinados em:

- a) exposições aos agentes atmosféricos,
- b) ensaios de alteração laboratorial acelerada.

A exposição aos agentes atmosféricos deve ser de pelo menos 6 (seis) meses, em clima tropical húmido, para levar a rocha de A para A', de B para B' e C para C' (fig. 2), no caso de 3 estágios diferentes de alteração; os ensaios de alteração acelerada deverão produzir a curva completa de alteração (a partir de um certo estágio) ou então uma curva que apresente pelo menos uma redução de 60 a 80% do valor inicial, o valor de uma determinada propriedade (resistência à compressão simples, por exemplo); à medida que o ensaio de alteração laboratorial acelerada prossegue devem-se ensaiar a cada número pré-fixado de ciclos, corpos de prova para determinar a propriedade que interesse.

3. Calcular o índice de alteração natural para essa propriedade e calcular a velocidade de alteração natural anual (V_{NW}) ao final de seis ou mais meses, para cada estágio e verificar, se para o maciço rochoso interessa utilizar a velocidade mínima, máxima, intermediária ou a média das velocidades; por vezes interessa utilizar mais que uma velocidade, porque após um mapeamento do maciço, podem existir zonas deste, com diferentes estágios de alteração; esta decisão é extremamente importante para a quantificação da alterabilidade.

4. Determinar o índice de alteração laboratorial para aquela propriedade, em cada número de ciclos pré-estabelecido e plotar num sistema de eixos rectangulares esse

índice em ordenadas e o número de ciclos em abcissas; plotar a curva que melhor se ajuste aos dados obtidos; a precisão do traçado da curva, influencia grandemente o resultado da quantificação da alterabilidade.

5. Marcar na curva experimental a variação anual da velocidade de alteração natural dessa rocha e tomar nota do número de ciclos correspondentes na abcissa; é de extrema importância não esquecer qual a velocidade considerada, para saber qual o trecho da curva que interessa considerar.

6. Calcular para os restantes ciclos realizados, o número de anos que a rocha foi submetida a ensaio laboratorial e plotar abaixo do eixo das abcissas um novo eixo dos tempos, em anos. Ter-se-á assim quantificada a alterabilidade de uma rocha.

5 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para exemplificar a quantificação da alterabilidade apresenta-se um caso de alteração natural e laboratorial de um diorito; a propriedade que se determinou foi o módulo de elasticidade.

Amostras prismáticas de diorito foram colocadas em exposição aos agentes atmosféricos (alteração natural) durante onze meses, tendo sido obtido o módulo de elasticidade estático inicial e final. Ao mesmo tempo outras amostras prismáticas de diorito foram alteradas por lixiviação contínua no extracto Soxhlet (um ensaio que representa muito bem o clima tropical húmido), durante 2100 ciclos.

Os dados experimentais apresentam-se na tabela a seguir.

Ciclos	E_S (50%) – MPa	I_E
0	64.135,5	0,000
200	58.917,5	0,081
250	46.605,5	0,273
300	43.645	0,320
400	40.292	0,372
500	44.120	0,311
600	33.717	0,474
700	39.164,5	0,389
1 600	28.197	0,560
2 100	26.576	0,586

O módulo de elasticidade secante da rocha a 50% da tensão de rotura – E_S (50%) – após 11 meses de alteração natural, foi de 51.206 MPa, o que para o índice de elasticidade I_E dá o valor de 0,2016 e a respectiva velocidade de alteração natural anual foi de 0,22 I_E /ano.

Deve-se lembrar que alguns valores para o módulo de elasticidade secante (E_S) apresentam valores aparentemente anómalos, isto é, sem uma continuidade decrescente. O facto é devido a que as amostras ensaiadas foram diferentes e em certos casos o número de amostras ensaiadas mostrou-se insuficiente para obter uma continuidade. O índice de alteração (I_E) ou índice de elasticidade é reflexo desses valores obtidos.

A curva experimental da variação do índice de elasticidade a 50% de rotura, com a ciclagem no extractor Soxhlet é apresentada na figura 3.

Como a rocha de que se partiu para o ensaio de lixiviação no extractor Soxhelt possuía o mesmo estado de alteração inicial, serão contados os primeiros ciclos, para a quantificação do tempo, referentes à velocidade de alteração natural calculada (0,22 I_E /ano). O valor encontrado foi 170 ciclos. Quer dizer que 170 ciclos de laboratório corresponderão a um ano de alteração natural. Para os 2100 ciclos teremos exactamente 12 anos e 4 meses, o que corresponde a uma redução de 58,6% na propriedade em causa.

Ciclos	E_S (50%) - MPa	I_E
0	64.135,5	0,000
200	58.917,5	0,081
250	46.605,5	0,273
300	43.845	0,320
400	40.292	0,372
500	44.210	0,311
600	33.717	0,474
700	39.164,5	0,389
1600	28.197	0,560
2100	26.576	0,586

Quando houver mais que uma velocidade, convém analisar convenientemente a questão, para se saber de onde se partiu, para que a quantificação seja a mais real possível. O índice de alteração ajuda a resolver os pontos de partida, que são a chave da quantificação.

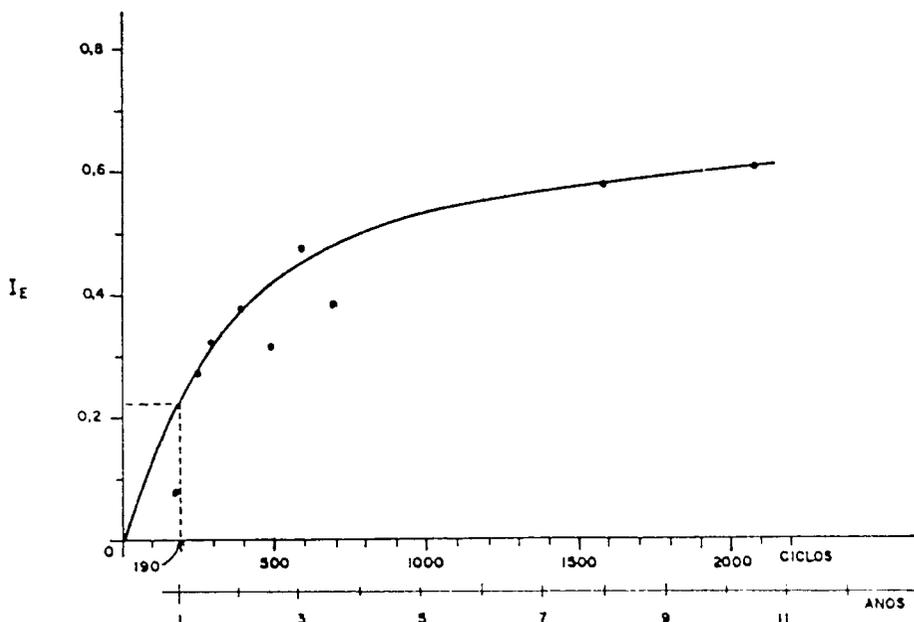


Figura 3 — *Varição do Índice de Elasticidade (I_E) com a ciclagem no extractor Soxhelt, para um diorito; a escala dos tempos foi acoplada à dos ciclos, após a quantificação da alterabilidade.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS, L. 1977. Experimental laboratory weathering of rocks. Rates of experimental natural weathering of rocks, an attempt of comparison. *Comunic. Serv. Geol. Portugal, Lisboa*. Tomo LXII pp. 59-67.
- AIRES-BARROS, L. 1978. Comparative study between rates of experimental laboratory decay. *Bull. Intl. Ass. Engng Geology* n.º 18 pp. 169-174.
- DELGADO RODRIGUES, J. 1978. About the quantitative determination of rock weatherability. A case history. *Memória n.º 499 — LNEC — Lisboa e 3rd Intl. Congress of Engng — Madrid*.
- FARIALLAT, J.E.S. 1971. Critério de avaliação da alterabilidade de rochas — 7.º Simp. *Pesq. Tecnol.* 925 — São Paulo.
- FAR, J. E. S. TATAMIYA, C. T. & YOSHIDA, R. 1974. An experimental evaluation of rock weatherability. *2nd Intl. Conf. Intl. Ass. of Engng. Geology, IV — 30.1 — 30.9*.

- FARRAN, J. et THENOZ, B. 1965. L'altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision. Annales de l'Inst. Batim. Travaux Publics, 215, Paris.
- ILIEV, I.G. 1966. An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties.
- LADEIRA, F.L. 1983. Ensaio em Mecânica das Rochas. Parte I. Ensaio de Laboratório. Univ. Federal de Ouro Preto, Publ. n.º 118, 150p.
- LADEIRA, F.L. 1984. Instabilidade em taludes rochosos provocada por rápido intemperismo. 4.º CBGE. Belo Horizonte.
- MENDES, F. de M., AIRES-BARROS, L. e RODRIGUES, F.P. 1966. The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. Proc. 1st Conf. Intl. Soc. Rock Mechanics, I, pp. 217-223, Lisboa.
- ONODERA et alii, 1974. Weathering and its relation to mechanical properties of granite. Proc. 3rd Conf. Intl. Ass. Rock Mech, vol. II, pp. 71-78.
- PARKER, A. 1970. An index of weathering for silicate rocks. Geol. Magazine, vol 107, n.º 6. pp. 501-504.
- REICHE, P. 1950. A survey of weathering process and products. New Mex. Univ. Pub. in Geology, n.º 3, 95 pp. Albuquerque.
- SHORT, N.M. 1961. Geochemical variations in four residual soils. J. Geol. vol. 69, n.º 55, pp. 534-571.