

# PREVISÃO DA ALTERABILIDADE DE MATERIAIS ROCHOSOS NATURAIS\*

## Weatherability forecast for natural rock materials

por  
J. DELGADO RODRIGUES\*\*

RESUMO – Fazem-se algumas considerações sobre a previsão da alterabilidade de materiais rochosos naturais perante os agentes de alteração, focando, em particular, as características intrínsecas do material que mais influem no seu comportamento. Enumeram-se e criticam-se algumas técnicas utilizadas na previsão dessa alterabilidade.

SYNOPSIS – Weatherability forecast for natural rock materials under weathering agents is made, emphasis being laid particularly on the intrinsic characteristics of the material that most influence its behaviour. Some techniques used for such a type of forecasts are mentioned and appraised.

### 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O que torna específicos os estudos sobre alteração de rochas na sua aplicação a problemas de Geologia de Engenharia e que os separa, portanto, dos estudos ligados às ciências de base, é a existência, ou a necessidade, de uma óptica própria.

Por um lado deve ter-se em conta que de todos os mecanismos presentes ou possíveis só são importantes aqueles susceptíveis de introduzir modificações nas características do material à escala de vida de uma obra; esta importância pode nada ter a ver com a importância que, do ponto de vista teórico, se atribui a determinado mecanismo. Por outro lado os métodos e ensaios exigem características específicas. Devem ser simples, rápidos e sem ambiguidades, isto é, devem traduzir claramente os efeitos dos mecanismos reais e apenas desses.

---

\* Manuscrito recebido em Janeiro 1977. A discussão do trabalho está aberta durante um período de três meses.

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

No trabalho de Struillou, R., 1969, está explicitada esta óptica de tratamento dos problemas:

– “Devido às condições particulares nas quais são colocados por vezes os materiais nas obras, podem aí aparecer fenómenos muito variados, que têm poucos pontos comuns com aqueles que se encontram nos ambientes naturais normais. O técnico de Engenharia Civil deve, pois, considerar a alterabilidade dos materiais com uma óptica muito diferente da dos geólogos de Geologia Pura, dos pedólogos ou dos geomorfólogos. Isto não quer dizer, aliás, antes pelo contrário, que ele não deve ter sempre em mente os resultados obtidos por centenas de investigadores destas disciplinas, que têm estudado estes problemas da evolução das rochas desde há uma centena de anos. Mas deve preocupar-se constantemente com a escala de tempo e com as condições particulares que está tratando (...).

A previsão dos diversos tipos de fenómenos faz-se, sempre que possível, em quatro fases sucessivas:

– estudo do local, da obra e dos materiais utilizados ou encontrados, tendo em vista determinar quais os tipos de fenómenos susceptíveis de se produzirem;

– investigação de bases de referência em obras análogas já construídas com materiais semelhantes;

– ensaios de laboratório sobre os materiais correspondentes à obra, e sobre os materiais de referência;

– interpretação à luz dos resultados dos ensaios e de tudo o que se sabe sobre as condições particulares da obra (...).

Na prática, face aos problemas diversos postos pela alterabilidade dos materiais o geólogo deve comportar-se um pouco à maneira dum médico, considerando que as rochas podem ter doenças latentes susceptíveis de se tornarem agudas, assim como características próprias que as tornam particularmente sensíveis a certas condições do meio encontradas nas obras e a certas modificações dos estados de equilíbrio milenários naturais”.

Quando se procura fazer a previsão do comportamento de uma rocha perante os agentes de alteração, podem encarar-se vários caminhos. Assim, a determinação de certos parâmetros e a sua comparação com situações conhecidas, beneficiando da acumulação de resultados obtidos ao longo de uma prática mais ou menos longa, define a via a que se chamará da previsão de comportamento ou da previsão da alterabilidade, entendida no sentido lato (susceptibilidade à alteração); a determinação de uma taxa de evolução no tempo do estado de alteração da

rocha (alterabilidade no sentido restrito) quer em condições de alteração naturais, quer em condições de envelhecimento acelerado, são outros tantos caminhos para essa previsão.

Os ensaios de envelhecimento, de entre os quais o ensaio de Soxhlet é um exemplo, englobam muitas variáveis e introduzem muitas modificações mas, dum modo geral, todos eles procuram conservar o mecanismo que se verifica *in situ*. A complexidade dos fenómenos naturais, contudo, compromete-lhes seriamente a validade.

Tal como refere Struillou, R. 1969 – “a alteração rápida das rochas silicatadas, em clima temperado, põe em jogo fenómenos muito complexos e variados, mesmo limitando-se aos aspectos essenciais. Seria, pois, provavelmente um grande erro querer restringir a um esquema ou a um único ensaio o problema da sua previsão. Esta deve, ao contrário, ser baseada numa interpretação sintética e prudente das principais características dos materiais estudados e dos seus ambientes de utilização”.

A via da previsão de comportamento exige acumulação de experiência que fundamente os critérios adoptados. Nas fases iniciais de estudo dos métodos e de aferição dos critérios pode ser necessário recorrer a ensaios de envelhecimento, sobretudo com intenções comparativas.

As grandes limitações dos ensaios que permitiriam determinar valores numéricos para a alterabilidade de uma rocha, impõem que se utilize uma outra via mais simples e que substitua eficazmente estas determinações. A essa outra via chamar-se-á previsão de comportamento.

Tendo em conta que o principal objectivo é a resolução de problemas concretos, mormente de aplicação à Engenharia Civil, exigem-se, para os ensaios de previsão de comportamento, certos requisitos que os imponham como alternativa válida dos ensaios de determinação da taxa de alteração.

Deste modo, as exigências práticas requerem rapidez e simplicidade para os ensaios, enquanto a necessidade de acumulação de experiência exige reprodutibilidade dos resultados.

A comparação das 3 vias principais de ensaios, a saber:

- determinação de alterabilidade *in loco*,
- determinação de alterabilidade em laboratório, por ensaios de envelhecimento acelerado,
- ensaios de previsão de comportamento,

é favorável à primeira via pela sua aproximação da realidade mas, do ponto de vista prático, leva a optar nitidamente pela terceira via. Em qualquer dos casos

deve notar-se que a aceleração do envelhecimento em laboratório para determinação de um valor para a alterabilidade é muitas vezes duvidosa.

A previsão do comportamento de uma rocha deve basear-se no conhecimento de um certo número de parâmetros: uns intrínsecos à própria rocha – composição mineralógica, estado de fissuração, etc. – e outros extrínsecos, próprios do meio em que a rocha se encontra – temperatura, quantidade de água disponível, etc.

Os factores intrínsecos apontados são parâmetros daquilo que habitualmente caracteriza o estado de alteração da rocha.

Observações de natureza petrográfica e petrológica sobre a alteração de minerais das rochas indicam que o comportamento futuro desses materiais dependerá do estado actual de alteração dos minerais que os constituem. Este conhecimento tem sido muitas vezes, aliás, o único critério utilizado para a previsão, sobretudo quando não se dispunha, até recentemente, de métodos de natureza quantitativa directamente ligados a essa previsão.

O estado de fissuração – outro dos parâmetros do estado de alteração – influencia em larga medida a resistência da matriz rochosa e, conseqüentemente, a sua capacidade de resistir aos esforços desagregadores originados pela alteração. O caso mais flagrante de comportamento dos materiais pouco dependente do estado de alteração será dado, porventura, pelas rochas xistosas. Efectivamente, e dentro duma certa gama de estados de alteração, o que comanda o comportamento destas rochas é a sua forte anisotropia e a existência de leitos elementares que, tornando-se muito sensíveis às variações termo-higrométricas, lhes provocam esfoliação característica, mesmo quando perfeitamente sãs.

A maior parte das rochas sedimentares exhibe um comportamento perante a alteração que é também independente do estado actual de alteração, isto é, mesmo em rochas perfeitamente sãs se podem verificar alterabilidades grandes, o que não acontece nas rochas ígneas e metamórficas.

As rochas calcárias, devido à grande solubilidade do carbonato de cálcio e frequentemente devido também à grande porosidade, são exemplos de rochas sedimentares que, mesmo sãs, podem ser muito alteráveis.

## 2 – IMPORTÂNCIA DA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA NA PREVISÃO DE COMPORTAMENTO

Do ponto de vista da sua génese, embora duma maneira algo grosseira, podem dividir-se as rochas em dois grandes grupos: ígneas e metamórficas por um

lado e sedimentares por outro. Embora alguns mecanismos de alteração sejam comuns têm importância diferente em cada um destes grupos; também a previsão de comportamento está de certo modo ligada à mesma divisão, razão pela qual se entendeu conservá-la na exposição do presente capítulo.

a) *Rochas ígneas e metamórficas*

É bem conhecido que os minerais se alteram com diferentes velocidades, já que eles resistem de modo diferente aos agentes de alteração de acordo com a sua composição química e estrutural.

Entre muitas tentativas de estabelecimento de hierarquias dos diversos minerais quanto à sua vulnerabilidade à alteração salienta-se o trabalho de Goldich, S. 1938, que é seguramente dos mais divulgados neste domínio. Este autor estabeleceu seqüências de minerais, segundo as suas velocidades de alteração relativas, que ficaram conhecidas pelo nome de Séries de Goldich.

Essas séries, tal como foram apresentadas, são:

olivina	plagioclase cálcica
augite	plagioclase calco-sódica
horneblenda	plagioclase sódico-cálcica
	plagioclase sódica
biotite	
feldspato potássico	
moscovite	
quartzo	

De uma maneira muito simplista pode deduzir-se destas Séries que, sendo iguais todos os restantes parâmetros, as rochas constituídas pelos primeiros minerais das séries (olivina, etc.) são menos estáveis que as rochas constituídas pelos últimos (quartzo, moscovite, etc.).

Estas considerações são muitas vezes utilizadas em estudos de natureza pedológica e geomorfológica e, nestes domínios, têm sido propostas, por vários autores, novas séries de estabilidade de minerais ou alterações às existentes. Em todas elas o parâmetro tempo intervém à escala do milhão de anos.

Nesta altura levantam-se as seguintes questões:

– uma série como esta será importante nos problemas correntes ligados à Engenharia Civil? Poderá fornecer elementos que permitam avaliar a alterabilidade do material à escala da dezena de anos?

A experiência mostra que uma série como esta *não pode* ser encarada sob esse ponto de vista.

Efectivamente, uma rocha constituída apenas por olivina, augite e plagioclase cálcica não corre o risco de se alterar mais rapidamente, durante a vida de uma obra, que outra rocha constituída apenas por quartzo, moscovite e feldspato potássico. Poder-se-á, mesmo, referir que muitas das alterações rápidas observadas interessaram rochas graníticas compostas pelos últimos minerais das Séries de Goldich. Este facto não contradiz as citadas Séries, que foram elaboradas com outra finalidade, na qual o factor tempo entra na escala do milhão de anos, e tendo em conta, sobretudo, alterações de natureza química ocorridas nos horizontes pedológicos estudados por Goldich.

Para se avaliar até que ponto uma variação deste género deixa de ser relevante em problemas de Engenharia Civil, atente-se na referência de Dorfman, W. D. 1972, sobre o mineral eudialite:

– “Eudialite é um dos minerais *mais instáveis sob as condições de superfície*. Desintegra-se tão rapidamente que, depois de permanecer nos escombros de minas durante 30 a 35 anos *perde a sua cor brilhante*, torna-se manchado e *começa* a mudar para um agregado terroso ao longo das microfissuras. O produto final da alteração da eudialite é zirfesite”.

Refere ainda o mesmo autor:

“...visto que passou um *período de 7000 a 7500 anos* desde a última glaciação na península de Kola podemos considerar que houve tempo suficiente para a alteração de um mineral tão instável como é a eudialite”.

Cita-se, ainda, Jung, J. – 1969, que se refere a um mineral bem mais comum que a eudialite – a olivina:

– “Em primeiro lugar, a serpentinização pode ser atribuída à alteração superficial. Mas trata-se, neste caso, de um processo de importância subsidiária. *Sabe-se que os cristais de olivina dos basaltos resistem extraordinariamente bem à alteração devida aos agentes meteóricos*”.

Sublinharam-se as passagens que sugerem a extrema lentidão de todos estes processos de transformação e, conseqüentemente, a pouca relevância que terão nas alterações que interessam à Engenharia Civil.

Podem referir-se também os cálculos de Leneuf and Aubert 1960 referentes à taxa de meteorização de uma rocha – o granito – segundo um mecanismo de

ferralitização\* em clima tropical. Dizem aqueles autores que o tempo necessário, para a completa ferralitização da espessura de 1 m de granito seria de 22 000 a 77 000 anos.

Percebe-se, assim, que a composição mineralógica a que poderemos chamar original influencia pouco a alteração à escala humana.

A sua importância advem-lhe, exactamente, da presença de minerais já alterados ou mesmo de novos minerais formados após a consolidação da rocha (minerais secundários).

A natureza e a quantidade destes minerais podem fazer com que uma rocha menos alterada seja mais alterável – à escala humana – que outra mais alterada.

As rochas são frequentemente atingidas por alterações de natureza hidrotermal que originam minerais secundários de natureza diversa. São frequentes, por exemplo, a formação de caulinites ou de esmectites. A presença destes últimos minerais pode ser de tal modo decisiva que pequenas percentagens podem ser suficientes para provocar degradações importantíssimas dos materiais, mesmo daqueles que exibem boas características mecânicas. São frequentes na literatura referências a casos desta índole. Cita-se, por exemplo, a opinião de Capdecombe, L. 1969, expressa no relato geral da Questão 2 do Colóquio de Toulouse de 1969 – “...mas gostaria de insistir contudo, aqui, sobre um fenómeno que as comunicações apresentadas deixaram um pouco de lado, se bem que, a meu ver, seja a base da maioria dos casos de alteração extremamente rápida. Trata-se do fenómeno de expansão de minerais argilosos tipo esmectite, pré-formados à custa de feldspatos da rocha ao longo de alterações profundas anteriores devidas a condições hidrotermais. Estes minerais constituem uma espécie de explosivo no interior da rocha: mesmo em fracas proporções são capazes, em contacto com a água, de “rebentar” os minerais vizinhos a desagregar completamente o material”.

Um outro tipo de desagregações rápidas pode ter lugar em rochas de composição granítica ou sienítica devido a presença de feldspatos ácidos (albite, oligoclase) parcialmente lixiviados. Esta lixiviação parcial cria uma instabilidade na estrutura do cristal que, em presença de condições desfavoráveis, pode originar o colapso dessa estrutura e a consequente desagregação da rocha. Também neste caso se exige que os minerais estejam já parcialmente alterados.

---

\* Chama-se ferralitização ao enriquecimento relativo em ferro e alumínio, provocado pela remoção dos iões mais móveis tais como: silício, sódio, potássio, etc. O fenómeno exige alteração química importante e boas condições de drenagem.

Em resumo, pode dizer-se que, à escala da vida de uma obra de engenharia, quaisquer que sejam os minerais primários constituintes da rocha (nomeadamente os minerais das Séries de Goldich), esta se manterá estática no que diz respeito à sua alterabilidade desde que esses minerais se encontrem não alterados.

A importância da composição mineralógica está, pois, no estado de alteração em que se encontram os seus minerais e na natureza e quantidade dos minerais secundários.

#### b) *Rochas sedimentares*

A composição mineralógica e a textura conferem propriedades muito diferentes às rochas sedimentares. Assim, a dissolução, que nas rochas ígneas não apresenta relevância à escala da dezena de anos, pode já ser importante para certas rochas sedimentares (calcários, gesso). A expansão de minerais argilosos em presença de água ocorre também nas rochas sedimentares (margas) sendo mais raros os casos de degradações possíveis provocadas por hidrólise dos feldspatos (arcoses).

Nas rochas sedimentares, e, de acordo com o que fica exposto acima, é importante a composição mineralógica mesmo em minerais primários.

Verifica-se também, que, embora o desequilíbrio entre as condições da génese das rochas sedimentares e as condições da sua utilização seja menor que nas rochas ígneas, como é frequente apontar-se, existem casos de degradações muito mais rápidas para as rochas sedimentares. Isto demonstra que as considerações teóricas são por vezes incompletas e nem sempre explicam cabalmente a realidade. Para uma obra de engenharia pouco importa que dado mineral seja mais instável do que outro sob determinado ponto de vista, se apresentar menor velocidade de degradação nas condições em que se encontra. Para uma obra só são importantes os mecanismos susceptíveis de ocorrer e de a influenciar durante o seu tempo de serviço.

### 3 – O PAPEL DA FISSURAÇÃO

Os mecanismos de alteração mais comuns exigem a presença de água para se processarem. Esta tem, pois, que entrar em contacto com os minerais, sendo a sua influência tanto maior quanto maior superfície de contacto existir entre a água

e esses mesmos minerais. Um dos parâmetros fundamentais do desenvolvimento desse contacto é a fissuração que, simultaneamente, facilita o acesso e aumenta a superfície de contacto.

Os maciços rochosos apresentam-se, dum modo geral, fracturados, independentemente do tipo de rocha que os constitui. A natureza e dimensão das fracturas é muito variada, assim como as causas que lhes deram origem. A influência destas fracturas nas propriedades do maciço rochoso é muito grande, sendo as propriedades das rochas isotrópicas ou pouco anisotrópicas dependentes essencialmente de dois grupos de parâmetros – minerais constituintes e descontinuidades\*.

Também nos problemas de alteração e alterabilidade de rochas o seu papel é importante dado que, por um lado, estado de alteração e estado de fissuração não são variáveis independentes, sendo a previsão de comportamento, por sua vez, dependente destes dois parâmetros.

Segundo Pérami, R. 1971 – podemos distinguir duas escalas para as descontinuidades das rochas:

- macroscópica – macrofissuração
- microscópica – microfissuração

As descontinuidades macroscópicas são consequência de acções mecânicas e/ou acções térmicas exercidas sobre maciços rochosos e incluem grandes acidentes tais como falhas, diaclases, etc.

As descontinuidades microscópicas compreendem as seguintes categorias:

- microfissuras intracristalinas
- microfissuras intercristalinas
- microfracturas.

A orientação das microfissuras depende mais dos cristais e dos seus defeitos que das solicitações exteriores, enquanto a orientação das microfracturas é essencialmente comandada pela orientação daquelas solicitações.

No estudo dos materiais rochosos tem sobretudo interesse considerar a parcela das descontinuidades correspondentes à microfissuração. É a esta escala que as descontinuidades mais influem nos fenómenos de alteração, sendo também estas as mais características do material rochoso. Além disso, são ainda estas descontinuidades que se conservam no material quando este é levado até pequenas

---

\* Descontinuidade é o termo genérico que engloba qualquer entidade geológica que provoque uma solução de continuidade nas propriedades do maciço rochoso – neste termo estão englobadas portanto as fracturas, fissuras, xistosidade, superfície de estratificação, etc.

dimensões, como é o caso dos ensaios de laboratório. A grande superfície específica por elas desenvolvida torna-as muito importantes nos fenómenos de alteração que, em geral, dependem daquela superfície.

As descontinuidades maiores são o veículo em grande no interior dos maciços rochosos e a grande via de escoamento dos produtos de alteração, mas a reduzida superfície específica por elas introduzida torna-as, por isso, nitidamente menos importantes. As suas grandes dimensões e espaçamento tornam estas descontinuidades características do maciço rochoso e não do material rochoso propriamente dito.

Poderá atribuir-se à fissuração múltiplos papéis: a fissuração aumenta quer a porosidade acessível à água quer a permeabilidade. O aumento da porosidade provoca um maior contacto mineral-água, acelerando todos os mecanismos dependentes desse contacto (hidrólise, hidratações, expansões, etc.) e o aumento de permeabilidade possibilita uma saída mais fácil dos produtos de alteração, permitindo um prosseguimento mais rápido dessa alteração.

Como referem Farran, J. et Thénoz, B. 1965 – “Todas as descontinuidades têm o seu papel no desenvolvimento de um processo de alteração: as macrofracturas abertas drenam para o interior de um maciço as águas que, desde logo, podem lixiviar e atacar grandes superfícies internas de minerais ao longo da microfissuração matricial. Quanto às microfracturas, elas participam nas duas funções, conquanto as superfícies de contacto constituídas pelos seus bordos sejam muito menos desenvolvidas que aquelas que resultam da microfissuração matricial; também se pode considerar que o seu papel essencial consiste em completar a rede de irrigação ramificada a partir da qual se torna possível a impregnação da matriz”.

Além do papel que se acaba de apontar para as descontinuidades em tudo o que se refere à penetração da água no maciço e na matriz rochosa, outras funções muito importantes são por elas desempenhadas.

Estão neste caso a influência que têm nas características mecânicas dos materiais rochosos, nomeadamente na deformabilidade e rotura e particularmente na resistência à rotura em tracção.

Este duplo papel – vias de acesso às águas de circulação e diminuição da resistência dos materiais, torna este parâmetro particularmente importante do ponto de vista da alteração e alterabilidade de rochas, sobretudo no que se refere à previsão de comportamento.

No entanto, não existe unanimidade quanto à importância relativa destes dois papéis. Alguns autores preferem atribuir importância primordial à percolação

através da rocha, única via capaz de provocar acesso rápido de água aos locais onde pode actuar, transportando simultaneamente os produtos de alteração. Outros autores argumentando que na prática o material rochoso é impermeável à água para os gradientes normais observados na Natureza, preferem atribuir à fissuração o papel de aumentar a porosidade e, conseqüentemente, aumentar o contacto água-rocha. Segundo estes autores os produtos de alteração são eliminados do material rochoso por difusão iónica até à rede de fracturas nas quais a água pode circular com os gradientes normais.

A importância da microfissuração não deve, de qualquer forma, ser subestimada. Ela é responsável, em grande parte, pelo grau de coesão de uma rocha e, mesmo na hipótese de difusão iónica como via de alteração, é através dessa fissuração que se processará a difusão até às grandes descontinuidades onde a água circula.

Por outro lado, a permeabilidade é de tal modo sensível à microfissuração que a sua consideração pode ser muito importante como parâmetro caracterizador.

#### 4 – ALGUMAS TÉCNICAS DE PREVISÃO DE COMPORTAMENTO

##### a) *Degradações causadas pela lixiviação dos feldspatos*

A hidrólise dos feldspatos ácidos, segundo um mecanismo proposto por Struillou, R. 1969, pode originar nesses feldspatos estruturas cristalinas instáveis. A modificação das condições de jazida das rochas que possuem os feldspatos assim instabilizados, pode ocasionar a rápida degradação das suas características. Segundo este autor as rochas de composição granítica e sienítica seriam as mais particularmente susceptíveis de sofrerem degradações deste tipo.

A previsão do comportamento far-se-ia mediante a análise da evolução das características mecânicas da rocha após aquecimento a 100, 450 e 700°C. A diminuição dessas características, após descontado os efeitos devidos à dilatação térmica dos minerais, daria uma ideia da importância das zonas lixiviadas existentes nos feldspatos. O autor referido admite que este efeito mecânico é comparável aos efeitos de um ataque químico que atinja preferencialmente as zonas lixiviadas causando a degradação da rocha. Em cada situação particular da rocha há que ter em conta o parâmetro ou parâmetros específicos de cada situação (teor e natureza das matérias orgânicas, pH, teor em ferro e temperatura).

A utilização deste método de previsão apresenta bastantes dificuldades de interpretação.

b) *Degradações causadas por expansões*

Existem com frequência, no interior das rochas, minerais de grande afinidade para a água. São eles os hidróxidos e os minerais fibrosos e filitosos.

Devido às suas propriedades eléctricas superficiais e estruturais e à sua grande superfície específica têm, todos, forte tendência para adsorverem camadas de água e por vezes também para absorverem (casos das argilas expansivas: montmorilonites, vermiculites, hidrobiotites, ilites expansivas, etc.), provocando tensões de expansão nas paredes que confinam com aqueles minerais. Estas tensões podem atingir valores muito elevados, chegando Lamballerie, N., 1962 a valores da ordem de 200 kgf/cm<sup>2</sup>.

Nas situações de jazida correntes, as rochas encontram-se em equilíbrio com as soluções circulantes e com a pressão de confinamento. A modificação de quaisquer destes parâmetros (escavação de trincheiras, cavidades subterrâneas, extracção de blocos) pode fazer retomar o fenómeno da absorção e adsorção da água e obrigar a um segundo equilíbrio. A evolução deste fenómeno conduz, frequentemente, à ruína do material.

A previsão do comportamento face a este mecanismo é feita habitualmente por via directa segundo a qual se procura determinar quantitativamente o teor em minerais argilosos, e por via indirecta em que se procura detectar os efeitos que esses minerais produzem no comportamento da rocha quando esta é submetida a tratamento laboratorial adequado.

A contagem em microscópio polarizador e a difracção de Raios X com utilização de padrões internos são exemplos de métodos directos. Em certos casos estes métodos permitem determinar com razoável aproximação a percentagem de minerais argilosos presentes, mas não dão informação sobre as características da matriz rochosa em particular sobre a capacidade que ela terá para suportar as pressões de expansão.

Muitas das técnicas de estudo não permitem determinar os teores de minerais argilosos mas apenas permitem avaliar a influência desses minerais no comportamento dos materiais rochosos e são, portanto, técnicas indirectas.

Como exemplo destas técnicas apontam-se as seguintes:

- utilização de água oxigenada a 110 volumes (Struillou, R. 1969).

- determinação da reactividade água-rocha (Farran, J. et Thenoz, B., 1965);
- ensaios de imersão em água;
- avaliação do teor de humidade em atmosfera de humidade relativa controlada (Delgado Rodrigues, J., 1976).
- aumento do desgaste após ataque com etileno-glicol (Delgado Rodrigues, J., 1976).
- diferença de comportamento entre rochas secas e saturadas perante determinados ensaios mecânicos (slake durability test, Deval, etc.).

A utilização criteriosa destas técnicas permitirá, na maioria dos casos, fazer a previsão do comportamento em face do mecanismo de expansão de minerais argilosos, sendo provável que nenhuma delas, isoladamente, consiga dar resposta a todas as situações possíveis.

#### c) *Degradações devidas à esfoliação*

A esfoliação consiste na separação progressiva da rocha em pequenas camadas devido à presença de superfícies de descontinuidade: planos de estratificação, de laminação ou foliação. Este fenómeno é muito frequente em rochas xistosas e evidencia-se quando as rochas são aliviadas das pressões de confinamento e quando, nestas condições, são submetidas a ciclos sucessivos de secagens e embebições.

A sensibilidade a este fenómeno e, portanto, a previsão do comportamento, é avaliada submetendo as amostras a aquecimento brusco a 700°C durante 15 minutos, no estado seco e saturado (Struillou, R., 1969); (Delgado Rodrigues, J., 1974).

Os ensaios de secagem e embebição, embora de execução mais demorada, fornecem também indicações quanto a este mecanismo.

#### d) *Degradações devidas ao crescimento de cristais*

De entre os mecanismos mais importantes que cabem nesta designação salientam-se os mecanismos de gelividade e cristalização de sais salinos.

O ensaio de gelividade, como o nome indica, destina-se a avaliar a aptidão das rochas para resistirem à congelação da água nos seus poros. Na Norma Francesa (Afnor, PRB 10-513) está apresentada uma metodologia para este ensaio de gelividade. Também aí é apresentado um ensaio indirecto, mais fácil de executar, para prever o comportamento em face do gelo; trata-se da determinação da porosidade e

do coeficiente de saturação da rocha. Esta Norma apresenta ainda os critérios de aceitação para pedras calcárias destinadas à construção civil quando utilizadas no clima de determinada região de França.

O ensaio de sulfatos procura reproduzir o mecanismo de alteração provocado pela cristalização de sais. O uso que tem sido dado a este ensaio, a avaliar pela quantidade de normas em que é exigido, sugere que se tem esperado dele informações que transcendem o referido mecanismo. Alguns autores têm mesmo sugerido que ele possa servir como critério para avaliar a resistência à gelividade. Honeyborne, D., 1965, considerando, embora, a necessidade de uma investigação muito profunda dos mecanismos e dos métodos, não rejeita esta ideia.

A Norma ASTM C88 e a Especificação LNEC E238-1970 descrevem este método de ensaio. Em Arnold, L. and Price, C. A., 1975, está referida uma outra variante para os ensaios com cristalização de sais.

#### e) *Outras técnicas*

Algumas especificações disponíveis na literatura indicam como critérios de previsão parâmetros que de algum modo estão relacionados com a acessibilidade da água ao interior da rocha e com a capacidade desta para a reter.

A definição dos parâmetros ligados a estas propriedades tem esbarrado com diferentes pontos de vista dos investigadores, estando longe de atingir um grau de normalização adequado. A estrutura porosa dos materiais parece estar ligada e influenciar todas as propriedades ligadas ao comportamento da água.

Os parâmetros mais vulgarmente referidos são:

- teor em água de equilíbrio com atmosfera de humidade relativa controlada;
- coeficiente de absorção e coeficiente de penetração de água (Vos, B. H., 1975);
- teor em água crítico e resistência à difusão do vapor de água (Vos, B. H., 1975);
- coeficiente de capilaridade;
- coeficiente de saturação;
- máximo teor em água;
- permeabilidade e superfícies específicas.

Farran, J. et Thenoz, B., 1965, utilizam a permeabilidade e as superfícies específicas para preverem o comportamento de rochas compactas como granitos, etc.. Os restantes parâmetros enunciados têm sido aplicados especialmente a rochas

muito porosas (calcários e grés) para as quais existe já um conhecimento que permita utilizá-los como critério de aceitação em face de determinados mecanismos de alteração.

Para rochas muito compactas, contudo, a utilização destes parâmetros tem sido menor, sobretudo porque grande número destas rochas apresentam menos problemas de alteração e, ainda, porque as pequenas quantidades de água envolvidas tornam mais imprecisas as medições e a exploração dos resultados.

## NOTA FINAL

O presente trabalho é uma adaptação da Parte II do trabalho do mesmo autor "Alterabilidade de rochas em problemas de Geologia de Engenharia. Aplicação a casos portugueses". LNEC, Relatório. Dezembro de 1975.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFNOR, PRB 10-513 – "Produits de carrière. Pierres calcaires. Essai de Gélivite". Ass. Française de Normalisation.
- ARNOLD, L. and PRICE, C. A., 1975 – "The laboratory assessment of stone preservatives". The Conservation of Stone I. Proc. Int. Symp. Bologna. June, 1975.
- ASTM C88-69 – "Soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate". ASTM. 1969.
- CAPDECOMME, L. 1969 – "Rapport Général du Thème 2". Colloque de Géotechnique. Toulouse. Mars, 1969.
- DELGADO RODRIGUES, J. 1974 – "Altérabilité des roches schisteuses. Deux exemples d'application". Proc. of 2nd Int. Cong. IAEG. São Paulo. August, 1974.
- DELGADO RODRIGUES, J. 1976 – "Estimation of the content of clay minerals and its significance in stone decay". Proc. 2nd Int. Coll. of Deterioration of Building Stones. Athens. Sept., 1976.
- DORFMAN, W. D. 1972 – "Present process of rock weathering in the Khibiny alcaic pluton". Dokl. Sc. USSR, Vol. 205. July/August, 1972.
- FARRAN, J. et THENOZ, B. 1965 – "L'Altérabilité des roches, ses facteurs, sa prévision". Annales de l'I.T.B.T.P., XVIIIème année. Novembre, 1965.
- GOLDICH, S. 1938 – "A study in rock weathering". Jour. of Geology, Vol. 46, pg. 17-58.
- HONEYBORNE, D. 1965 – "Weathering processes affecting inorganic building materials". Build. Res. Sta., IN 141/65. 1965.
- JUNG, J. 1969 – "Précis de Pétrographie". 3ème Edition Masson et Cie., Editeurs. Paris, 1969.

- LAMBALLERIE, E., 1962 – “Contribution à l'étude des phénomènes de gonflement accompagnant l'hydratation des argiles compactes”. Thèse de docteur – Ingénieur. Toulouse, 1962.
- LENEÚF, N. and AUBERT, G. 1960 – “Attempt to measure the rate of ferrallitisation”. Trans. 7th Cong. Soil Sci., Vol. 4 *in* OLLIER, C. 1969.
- LNEC E238-1970 – “Agregados. Ensaio de alteração pelo sulfato de sódio ou pelo sulfato de magnésio”. Especificação LNEC. Lisboa, 1971.
- OLLIER, C. 1969 – “Weathering”. Oliver & Boyd. Edinburgh, 1969.
- PÉRAMI, R. 1971 – “Contribution à l'étude expérimentale de la microfissuration des roches sous actions mécaniques et thermiques”. Thèse. Toulouse, 1971.
- STRUILLOU, R. 1969 – “Prévision de l'altérabilité des matériaux en fonction de leurs caractéristiques propres et de leurs utilisations”. Colloque de Geotechnique. Toulouse, Mars 1969.
- VOS, B. H. 1975 – “Waterabsorption and drying of materials”. The Conservation of Stone I. Proc. Int. Symp. Bologna, June 1975.