

Capítulo 3 - ALTERAÇÃO E ALTERABILIDADE DE ENROCAMENTOS

3.1. Introdução

A utilização de rochas como material de construção é prática corrente desde os princípios de nossa civilização. A observação das modificações das características das rochas, em virtude de sua exposição aos agentes do meio ambiente (atmosféricos e biológicos), também não constitui fato novo.

As primeiras considerações gerais sobre alteração de rochas e conseqüentes implicações são datadas do início do século XIX, por J. Fournet, na França como relatado por Pedro (1969). No entanto, na engenharia civil, as transformações da rocha pelos agentes do meio ambiente só foram abordadas sistematicamente há poucas décadas, como relatado por Farjallat (1972). De fato, a avaliação da alterabilidade das rochas, antes destes estudos, seguia critérios baseados em ensaios não-padronizados. Deste modo, a avaliação da qualidade da rocha para uso na construção era resultado unicamente da experiência e da sensibilidade dos construtores e projetistas.

3.2. Conceitos iniciais

Existem vários termos na literatura técnica que designam as modificações sofridas pelas rochas devido à ação dos agentes do meio ambiente exógeno.

O termo mais difundido é intemperismo, que representa o conjunto de processos que ocasionam a desintegração e a decomposição das rochas e dos minerais, provocados pelos agentes atmosféricos (físicos e químicos) e biológicos (Leinz e Mendez, 1963). Por desintegração, entende-se o intemperismo por agentes físicos e por decomposição, o intemperismo devido aos agentes químicos.

A desintegração consiste na perda de coesão da rocha e na progressiva individualização dos minerais constituintes, sem que ocorra, necessariamente, a modificação da natureza dos minerais. A decomposição corresponde à modificação progressiva da natureza dos minerais, sem, necessariamente, ocorrer desintegração.

Além do intemperismo, a desagregação é, também, importante fator quanto às modificações das rochas. Entende-se por desagregação, o mecanismo pelo qual ocorre a redução da resistência mecânica e o aumento da produção de finos. Este mecanismo envolve processos físicos e/ou químicos.

Outros termos, como degradação, arenitização e pulverização, também são utilizados para definir as específicas modificações das rochas devido aos agentes do ambiente exógeno.

O termo alteração é igualmente usado para designar as modificações físicas e químicas das rochas. Neste caso, tais modificações provocam mudanças no desempenho da rocha, principalmente do ponto de vista geomecânico (Frazão, 1993). Para fazer referência às diferentes intensidades com que as modificações ocorrem, adotam-se os termos grau de alteração ou estado de alteração da rocha.

A maior ou menor susceptibilidade da rocha à alteração é definida pela alterabilidade do material. A alterabilidade depende, principalmente, da estabilidade química dos minerais constituintes da rocha. Como exemplo, destaca-se a maior alterabilidade de rochas basálticas em relação às graníticas. Este fato se deve à menor estabilidade química dos minerais essenciais do basalto (plagioclásio e piroxênios) em relação aos do granito (quartzo, ortoclásio e biotita), nas mesmas condições físico-químicas do ambiente de alteração.

O conceito de alterabilidade relativa foi inicialmente proposto por Goldich (1938). Essa proposição foi baseada na estabilidade química de rochas com diferentes composições mineralógicas, submetidas às mesmas condições de alteração na superfície terrestre. Esse estudo permitiu estabelecer séries de alterabilidade de minerais, capazes de determinar a susceptibilidade de alteração de um mineral em relação aos demais. Bowen (1956) apresenta séries de reações que sugerem uma seqüência de formação de minerais no líquido magmático. Os primeiros minerais a se formarem no magma são os menos estáveis nas condições de alteração da superfície terrestre, como a olivina e o plagioclásio cálcico. Por sua vez, os últimos minerais a se formarem no magma, como por exemplo o quartzo, são os mais estáveis nas condições vigentes na superfície do globo terrestre. Baseado nestas séries e no conhecimento peculiar dos principais minerais silicatados, Minette (1982) apresenta uma seqüência de rochas, em função da susceptibilidade à alteração dos minerais constituintes. A Figura 3.1 mostra uma adaptação desta seqüência, na qual foi introduzido o basalto. A figura possibilita uma avaliação da alterabilidade relativa das rochas em função dos seus minerais constituintes.

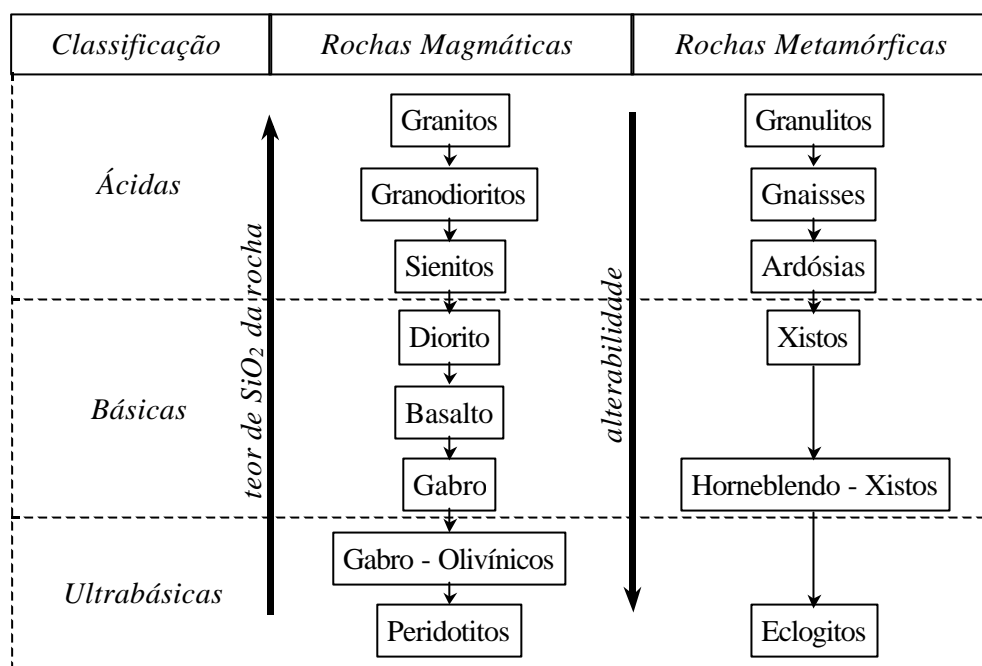


Figura 3.1 - Ordem de alteração química de rochas.

3.3. Alteração e alterabilidade de rochas

A avaliação da alteração e a alterabilidade de rochas constituem provavelmente dois dos mais complexos problemas da Engenharia Civil.

A alteração de rochas ocorre, naturalmente, num intervalo geológico de tempo, ou seja, de centenas a milhares de anos. Todavia, alterações significativas também podem, em alguns casos, ocorrer num intervalo muito menor, isto é, de alguns anos ou mesmo meses.

A literatura cita vários problemas decorrentes da alteração de rochas utilizadas na construção civil. Farran e Thénoz (1965) apresentam um caso onde rochas graníticas expostas ao agentes atmosféricos desagregaram-se em meses ou até semanas. Rodrigues (1975) menciona o caso da rocha basáltica de Ribamar que, utilizada nas ruas de Lisboa como cubos de pavimentos, arruinou-se em alguns dias. A Tabela 3.1 mostra outros exemplos de problemas relacionados com a alteração de materiais rochosos.

No Brasil, destaca-se a rocha de um túnel da Barragem de Capivari-Cachoeira (Paraná) que, quando mergulhada em água, embora apresentasse indício de boa resistência mecânica, desagregou-se completamente. Igualmente, um basalto compacto usado no aterro da ponte do Rio Sucuri, obra complementar da Barragem de Jupia, desagregou-se completamente em semanas (Farjallat *et al.*, 1972).

Tabela 3.1 - Casos históricos de alteração rápida de materiais rochosos (adaptada de Fookes *et al.*, 1988).

Referência	Estrutura	Material utilizado	Período de alteração	Local	Causa da alteração
Scott (1955)	Estradas	Basalto	< 5 anos	Nordeste dos USA	Alta porcentagem de minerais secundários alterados
Minor (1960)	Estradas	Basalto	3 meses	Washington (USA)	Presença de minerais secundários
Day (1962)	Estradas	Basalto	-	Idaho (USA)	Presença de minerais secundários e desagregação
Weinert (1964, 1968)	Estradas	Diorito efusivo	-	África do Sul	Presença de minerais secundários
Hosking e Tubey (1969)	Estradas	Olivina Basalto e Diorito efusivo	-	Derby e Hampshire (UK)	Intemperismo <i>in situ</i>
	Pista de pouso	Ígnea Básica	18 meses	Mauritius	Presença de minerais secundários
Smith <i>et al.</i> (1970)	Rip Rap	Diversos materiais	-	USA	Processo de intemperismo físico
Anon (1970)	Rip Rap	Granito	-	Waddell Bluffs, Santa Mateo	Expansão dos minerais secundários
Bethune (1971)	Rodovia	Basalto	6 meses	Victoria (Austrália)	Material contendo 20% de minerais secundários
Balch (1972)	Estradas	Basalto	-	Glenbrook (Nova Zelândia)	Efeitos da umidade no produto de alteração
Cole e Lancuchi (1976)	Estrutura de concreto	Basalto	-	Victoria (Austrália)	Fragmentação do agregado
Wylde (1976)	Estradas	Basalto	-	Austrália	Mineralogia e textura da rocha História geológica
Minty (1976)	Estradas	Rocha vulcânica heterogênea	-	New South Wales (Australia)	Presença de argilas expansivas e permeabilidade da rocha
Cawsey e Massey (1984)	Estradas	Diorito efusivo	< 1 ano	Sudoeste da Inglaterra	Desagregação física dos agregados
Mellon (1985)	Estradas	Basalto	< 5 anos	Etiópia	Desagregação física causando aumento das fissuras

Outro exemplo importante, também citado por Farjallat *et al.* (1972), Signer (1973) e Cruz (1996), são os basaltos compactos da Barragem de Capivara, localizada no Rio Paranapanema entre os estados de São Paulo e Paraná. Alguns destes basaltos desagregaram-se completamente quando expostos aos agentes atmosféricos. Esse comportamento influenciou a redefinição de parte do projeto da barragem.

Frazão e Caruso (1983) apresentam, ainda, uma síntese sobre a alterabilidade de rochas basálticas, utilizadas como material de construção de algumas barragens da Bacia do

Alto Paraná. Este trabalho destaca o processo acelerado de desagregação, ocorrido em poucos anos, em alguns enrocamentos de proteção de barragens brasileiras.

Sob o ponto de vista de alterabilidade, importantes são as barragens de enrocamento com fase de concreto, principalmente as que utilizam rochas basálticas. No Brasil, cita-se, dentre outras, a Barragem de Foz do Areia como a primeira construída deste tipo. Esta barragem esta localizada Rio Iguaçu no Estado do Paraná e foi estudada por Rosi (1983).

Pelo exposto, a análise da alteração e da alterabilidade das rochas e seus efeitos nas propriedades geotécnicas são de extrema relevância na possível previsão do comportamento de materiais rochosos, seja na forma de maciço, seja na forma granular.

3.3.1. Efeitos da alteração

Vários aspectos estão relacionados aos efeitos da alteração de materiais rochosos utilizados em obras da construção civil. Dentre eles, destacam-se:

3.3.1.1 Perda da resistência mecânica

A perda de resistência mecânica de materiais rochosos pode provocar a redução do fator de segurança da obra, pois em geral a resistência mecânica de rochas mais alteradas é menor que a de rochas menos alteradas. Além dos casos clássicos, em que a rocha perde resistência à compressão ou à tração, pode ocorrer a desagregação da rocha, provocada pela alteração das fissuras. Excepcionalmente, a alteração pode aumentar a resistência da rocha, como por exemplo, no caso da limonitização secundária, onde ocorre o reforço das ligações cristalinas, entendido como uma petrificação menos intensa.

3.3.1.2 Modificação dos parâmetros de deformabilidade

Segundo Shoa e Mase (1966), a deformabilidade de uma rocha se dá, por um lado, pela deformabilidade dos grãos cristalinos da estrutura da rocha e, por outro, pela deformabilidade do sistema constituído pelas ligações entre os grãos. A natureza dos grãos minerais e as ligações entre eles são modificadas com a alteração da rocha. Assim, a deformabilidade da rocha pode ser significativamente afetada pela alteração.

3.3.1.3 *Variação na permeabilidade*

Devido às variações na permeabilidade ocorrem modificações no regime de fluxo e nos níveis de pressões nas descontinuidades do material rochoso. A alteração pode causar tanto o aumento quanto a redução da permeabilidade do material rochoso. Como exemplo, citam-se, as fundações de uma barragem, onde a alteração da rocha pode provocar o aumento da permeabilidade do maciço rochoso e a conseqüente perda de água pelas fundações. Em taludes, a produção de finos, provocada pela alteração da rocha, pode reduzir a permeabilidade do maciço rochoso e causar, eventualmente, uma sobrecarga devido ao acúmulo de água. Cita-se ainda, a desagregação de materiais granulares utilizados como drenos, que reduz sua capacidade de vazão.

3.3.1.4 *Redução da aderência*

Devido a alteração pode ocorrer a redução da capacidade de aderência das partículas (adesividade), tanto a ligantes hidráulicos, quanto a betuminosos. Durante o processo de britagem, na superfície de fratura dos fragmentos, ocorre a quebra de algumas das ligações interatômicas dos elementos constituintes da rocha. Nos silicatos, que são os principais constituintes das rochas, na superfície de ruptura dos fragmentos ocorre a concentração de íons positivos (Ca^{2+} , Na^{2+} , K^+ , Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , etc.) e íons negativos (O^{2-}). Na presença da água, estes íons são neutralizados através da fixação de OH^- aos íons positivos e de H^+ aos íons negativos. Posteriormente, os elementos formados na superfície dos fragmentos são lixiviados. A dissolução de Ca, Na e K é mais rápida que a da sílica e da alumina. A concentração de sílica e alumina torna a superfície do fragmento cada vez mais ácida. Este tipo de superfície é desfavorável à adesividade dos ligantes. Deste modo, a acidificação progressiva da superfície dos fragmentos pode conduzir a riscos de baixa adesividade.

3.3.2. **Considerações sobre a alteração de rochas**

3.3.2.1 *Fenômeno da alteração*

O fenômeno da alteração de rochas depende de fatores intrínsecos e extrínsecos. Os fatores intrínsecos são relativos à natureza da rocha, isto é, à composição mineralógica, às

características químicas e ao estado das microfissuras. Os fatores extrínsecos são relativos ao meio ambiente, ou seja, às condições climáticas.

Barros (1971) sugere que a alteração de uma rocha seja função, também, do tempo de exposição.

Os fatores intrínsecos e os extrínsecos atuam como promotores da alteração que ocorre em um determinado período de tempo. Os fatores intrínsecos, são relacionados à natureza mineralógica e à superfície exposta às reações de alteração.

Os fatores extrínsecos, são a temperatura, o potencial hidrogeniônico, o potencial de oxidação-redução, a quantidade de água disponível e as forças provocadas por agentes biológicos.

3.3.2.2 *Mecanismos de alteração*

Os mecanismos de alteração ocorrem de modo gradativo. Através destes mecanismos, as rochas e seus minerais constituintes reagem ao meio ambiente exógeno em que se encontram, transformando e originando produtos de alteração estáveis nas novas condições de temperatura e pressão do meio (Minette, 1982).

Os mecanismos de alteração são atribuídos a processos físicos ou processos químicos. Pode-se considerar, ainda, os processos gerados por agentes biológicos, que são conseqüências de processos químicos e físicos e não são fundamentalmente diferentes dos anteriormente citados (Ollier, 1979). Estes processos ocorrem devido à ação dos agentes de alteração impostos pelo meio. Na evolução da alteração da rocha, tais processos ocorrem simultaneamente. No entanto, um destes processos pode se impor ao outro, de acordo com as condições do meio.

As reações químicas, que podem provocar a alteração da rocha, ocorrem, preferencialmente, em meios úmidos. Os principais mecanismos de alteração de natureza química são:

- hidrólise: causada pela reação, em um meio aquoso, entre os íons H^+ e OH^- da água e os íons ou elementos dos minerais da rocha. A entrada destes íons na rede cristalina dos minerais da rocha provoca a retirada de outros íons, como, por exemplo, o Na^+ , o K^+ e o Ca^{2+} no caso de minerais silicatados. Assim, o carreamento dos íons causa o desgaste da rocha e, eventualmente, a abertura de fissuras pela expansão dos minerais. Este

mecanismo implica no enfraquecimento progressivo da estrutura do mineral e conseqüentemente da rocha;

- hidratação: é a adição de água ao mineral. É uma reação exotérmica e envolve consideráveis variações de volume dos minerais. A variação de volume dos minerais pode causar a desintegração da rocha;
- solubilização: é um mecanismo correspondente à perda dos minerais constituintes da rocha para água. Este processo é função das características físicas e químicas do meio aquoso;
- oxidoredução: é a reação dos minerais da rocha com o oxigênio. Os produtos da oxidoredução são os óxidos e hidróxidos, que constituem elementos de fácil lixiviação;
- carbonatação: é a reação dos íons CO_3^- ou HCO_3^- com os minerais da rocha. Os produtos da carbonatação são os carbonatos de fácil lixiviação;
- complexação: é a reação onde ocorre uma forte ligação entre um íon, normalmente um metal, e a estrutura anelar do composto químico dos agentes da complexação. Os principais agentes da complexação são a matéria orgânica e o húmus.

A alteração física da rocha é caracterizada pela fragmentação em virtude de agentes mecânicos, sem que ocorra variação química. Espera-se que a alteração física seja marcante nas regiões onde a umidade é muito baixa. Os principais mecanismos de alteração de natureza física são:

- fraturamento por alívio de tensões: a descompressão de maciços rochosos pode provocar a microfissuração e o desenvolvimento de fraturas na rocha. Este alívio de tensões pode ser causado por diversos fatores, como por exemplo, escavações subterrâneas, cortes de grandes taludes, erosão de extratos superficiais, etc.;
- expansão devido a efeitos térmicos (insolação): a variação da amplitude térmica diurna e noturna (variação sazonal) gera a expansão e a contração da rocha. Tendo em vista que as rochas são constituídas por diferentes minerais, com diferentes coeficientes de dilatação, a expansão e a contração dos minerais podem causar o desenvolvimento de tensões, que podem gerar microfissuras e, posteriormente, a desagregação da rocha;
- abrasão: é provocada pelo atrito ou impacto entre partículas. Este mecanismo causa o desgaste da rocha;

- desagregação por crescimento de cristais: o crescimento de cristais no interior da rocha pode ser provocado principalmente por três fatores: o congelamento da água, a cristalização de sais e as alterações químicas com expansão. A variação de volume, ocasionada pelo crescimento de cristais no interior da rocha, gera tensões que podem causar o fraturamento.

3.3.2.3 Agentes de alteração

Os principais agentes de alteração das rochas são de ordem climática. Ambiente climático é o conjunto de fatores que caracteriza o estado médio da atmosfera, da hidrosfera e da biosfera do meio. Os principais fatores climáticos são temperatura, precipitação, umidade relativa do ar, vento, pressão atmosférica, potencial hidrogeniônico e potencial de oxidação-redução. Além destes, Jenny (1941) destaca, ainda, a importância das condições da topografia nos mecanismos de alteração.

A intensidade de atuação dos agentes de alteração na rocha varia de acordo com o ambiente climático. Todavia, pode-se estabelecer uma correlação entre o tipo de alteração e alguns dos agentes de alteração (Peltier, 1950). Na Figura 3.2 o autor estabelece uma correlação entre a temperatura média anual, a precipitação média anual e os prováveis tipos e intensidade de alteração.

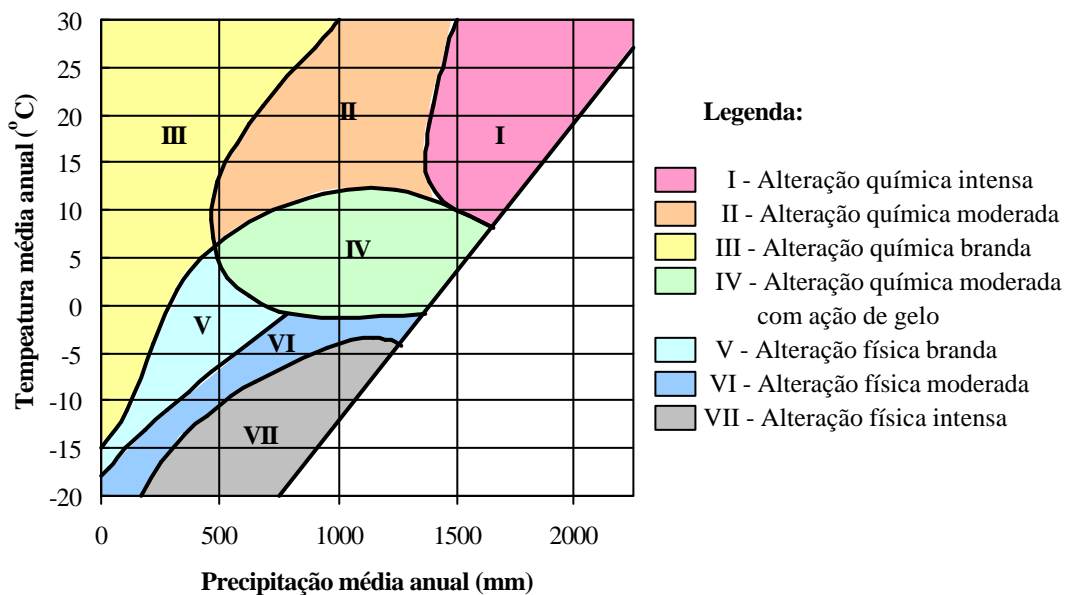


Figura 3.2 - Tipos de alteração em função da temperatura e da precipitação (Peltier, 1950).

3.3.3. Alteração de basaltos no Brasil

As rochas basálticas, utilizadas como material de construção no Brasil, originam-se principalmente de derrames basálticos. As características destas rochas relacionam-se às características de cada derrame. A Figura 3.3 mostra uma camada de basalto correspondente a um derrame típico. Observa-se em sua base uma estreita faixa de basalto vesicular e/ou amigdalóide. A rocha do derrame passa gradativamente para um basalto denso na região intermediária. A parte superior do derrame é caracterizada por uma camada espessa de basalto vesicular e/ou amigdalóide. Verificam-se ainda, entre derrames sucessivos, brechas basálticas e/ou arenitos silitificados.

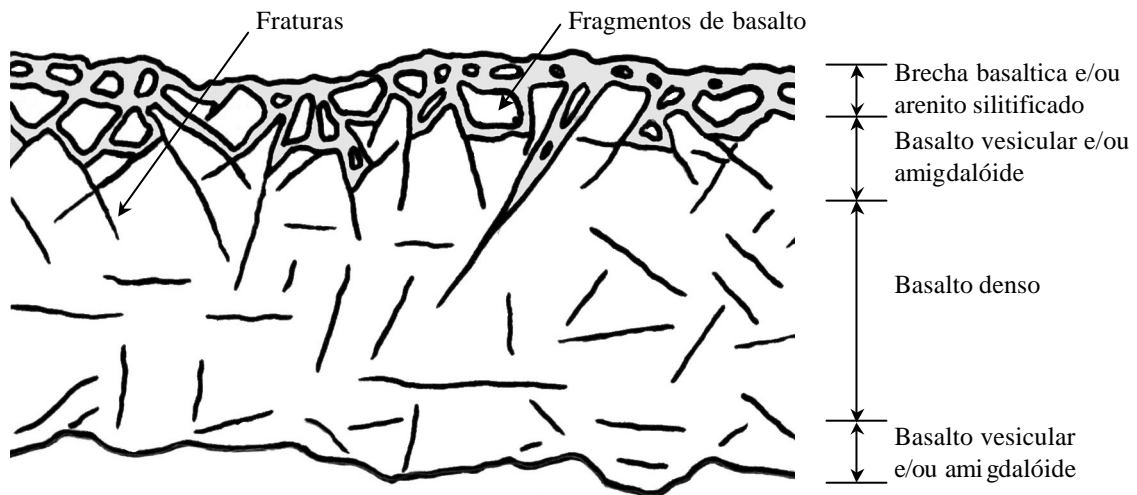


Figura 3.3 - Distribuição dos materiais basálticos em um derrame de típico.

Dentre estes basaltos, os densos são os que apresentam as melhores características de resistência, de deformabilidade e de alterabilidade. Estes basaltos são utilizados como agregado para concreto, enrocamento, calçamento de vias, etc. Entretanto, os outros tipos de basalto também são utilizados em obras da engenharia civil, especialmente, naquelas que envolvem grandes escavações em maciços constituídos por derrames basálticos (por exemplo, as barragens na Bacia do Alto Paraná).

Freqüentemente, observa-se nos basaltos a presença de minerais secundários originados por ação hidrotermal (Frazão e Caruso, 1983). Dentre os minerais secundários dos basaltos, os argilominerais são os que mais contribuem para a alteração da rocha. Estes

argilominerais podem, também, ter origem através da decomposição e posterior recristalização dos constituintes vítreos presentes na rocha.

Frazão e Goulart (1976) destacam que a expansibilidade é uma das propriedades dos argilominerais mais importante do ponto de vista de alteração dos basaltos. A expansibilidade varia de grupo para grupo de argilominerais. Dos argilominerais característicos dos basaltos, o grupo da esmectita é o mais expansivo, seguido pela illita, com poucas características condicionantes à expansibilidade e, finalmente, o grupo das cloritas, que apresenta expansibilidade praticamente nula.

Nos basaltos brasileiros, os argilominerais normalmente observados são do grupo da esmectita e da clorita. Estes argilominerais apresentam-se geralmente como material de preenchimento de vesículas e/ou microvesículas nos basaltos. Podem também estar presentes como material de preenchimento de microfissuras.

A Figura 3.4 apresenta a representação esquemática da estrutura dos argilominerais do grupo das esmectitas e das cloritas. As principais características destes dois grupos de argilominerais são:

- grupo das esmectitas: é constituído pela justaposição de uma camada octaédrica de Al^{3+} entre duas camadas tetraédricas de Si^{4+} . Estas três camadas formam uma unidade básica tripla, classificada como 2:1. Ocorrem, freqüentemente, substituições isomórficas, com a substituição do Al^{3+} das camadas octaédricas por cátions, como Mg^{2+} e Fe^{3+} . Na camada tetraédrica estas substituições são menos comuns, podendo observar Al^{3+} e Fe^{3+} no lugar de Si^{4+} . Estas substituições podem induzir uma carga residual negativa na camada. Estas cargas são neutralizadas por cátions livres no espaços interlamelares (espaço entre as unidades básicas). Geralmente, estes cátions são dos metais alcalinos e alcalinos-terrosos, de grande raio iônico, que não cabem na camada tetraédrica ou na octaédrica. Além destes cátions, existem no espaço interlamelar quantidades variáveis de água. O distância interplanabasal das esmectitas em estado normal de hidratação é de 14Å. Estes minerais apresentam grande capacidade de trocas catiônicas e de absorção de água. Isso faz das esmectitas minerais com grande potencial de expansão. O principal mineral do grupo é a montmorilonita ($Al_2O_3.4SiO_2.H_2O$), onde o magnésio substitui o alumínio e íons monovalentes no espaço interlamelar e balanceiam as cargas. O mineral mais comum nos basaltos brasileiros é a nontronita ($[Fe, Al]_2O_3.4SiO_2.H_2O$);

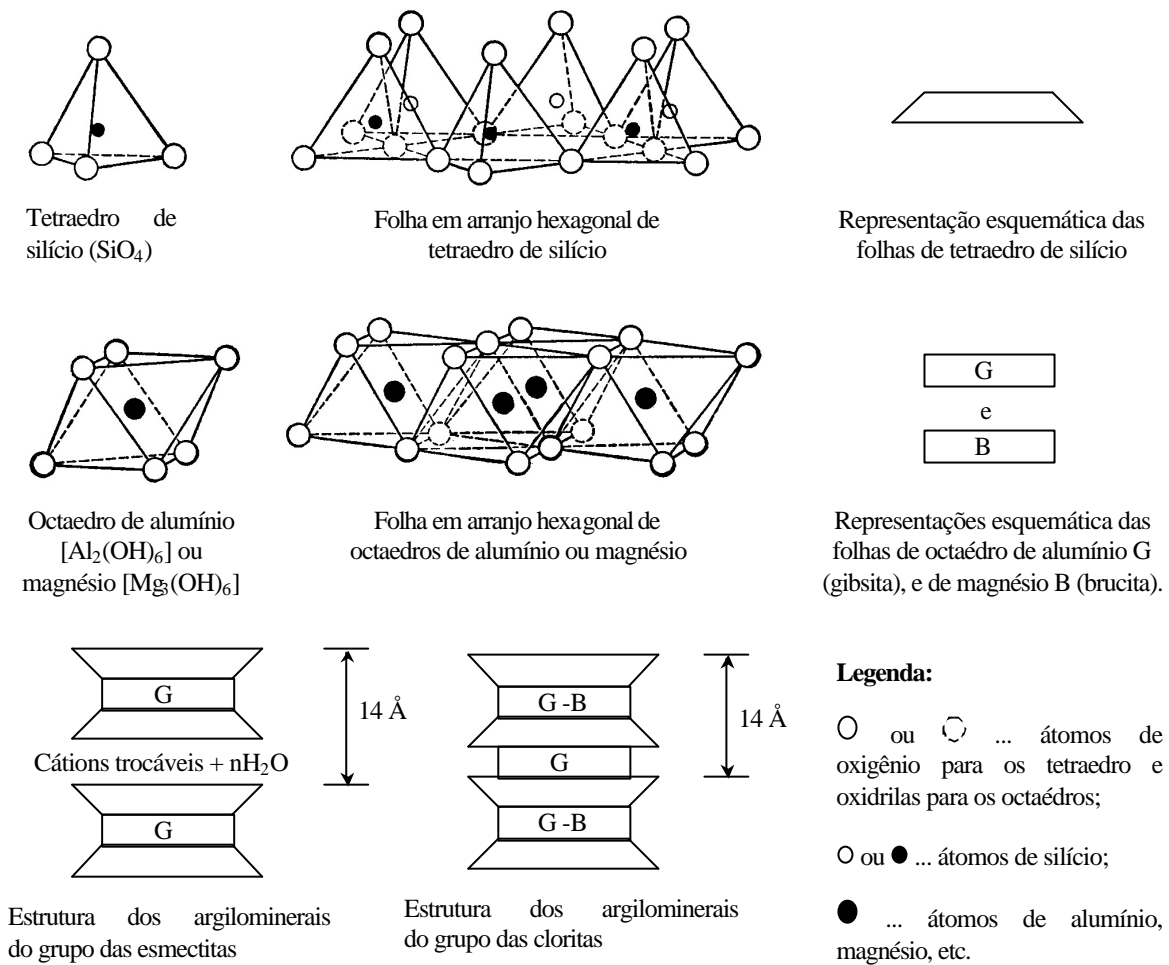


Figura 3.4 - Estrutura dos argilominerais do grupo da esmectita e da clorita (Mitchell, 1976).

- grupo das cloritas: possui estrutura básica semelhante aos minerais do grupo da esmectita. No entanto, a substituição de cátions de cargas diferentes ocorre principalmente nas camadas tetraédricas, onde em cada quatro tetraedros, três são ocupados por Si^{4+} e uma por Al^{3+} . Esta característica também é típica dos argilominerais do grupo das micas. Nos espaços interlamelares, as cloritas, ao invés de cátions livres, apresentam uma camada de brucita ($\text{Mg}[\text{OH}]_2$). A constituição da brucita é semelhante à de uma camada octaédrica. Assim, o grupo da clorita é classificado como 2:1:1. Os principais cátions octaédricos são Mg^{2+} e Fe^{2+} . A carga residual, resultante da substituição de Si^{4+} por Al^{3+} , é balanceada pela substituição de Mg^{2+} por Al^{3+} na camada de brucita. A estrutura destes minerais é mais estável que a das esmectitas. As cloritas possuem baixa capacidade de troca catiônica e de absorção de água, sendo assim, minerais pouco expansíveis.

Outra característica condicionante para a alteração de basaltos é a presença de fraturas e microfissuras. Os derrames basálticos são, normalmente, sub-horizontais com poucas deformações estruturais. Todavia, durante o resfriamento da lava podem ser gerados esforços de tração nos minerais e na rocha. Estes esforços vão provocar o surgimento de microfissuras e/ou de fraturas na rocha. Quanto mais rápido for o resfriamento, maiores serão os gradientes térmicos na rocha e, conseqüentemente, maior será o nível de fissuração.

Segundo Schneider e Rocha (1968), do ponto de vista macroscópico, os basaltos podem ser considerados de boa qualidade quando apresentam as seguintes características: cor escura (normalmente preta), fraturas uniformes, arestas e cantos vivos, ausência de vazios e de microfissuras. Ao contrário, as características indicadoras de má qualidade são: cores claras (cinza claro, cinza esverdeado), abundância de vazios, fraturas irregulares, arestas e cantos arredondados e alta produção de pó na britagem.

3.4. Avaliação da alterabilidade de materiais rochosos

A determinação do estado da alteração de uma rocha tem sido usualmente realizada de maneira empírica, através de métodos quantitativos não-padronizados, fornecendo resultados subjetivos e nem sempre corretos. Vários autores têm apresentado procedimentos de ensaios para permitir uma avaliação mais objetiva da alterabilidade das rochas. A Tabela 3.2 apresenta uma revisão dos diversos procedimentos encontrados na literatura.

Segundo Farjallat (1972), uma evolução na análise da quantificação da alterabilidade de rochas é representada pela associação das características dos materiais a índices de qualidade que comparam estas características em diferentes graus de alteração. Minette (1982) sugere uma aplicação deste tipo de análise para quantificar a alterabilidade de um diorito, tendo em vista a avaliação do comportamento geomecânico do material.

Os índices de qualidade são aplicados na quantificação específica de propriedades mensuráveis como resistência, porosidade, desgaste e outras. A aplicação destes índices mostra bons resultados na avaliação da qualidade das rochas, considerando projetos ou objetivos específicos.

A seguir, são apresentados alguns dos índices de qualidade mais utilizados para a avaliação da alterabilidade de rochas. Estes índices foram desenvolvidos para materiais rochosos por diversos pesquisadores com base em análises e ensaios de rotina laboratorial.

Tabela 3.2 - Métodos para avaliação da alteração e alterabilidade de rochas.

Referências	Métodos Sugeridos	Crítérios de avaliação do estado de alteração ou de alterabilidade
Rego e Santos (1938)	Porosidade aparente	Para um mesmo tipo petrográfico: maior porosidade, maior grau de alteração
Pichler (1942)	Petrografia e absorção d'água	Se a petrografia indicar minerais alterados e a absorção for maior que 0,5%, a rocha deve ser rejeitada
Day (1962)	Petrografia (basaltos), ensaio Deval modificado e granulometria dos finos	Teores de minerais alterados e variação da granulometria em relação à amostra original
Hamrol (1962)	Absorção d'água e índice de vazios	Relação entre variação de absorção e do índice de vazios, para o tempo considerado
Weinert (1964 e 1968)	Relação da evapotranspiração do mês de maior pluviosidade com a precipitação anual e petrografia	Índice climático N relacionado com a porcentagem de minerais secundários para qualificar o estado de alteração dos materiais e definir seu uso para sub-base, base e camada betuminosa de rodovias
Farran e Thénoz (1965)	Permeabilidade ao ar e superfície específica	Para permeabilidade > 0,1 m/s, a alterabilidade cresce com o aumento da superfície específica
Iliev (1966)	Velocidade de propagação de ultra-som	Índice que relaciona velocidade de ultra-som da rocha fresca e da rocha alterada
Mendes <i>et al.</i> (1966) e Barros (1969)	Análise petrográfica microscópica modal e ensaios mecânicos	Índice de alteração obtido pela relação entre o teor de minerais sãos e a soma dos teores de minerais alterados e de vazios relacionado com o módulo de deformação ou tensão de ruptura na compressão
Talobre em 1967 (citado em Yoshida, 1972)	Sanidade de amostras em pó e em corpos de prova ao H ₂ SO ₄	Perdas em massa não devem ultrapassar 18% para amostra em pó e 100mg para os corpos de prova
Schneider e Rocha (1968)	Análise petrográfica (basaltos)	Teores em minerais secundários e em argilominerais, expansivos e não-expansivos, permitem avaliar estado de alteração e indicar a necessidade ou não de ensaios adicionais para material em rodovias
Krauskopf (citado em Loughnan, 1969)	Análise química	Índice que relaciona os teores em óxidos alcalino e alcalino terrosos e a soma destes com os de Si, Al e Fe
Struillou (1969)	Imersão de fragmentos de rocha de 10-20mm em H ₂ O ₂ / 110 vol.	Comparação da porcentagem de material passante na malha de abertura 8mm com aquela apresentada por material de desempenho conhecido
HRB (1970)	Ensaio de abrasão modificado conjugado à compactação	Comparação entre granulometria, limites de Atterberg e equivalente de areia para material ensaiado e o material original
Farjallat (1971)	Ensaio de alteração por lixiviação em extrator Soxhlet associado a ensaio de abrasão <i>Los Angeles</i>	Índice de alterabilidade definido pela relação entre porcentagem de material desagregado no ensaio de alteração, com a porcentagem de perdas por abrasão.
Rocha (1971)	Lixiviação contínua em extrator Soxhlet em amostras moídas	Perdas de massa para tempos preestabelecidos de alteração no laboratório
Scott (citado em Farjallat 1971)	Análise petrográfica (basaltos)	Teor em minerais secundários superir a 20% sugere que a rocha não deve ser especifica para uso na construção civil
Yoshida (1972)	Ensaio de impacto Treton associado a diferentes ensaios de alteração no laboratório	Índices de alteração obtidos pela comparação entre os resultados dos ensaios de impacto da rocha alterada e da sã
Wylde (1980,1982)	Determinação de um fator de textura a nível petrográfico	Avaliação da desagregação de basaltos usados como base de pavimentos através da observação das ligações entre partículas
Ladeira e Minette (1984)	Ensaio de resistência e de deformabilidade	Índices de alteração obtidos pela comparação entre os resultados dos ensaios mecânicos da rocha alterada e da sã

3.4.1. Índices Geoquímicos

Na alteração geoquímica, o processo se inicia devido às transformações químicas que ocorrem nos minerais, provocadas pela exposição da rocha ao meio ambiente. As características típicas deste tipo de alteração manifestam-se na textura e na estrutura da rocha. Ressalta-se que o produto da alteração geoquímica são os solos residuais. Os índices geoquímicos são baseados na comparação entre a composição química da rocha nos vários estágios de alteração e em seu estado inicial. A Tabela 3.3 apresenta algumas das proposições de índices geoquímicos. A utilização destes índices de alteração é limitada pela falta de dados disponíveis em literatura.

3.4.2. Índices petrográficos

A análise petrográfica da alteração das rochas pode ser feita macroscopicamente e microscopicamente. A primeira é baseada em informações visuais da rocha e, deste modo, não deve ser considerada como indicador quantitativo da alteração da rocha. A partir de uma análise microscópica, pode-se quantificar os minerais sãos e alterados da rocha, avaliar o estado das microfissuras e quantificar o teor de minerais secundários.

Após o estudo pioneiro de Lord (1916), vários trabalhos apresentaram grande quantidade de índices de qualidade baseados em informações petrográficas. A Tabela 3.4 mostra um resumo dos itens considerados relevantes.

Estes índices buscam, de modo geral, representar a alterabilidade do material em função da presença de minerais secundários, microfissuras e vazios na rocha. Eventualmente, estes fatores são os que mais influenciam no processo de alteração que a rocha pode sofrer. No entanto, o comportamento do material rochoso, em especial o geomecânico, é definido também por outras características da rocha, petrográficas ou não. Assim, a utilização de correlações entre índices petrográficos e o comportamento geomecânico de materiais rochosos é usualmente limitada aos casos estudados.

Outra limitação da aplicação deste índices é a dificuldade de representatividade das lâminas petrográficas.

Tabela 3.3 - Índices geoquímicos para avaliação da alterabilidade rochas.

Referência	Princípio básico	Índice de qualidade
Reiche (1945)	Comprovação experimental da perda de minerais da rocha. A primeira equação representa o índice de alteração potencial da rocha	$I = \frac{\text{moles } (CaO + Na_2O + MgO + K_2O - H_2O)}{\text{moles } \left(\begin{array}{l} SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + Cr_2O_3 \\ + CaO + Na_2O + MgO + k_2O - H_2O \end{array} \right)} \times 100\%$ $I = \frac{SiO_2}{SiO_2 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + M_2O_3} \times 100\%$
Barth (1948)	Diferença na quantidade de íons entre as células padrões da rocha intacta e da alterada. A célula padrão é aquela que possui 160 íons de oxigênio	$I = (\text{número de íons da célula padrão da rocha intacta}) - (\text{número de íons da célula padrão da rocha alterada})$
Barth (1948) associado a teoria de Keller (1968)	Considera que a quantidade de alumínio permanece inalterada durante a alteração.	$I = (\text{número de íons da célula padrão da rocha intacta}) - (\text{número de íons da célula padrão da rocha alterada considerando Al constante})$
Short (1961)	Relação entre os índices potenciais de alteração da rocha alterada e a intacta, propostos por Reiche (1950)	$I = \frac{\text{índice potencial de alteração da rocha alterada}}{\text{índice potencial de alteração da rocha intacta}}$
Ruxton (1968)	Perda de sílica e de cátions solúveis e adição de H ₂ O com peso constante de alumínio	$I = \frac{\text{moles de } SiO_2}{\text{moles de } Al_2O_3}$
Ruxton (1968) e Barros (1979, 1971)	Relação entre a quantidade de diferentes elementos	$I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$ <p style="text-align: center;">ou</p> $I = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3 + FeO}$
Parker (1970)	Mobilização dos álcalis em função da sua força de ligação com o oxigênio	$I = \left(\frac{Na}{Na-O} + \frac{K}{K-O} + \frac{Mg}{Mg-O} + \frac{Ca}{Ca-O} \right) \times 100\%$ <p>O numerador de cada parcela da soma é a porcentagem molecular do elemento dividido pelo peso atômico do respectivo elemento. O denominador é a força de ligação do álcali ao oxigênio.</p>
Barros (1971, 1979)	Oxidação do Fe ⁺² e do Fe ⁺³	$I = \frac{2 Fe_2O_3}{2 Fe_2O_3 + FeO}$

Tabela 3.4 - Índices petrográficos para avaliação da alterabilidade de rochas.

Referência	Variáveis	Índice de qualidade
Mendes <i>et al.</i> (1966)	K : índice de qualidade micropetrográfico; n : valores de X_i minerais são; m : valores de Y_j minerais alterados; P_i e P_j : coeficientes (pesos) que avaliam os efeitos da mineralogia e das fissuras nas propriedades mecânicas da rocha.	$K = \frac{\sum_{i=1}^n P_i X_i}{\sum_{j=1}^m P_j Y_j}$
Irfan e Deamam (1978)	I_P : índice de qualidade A : porcentagem de minerais primários; B : porcentagem de minerais secundários + porcentagem de vazios + porcentagem de fissuras.	$I_P = \frac{A}{B}$
Cole e Sandy (1980)	R_{sm} : índice de minerais secundários P : porcentagem de minerais secundários; M : estabilidade dos minerais secundários; TR : textura.	$R_{sm} = \sum [P, M] TR$
CRB (1982)	SMC : índice minerais secundários; S : teor de minerais secundários, de vazios e de microfissuras; M : teor de minerais (primários e secundários).	$SMC = \frac{S}{M} \times 100$
Wylde (1980, 1982)	TF : fator de textura; N : número total de pontos observados; N_i : número de pontos com classificação de finos igual a i . A escala de classificação de finos varia de 1 para fortemente ligados e 5 para fracamente ligados.	$TF = \frac{N_1 + 2N_2 + 3N_3 + 4N_4 + 5N_5}{N}$

3.4.3. Índices físicos

Durante o desenvolvimento da alteração da rocha, os principais efeitos observados nas características físicas do material são:

- perda de material por dissolução ou erosão interna;
- aumento da porosidade da rocha e o posterior aumento da absorção. Deve-se destacar que, a porosidade é modificada somente na região do fragmento rochoso que é permeável, ou seja, na região da rocha acessível à água;
- expansão associada à absorção de água;
- decréscimo no peso específico aparente;
- aumento do grau de fissuração e, conseqüentemente, aumento da permeabilidade.

Desta forma, as características físicas dos materiais rochosos que são mais empregadas na avaliação da alterabilidade são: capacidade de absorção de água, porosidade, peso

específico aparente, expansibilidade e permeabilidade. Estas características são associadas, ainda, à perda de material da rocha.

A variação destas características depende do meio onde se encontra o material rochoso e do estado de alteração inicial do mesmo. Algumas características podem evoluir mais que outras, e, deste modo, deve-se fazer uma escolha criteriosa sobre a característica da rocha capaz de representar a alterabilidade do material. Os critérios apresentados neste trabalho são relativos à utilização de rocha para enrocamento.

O primeiro índice físico de qualidade a ser utilizado para quantificação da alterabilidade foi a absorção (Hamrol, 1962). Outros pesquisadores (Minty e Monk, 1966; Smith *et al.*, 1970 e Baynes *et al.*, 1978) sugerem o peso específico e a absorção de água como indicadores da alterabilidade dos materiais rochosos. Nascimento (1970) apresenta correlações entre a expansão de corpos de prova e o tempo de alteração natural. Farjallat (1973) mostra a relação entre a redução do peso das amostras ensaiadas e o tempo de alteração induzida no laboratório. Além da absorção d'água, Ladeira e Minette (1984) utilizam as variações do peso específico aparente e da porosidade aparente para a quantificação da alterabilidade.

De maneira geral, os índices físicos de qualidade fazem uma comparação entre uma determinada característica física do material no estado inicial de utilização (intacto) e a mesma característica no estado alterado. Desta forma, estabelece-se uma equação geral que representa o índice físico de alteração I do material, expressa da seguinte forma:

$$I = \frac{|x_o - x|}{y} \times 100 \% \quad (3.1)$$

onde x_o e x são as características físicas do material no estado intacto e alterado, respectivamente. A variável y assume o valor x_o ou x quando a característica física analisada diminui ou aumenta, respectivamente, devido à alteração da rocha. Assim, o valor de I varia de zero, para o material intacto, até um valor máximo, sempre menor que 100%, para o material mais alterado.

A facilidade de determinação das características físicas e a sensibilidade destas características à alteração dos materiais rochosos permitem que os índices de qualidade

baseados nas características físicas constituam boa ferramenta para avaliação da alterabilidade destes materiais.

3.4.4. Índice de propagação de ondas

A velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas é função das características do meio. Nos materiais rochosos, algumas destas características, como por exemplo, o tipo de minerais, o grau de fraturamento, a permeabilidade e a porosidade, são modificadas pelos processos de alteração. Deste modo, a velocidade de propagação de ondas pode ser um bom indicador da alteração da rochas devido a processos físicos e/ou químicos, destacando os físicos. Os processos físicos geram descontinuidades na rocha o que influencia diretamente na velocidade de propagação de ondas.

A determinação do índice de qualidade relativo à propagação de ondas pode ser feita através da Equação 3.1 (Iliev, 1966). Nesta equação, x_o é o valor da velocidade de propagação na rocha intacta, x é o valor da velocidade da rocha alterada e y assume o valor de x_o (considerando que a velocidade de propagação diminui com a alteração). Outros trabalhos mostram aplicações deste índice de qualidade, através de correlações entre a velocidade da onda com parâmetros de amostras de rochas e diferentes graus de alteração (Rodrigues, 1972 e 1978; Tourenq e Archambaut, 1974; Tourenq e Formaintreaux, 1974).

3.4.5. Índices granulométricos

Em várias obras de engenharia, o material rochoso é utilizado sob forma de fragmentos, como por exemplo, os enrocamentos e agregados. Nestes casos, o processo de alteração pode provocar a desagregação da rocha e, desta forma, as partículas sofrem gradativa redução das dimensões. Assim, na avaliação da alterabilidade, pode-se utilizar o acompanhamento da granulometria do material com o tempo de alteração.

A Tabela 3.5 apresenta algumas das proposições para avaliação da alterabilidade de materiais rochosos fragmentados, baseadas no granulometria do material intacto e do material alterado.

Estes índices de qualidade constituem bom meio de avaliação de possíveis problemas, decorrentes da desagregação de materiais rochosos sob forma de fragmentos.

Tabela 3.5 - Índices granulométricos para avaliação da alterabilidade de rochas.

Referência	Variáveis	Índice de qualidade
Buzatti (1975, 1987)	I_D : índice de degradação; D : afastamento entre as curvas granulométricas do material intacto e do material alterado, para a peneira i ; N : quantidade de peneiras consideradas;	$I_D = \frac{\sum \Delta_i}{N}$
Ladeira e Minette (1984) e Farjallat (1971)	I_{PM} : índice de qualidade de perda de massa; PM : perda de massa ocorrida em ensaios de desgaste (p.ex., abrasão <i>Los Angeles</i> , alteração no laboratório, etc); PM_w : perda de massa do material intacto; PM_o : perda de massa do material alterado ; M_i : massa seca antes do ensaio de caracterização; M_f : massa seca depois do ensaio de caracterização.	$I_{PM} = \frac{PM_w - PM_o}{PM_w}$ onde $PM = \frac{M_i - M_f}{M_i}$
Frazão (1993)	IMF : índice de qualidade granulométrico; MF : módulo de finura; Série normal de peneiras: correspondente às aberturas de 38; 19; 9,5; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15mm. MF_o : módulo de finura do material intacto; MF_w : módulo de finura do material alterado.	$IMF = \frac{MF_o - MF_w}{MF_o}$ onde $MF = \frac{\sum \left(\begin{array}{l} \% \text{ de material acumulado na} \\ \text{série normal de peneiras} \end{array} \right)}{100}$

3.4.6. Índices geomecânicos

As características geomecânicas de materiais rochosos constituem relevantes condicionantes de projetos de engenharia civil. Espera-se que tais características sejam afetadas pelas transformações mineralógicas e estruturais, provocadas pela alteração da rocha. A avaliação destes efeitos pode ser realizada através de índices de qualidade geomecânicos, nos quais são comparadas as propriedades mecânicas dos materiais nos estados inicial intacto e alterado. A expressão e as considerações para determinação deste índice de qualidade são as mesmas utilizadas para as características físicas da rocha (Equação 3.1).

A literatura indica algumas correlações entre o estado de alteração do material e algumas propriedades geomecânicas dos materiais rochosos (Hamrol, 1962; Sirieys, 1966; Iliev, 1966; Mendes *et al.*, 1969; Kossev, 1970; Smorodinov *et al.*, 1970; Rodrigues, 1972 e 1975; Farjallat *et al.*, 1974). Tendo em vista as características inerentes à rocha, estas correlações diferem conforme o autor.

Segundo Rodrigues (1975), espera-se que a fissuração, provocada pela alteração, afete mais a resistência mecânica do que a deformabilidade dos materiais rochosos. O autor sugere que, em determinados processos de alteração, a resistência à ruptura da rocha seja o parâmetro mais indicado como índice de qualidade do material.

Minette (1982) apresenta alguns índices de qualidade baseados na resistência à compressão uniaxial e no módulo de deformabilidade obtidos a partir de ensaios em testemunhos da rocha intacta, alterada no laboratório e alterada naturalmente. O autor destaca que as correlações entre as características geomecânicas e físicas da rocha podem ser utilizadas como indicadores da alterabilidade da rocha. A variação esquemática de tais correlações é ilustrada na Figura 3.5, obtida a partir de vários resultados experimentais encontrados na literatura. Segundo Deer e Miller (1966), a intersecção das curvas ocorre para valores da relação E/q_u menores que 200, onde E é o módulo de deformação e q_u é a resistência à compressão uniaxial da rocha.

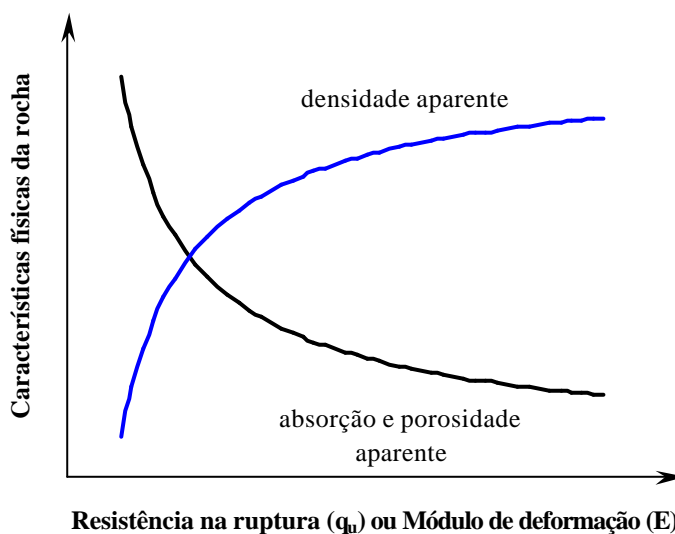


Figura 3.5 - Relação esquemática entre as características físicas e geomecânicas (Minette, 1982).

3.4.7. Outros índices

Existem outros tipos de ensaios para a caracterização dos materiais rochosos cujos resultados podem servir como indicadores da alterabilidade do material. Dentre estes, citam-se: a abrasão *Los Angeles* (Farjallat, 1973), microdureza Vickers (Barros, 1977; Tourenq e Archambauet, 1974), impacto Treton (Farjallat *et al.*, 1974), ensaios de sanidade a sulfatos de

sódio e magnésio (Minette, 1982), ataque pelo etilino-glicol e água oxigenada (Minette, 1982), *slake durability* (ISRM, 1981).

Weinert (1964, 1968) relaciona o comportamento de agregados utilizados em pavimentação com o clima da região (África do Sul) e o com conteúdo de minerais secundários da rocha (Figura 3.6). Este trabalho é um dos poucos que avaliam quantitativamente a alterabilidade em função de fatores climáticos. Para tal, o autor define um fator climático N , função do potencial de evaporação E_j , relativo ao mês mais quente do ano, e da precipitação anual P_a , expressa por:

$$N = \frac{12 E_j}{P_a} \quad (3.2)$$

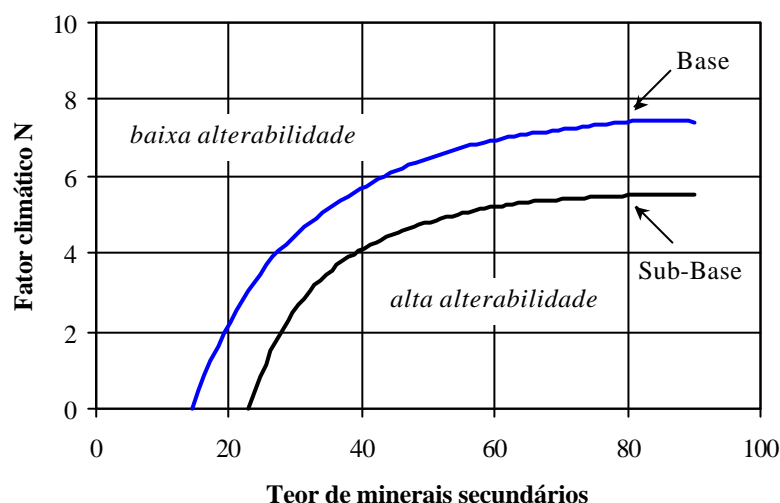


Figura 3.6 - Alterabilidade de dolorito da África do Sul em função do fator climático N e do teor de minerais secundários (Weinert, 1964 e 1968).

Merecem consideração, ainda, as análises conjuntas, nas quais são utilizadas mais de uma das características do material, na mesma expressão do índice de qualidade. A Tabela 3.6 apresenta tais proposições, onde se verifica que alguns métodos não consideram o material alterado para determinação do índice de qualidade (Smith *et al.*, 1970; Fookes *et al.*, 1988). Em tais casos, avalia-se a alterabilidade do material através de limites de variação do índice, definidos a partir de observações da alteração dos materiais rochosos no campo. Esta forma de análise da alterabilidade restringe-se aos materiais e às regiões correspondentes aos casos de obra utilizados para definição dos limites de variação.

Tabela 3.6 - Métodos de avaliação conjunta do índice de alteração de rochas.

Referência	Variáveis	Índice de qualidade
Smith <i>et al.</i> (1970)	<i>DAP</i> : índice de qualidade de absorção; <i>I</i> : índice resultante do ensaio de abrasão em amostras úmidas.	$DAR = \frac{I}{1 + \left(\frac{\text{porcentagem de absorção de água}}{\text{de água}} \right)}$
Farjallat (1971)	<i>K_D</i> : índice de qualidade; <i>F</i> : somatório da porcentagem de material perdido da amostra intacta, após ensaio (p.ex., abrasão, compressão unidimensional, etc.); <i>I</i> : somatório da porcentagem de material perdido após a alteração e o ensaio (mesmo da amostra intacta) da amostra alterada.	$K_{\Delta t} = 1 - \frac{200 - F}{200 - I}$
Adaptado de Yoshida (1972)	<i>R_f</i> : índice de qualidade da resistência; <i>P</i> : porcentagem de perda devido a alteração do material rochoso; <i>R_i</i> : resistência mecânica do material intacto; <i>R_f</i> : resistência mecânica do material alterado.	$R_f = \frac{(100 - P)\Delta R}{100}$ onde $\Delta R = \frac{R_i - R_f}{R_i}$
Fookes <i>et al.</i> (1988)	<i>RDI_s</i> : índice de qualidade aplicado ao caso de solicitações estáticas do material rochoso; <i>I_{s(50)*}</i> : média do índice de carregamento pontual entre amostras secas e úmidas, para <i>d</i> =50mm; <i>D</i> : diâmetro dos corpos de prova; <i>SST</i> : sanidade ao sulfato de magnésio (Hosking e Tubey, 1969); <i>WA</i> : absorção de água; <i>SG_{ssd}</i> : peso específico saturado com superfície seca.	$RDI_s = \frac{I_s(50)^* - 0,1(SST + 5WA)}{SG_{ssd}}$ para o caso de rochas doloríticas: $RDI_s = \frac{I_s(50)^* - 0,1(14,79WA + 3,49)}{SG_{ssd}}$ para o caso de rochas graníticas: $RDI_s = \frac{I_s(50)^* - 0,1(10,23WA - 0,7)}{SG_{ssd}}$
Fookes <i>et al.</i> (1988)	<i>RDI_d</i> : índice de qualidade aplicado ao caso de solicitações dinâmicas do material rochoso; <i>M.AIV</i> : índice de impacto modificado (Hosking e Tubey, 1969); <i>WA</i> é <i>SG_{ssd}</i> são as mesmas variáveis referidas anteriormente.	$RDI_s = \frac{0,1(M.AIV + 5WA)}{SG_{ssd}}$
Urmeneta (1997)	<i>I_c</i> : índice de conservação; <i>DA</i> : densidade aparente (g/cm ³); <i>PA</i> : porosidade (%); <i>MD</i> : deformação na compressão uniaxial (Kg/cm ²); <i>DC</i> : resistência na compressão uniaxial (Kg/cm ²); <i>RT</i> : resistência à tração (Kg/cm ²); <i>RD</i> : desgaste por fricção (UNE, 1985) (mm).	$I_c = \frac{V_{DA} + V_{PA} + V_{MD} + V_{RC} + V_{RT} + V_{RD}}{6};$ $V_{DA} = \frac{1000}{6}(DA - 2); \quad V_{PA} = \frac{25}{6}(8 - PA) + 100$ $V_{MD} = \frac{1}{3500}(MD - 100000); \quad V_{RC} = \frac{1}{10}(DC - 100)$ $V_{RT} = \frac{100}{85}(RT - 15); \quad V_{RD} = \frac{25}{2}(2 - RD) + 100$

As análises conjuntas são de grande aplicação na engenharia civil pois são, normalmente, baseadas em características dos materiais de fácil determinação. Além disso, em nível regional, estes índices avaliam satisfatoriamente os processos de alteração.

3.5. Método de avaliação da alterabilidade de enrocamentos

Para a avaliação da alterabilidade de enrocamentos deve-se considerar a alteração no enrocamento com um meio granular (conjunto de partículas) e a alteração nas partículas rochosas de forma individual. Deve-se considerar ainda a caracterização da alteração na rocha constituinte.

Na avaliação da alterabilidade deve-se enfatizar os seguintes aspectos:

- os processos de alteração característicos do material rochoso utilizado como enrocamento;
- a metodologia adotada para determinação dos parâmetros da rocha constituinte, das partículas individuais e do enrocamento como meio granular;
- a representatividade das amostras na condição intacta (estado inicial de alteração) e na condição de alteração no campo (amostra alterada naturalmente);
- os ensaios de alteração acelerada no laboratório para simulação da alteração natural do enrocamento no campo;
- os ensaios para determinação dos parâmetros da rocha constituinte, das partículas individuais e do enrocamento como meio granular;
- a correlação dos parâmetros com o tempo de alteração natural, para a previsão do potencial de dano causado pela alteração (previsão a longo prazo).

3.5.1. Processos de alteração em enrocamentos

Na avaliação da alterabilidade de enrocamentos é fundamental a identificação das características destes materiais que influenciam na sua alteração. Isto permitirá identificar os processos de alteração da rocha que interferem no comportamento do enrocamento. No campo, a identificação dos processos de alteração é feita, normalmente, através do acompanhamento visual da evolução da alteração do material.

Em enrocamentos, espera-se a ocorrência de dois processos básicos de alteração: a desagregação, provocada pelas variações de umidade e temperatura da rocha e a

decomposição, ocasionada pelas reações físico-químicas dos minerais constituintes da rocha. A intensidade com que estes processos de alteração atuam no enrocamento é função, basicamente, do tipo da rocha e das condições atmosféricas.

3.5.2. Metodologia para avaliação da alterabilidade de enrocamentos

Do ponto de vista de alterabilidade, o comportamento de materiais rochosos pode ser avaliado através de procedimentos no laboratório baseados em metodologias encontradas na literatura como, por exemplo, as apresentadas por Frazão (1993) e CIRIA (1991). Todavia, tais metodologias são sugeridas na forma mais geral de utilização dos materiais e portanto, de difícil aplicação em alguns casos particulares.

A Figura 3.7 apresenta uma metodologia simplificada para a avaliação da alterabilidade de materiais de enrocamento (Maia *et al.*, 2000). Nesta metodologia destacam-se quatro fases, que devem ser executadas na seguinte ordem:

- obtenção do material de estudo (amostragem);
- produção de amostras de enrocamento com alteração induzida de forma acelerada, no laboratório;
- obtenção dos parâmetros que caracterizam o comportamento destes materiais;
- análise dos resultados para previsão do comportamento do material a longo prazo.

3.5.3. Amostragem

A amostragem é uma das fases mais importantes no estudo da alterabilidade dos materiais rochosos. Inicialmente, os tipos petrográficos são escolhidos visualmente, de modo a serem representativos da obra como um todo. Posteriormente, consideram-se as informações obtidas em análises micropetrográficas (microscopia ótica, microscopia eletrônica, difração de raios X, análise térmica diferencial, análise térmica gravimétrica e análises químicas). Nestas análises identificam-se, sobretudo, os tipos de minerais, o grau de alteração dos minerais, a composição química da rocha, a estrutura (fissuração, textura, etc.) e o teor de minerais secundários.

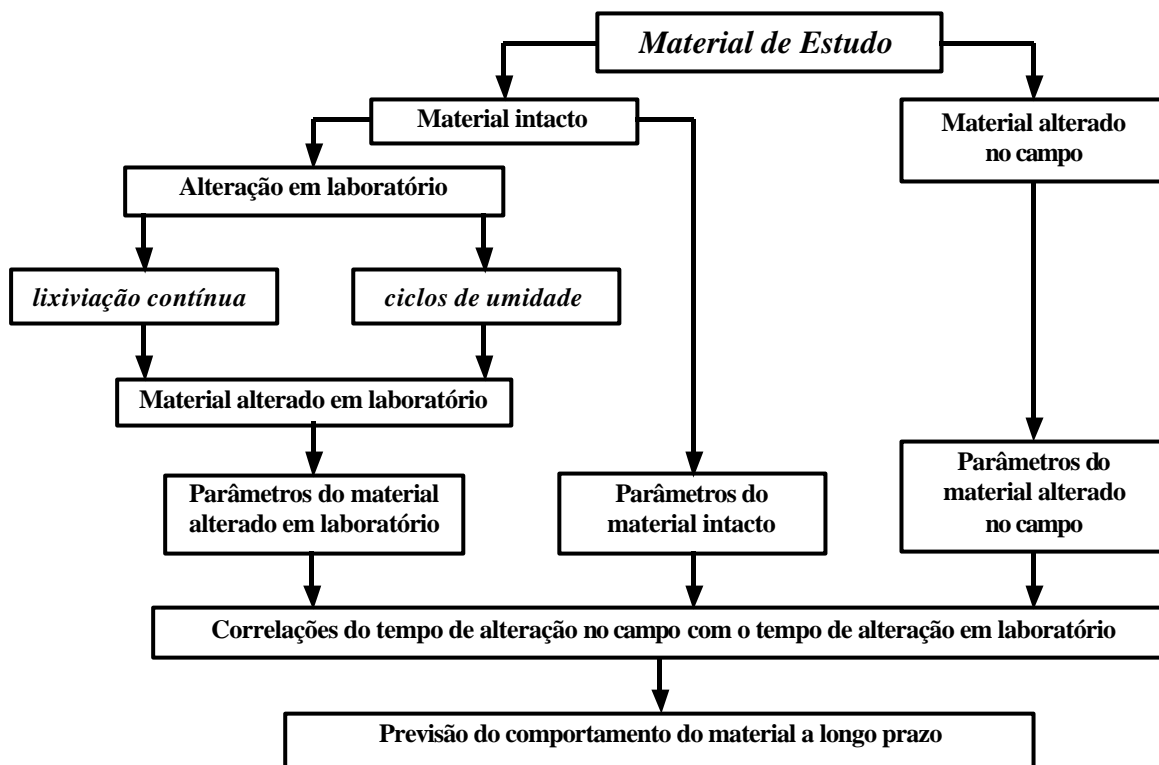


Figura 3.7 - Metodologia para avaliação da alterabilidade de enrocamentos.

A avaliação da alterabilidade de enrocamentos envolve amostras do material intacto, usado na fase de construção, e deste mesmo material, alterado naturalmente no campo. Sob este ponto de vista, consideram-se duas classes de estudos da alterabilidade de enrocamentos: um, relativo a obras recentes ou em andamento e outro, relativo a obras antigas. No primeiro caso, existe a disponibilidade do material intacto, mas não do material alterado naturalmente. Em tal caso, pode-se produzir amostras com alteração natural, através da exposição do material aos agentes atmosféricos. Todavia, o tempo necessário para produção de amostras representativas da alteração natural pode inviabilizar a análise. No segundo caso, existe a disponibilidade do material alterado naturalmente mas, normalmente, não se dispõe do material intacto usado na fase de construção. Assim, deve-se procurar um material intacto semelhante ao utilizado na fase de construção da obra.

Os procedimentos de amostragem devem permitir a obtenção de corpos de prova do enrocamento e da rocha propriamente dita, ou seja, na forma de blocos e de testemunhos, respectivamente.

3.5.4. Simulação acelerada da alteração no laboratório

A avaliação da alterabilidade de enrocamentos é feita através da comparação dos resultados de ensaios em amostras do material no estado intacto e no estado alterado. Na avaliação do estado atual de alteração de um enrocamento, é suficiente a comparação dos resultados do material intacto com o material alterado naturalmente, encontrado no campo. Na previsão do comportamento a longo prazo, contudo, faz-se necessária a extrapolação de resultados experimentais, obtidos a partir de ensaios em amostras com alteração induzida de forma acelerada, no laboratório.

Existem vários procedimentos para a indução de alteração no laboratório em materiais rochosos (Hypolito e Valarelli, 1972; Minette, 1982; Frazão, 1993). Nos enrocamentos, os ensaios mais representativos das condições de alteração natural são, provavelmente, os ensaios de ciclos de umidade e de lixiviação contínua.

3.5.4.1 Ensaios de ciclos de umidade (ciclagem)

Estes ensaios tentam reproduzir, no laboratório, a alteração do material provocada pelas variações da umidade e da temperatura da rocha no campo. As condições de alteração no laboratório não são as mesmas que as condições no campo. No entanto, os resultados indicados na literatura mostram que o ensaio pode ser representativo das condições de alteração no campo (Minette, 1982). O ensaio de ciclagem mais comum é o de umedecimento em água natural ou destilada seguido de secagem ao ar ou em estufa. O tempo necessário para o umedecimento e para a secagem do material depende do tipo da rocha, podendo ser previamente definido através das curvas de variação de umidade com o tempo, obtidas a partir de ensaios de absorção e de secagem (Frazão, 1993). As curvas possibilitam a definição dos tempos mínimos de umedecimento e de secagem que melhor representem os estados saturado e seco do material.

3.5.4.2 Ensaios de lixiviação contínua

Os ensaios de lixiviação contínua são, provavelmente, os que melhor representam as condições de alteração de enrocamentos. O equipamento mais utilizado para ensaios de

lixiviação contínua é o extrator soxhlet. O equipamento soxhlet permite submeter amostras de rocha de pequenos volumes a períodos controlados de variação de temperatura, de precipitação e de flutuação do nível da solução de lixiviação.

O equipamento convencional é constituído por manta aquecedora, balão, tubo extrator e tubo condensador (Figura 3.8). Dentro do balão coloca-se a solução de lixiviação, que pode ser monitorada e, se necessário, trocada durante o ensaio. A manta aquece a solução e produz vapor que é conduzido ao topo do tubo extrator através do tubo condutor de vapor. O vapor é condensado no tubo condensador, localizado no topo do tubo extrator.

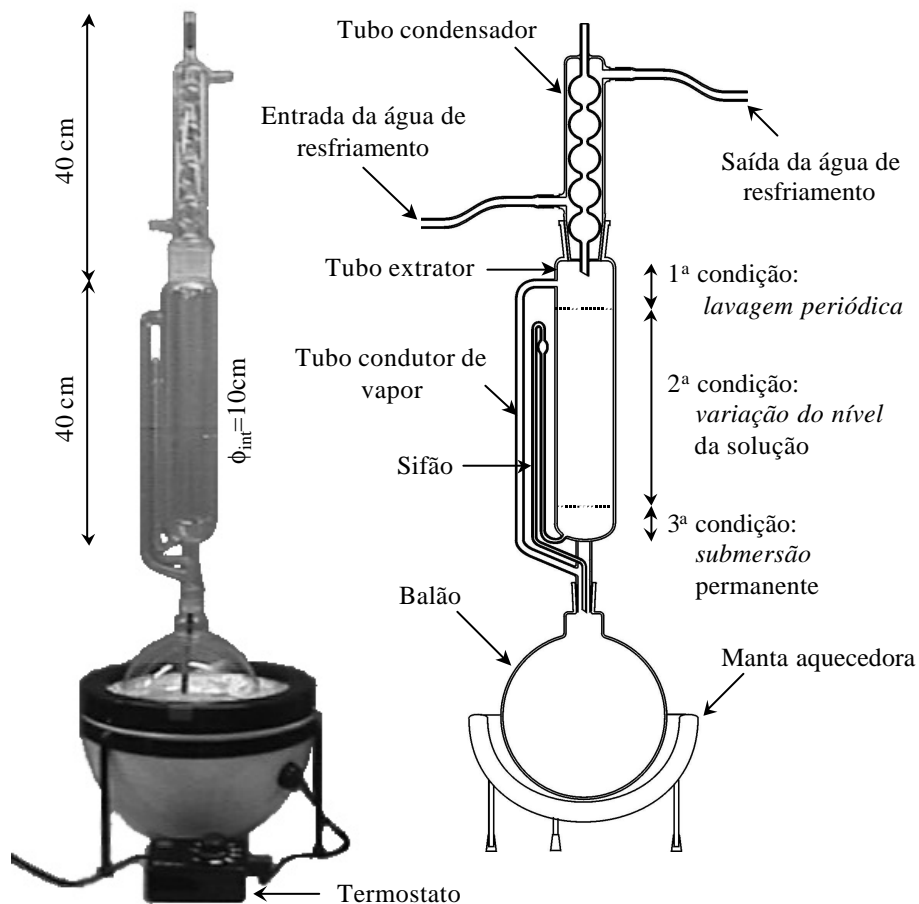


Figura 3.8 - Equipamento soxhlet convencional para ensaios de lixiviação contínua.

No tubo extrator, a amostra é submetida a três diferentes condições de alteração. Na primeira, o material é submetido a variações de temperatura, enquanto é lavado

continuamente pela solução condensada. Esta condição ocorre no trecho superior do tubo extrator. A solução que passa pelo primeiro trecho é acumulada no fundo do tubo extrator. Quando o nível da solução no tubo extrator atinge determinado ponto, ocorre o rebaixamento da solução de lixiviação através do sifão. A solução sifonada retorna para o balão. O tempo entre os períodos de rebaixamento é controlado pela temperatura da manta ajustada pelo termostato. O nível final da solução após o rebaixamento é controlado pela quantidade de solução no equipamento ou pela posição da saída do sifão do tubo extrator.

A segunda condição de alteração corresponde a variações do nível da solução de lixiviação, que ocorrem no trecho central do tubo extrator. A terceira condição é de submersão permanente e ocorre no trecho inferior do tubo extrator.

A variação de temperatura imposta à amostra e correspondente às três condições de alteração são semelhantes. A temperatura média durante os ensaios é da ordem de 80°C.

O material permanentemente submerso (terceira condição) sofre níveis de alteração inferiores aos do material nas duas primeiras condições (Minette, 1982). Assim, a fim de obter uma maior eficiência, os equipamentos soxhlet convencionais são geralmente ajustados, para que não ocorra submersão permanente.

3.5.5. Parâmetros para a caracterização do material

Em geral, os materiais de construção rochosos são selecionados para determinado uso através de suas características intrínsecas e das solicitações no campo. No caso de enrocamentos, existem vários ensaios no laboratório através dos quais obtém-se tais características (Tabela 2.5). Existe ainda a possibilidade da utilização das características dos materiais obtidas por retroanálise de instrumentações no campo (Rosi, 1983; Saboya Jr., 1993; Araruna, 1991; Castro, 1996 e Frahia, 1996).

Os ensaios físicos, geoquímicos e petrográficos (Tabela 2.5) são fundamentais na avaliação da alterabilidade das características intrínsecas dos materiais, os quais são essenciais na avaliação da alterabilidade de enrocamentos. Todavia, a escolha de ensaios mais específicos, como os mecânicos e os de desgaste, depende fundamentalmente do tipo de uso a que o material é destinado. Sob tal ponto de vista, divide-se os enrocamentos em duas classes de utilização: os destinados à proteção (rip-rap, quebra-mares, etc.) e os destinados ao suporte de estruturas (aterros de enrocamento, barragens, etc.). No primeiro caso, os ensaios mais

indicados são os que simulam as condições de desgaste e modificação da granulometria; no segundo caso, os ensaios mecânicos são mais representativos.

3.5.6. Previsão a longo prazo

Na previsão do comportamento a longo prazo de materiais rochosos sujeitos à alteração natural, deve-se, inicialmente, simular esta alteração no laboratório. Tal simulação deve ser acelerada permitindo o estudo em tempo viável. Deve, também, simular os mesmos mecanismos de alteração que o material sofre no campo. Na previsão, determina-se o tempo de alteração acelerada, no qual a amostra alterada no laboratório tem o mesmo comportamento da amostra alterada naturalmente no campo. Assim, conhecida a relação entre o tempo de alteração no laboratório e o tempo de alteração natural, pode-se prever, por extrapolação ou interpolação, o tempo necessário de alteração no laboratório para um tempo de alteração natural desejado. Vale lembrar que, o comportamento do material pode ser definido por vários parâmetros, obtidos a partir de diferentes ensaios. Deste modo, espera-se que, para cada parâmetro exista uma relação diferente entre o tempo de alteração natural e o tempo de alteração acelerada no laboratório (Minette, 1982).

3.6. Considerações finais

Neste capítulo foram apresentados aspectos sobre a alteração de materiais rochosos com ênfase na avaliação da alteração de enrocamentos, em especial nos de basalto.

Considerando que a alteração da rocha, após sua exposição ao meio ambiente pode ser relativamente rápida (meses a anos), a alteração dos materiais rochosos constitui um aspecto relevante em projetos e em obras existentes. Os efeitos da alteração de tais materiais dependem da rocha e da sua aplicação. Assim, qualquer estudo de avaliação da alterabilidade deve se basear em metodologias específicas para o problema.

Nos enrocamentos, o principal mecanismo de alteração está relacionado a processos físicos. No entanto, ressalta-se que a alteração química superficial, principalmente nos vértices e arestas das partículas, diminui a resistência nos contatos entre partículas do enrocamento. Particularmente nos enrocamentos de basalto, os efeitos mais importante de tais processos talvez sejam a propagação e a perda de aderência das fissuras, provocando o aumento do fraturamento das partículas. Assim, espera-se que a alteração provoque a perda de resistência e o aumento da deformabilidade do enrocamento. Tais efeitos são condicionados

principalmente pela presença de fissuras e de argilominerais expansivos na rocha basáltica. Estas características são função do tipo de derrame basáltico e a forma com que atuam nos processos de alteração depende das características do meio, além do tempo de exposição. Assim, o estudo da alteração dos basaltos aplicados como enrocamento é restrito a cada caso considerado.

Existem vários procedimentos para a avaliação da alterabilidade da rocha. No entanto, estes procedimentos são em geral aplicados aos casos particulares estudados, tendo em vista a grande quantidade de variáveis envolvidas no processo de alteração da rocha (tipo da rocha, resistência da rocha, fatores climáticos, forças externas, tempo, etc.).

A determinação da alterabilidade de enrocamentos é melhor representada pelos resultados de ensaios mecânicos, como por exemplo, compressão unidimensional, compressão triaxial e cisalhamento direto. Outros ensaios, tais como, compressão axial, compressão diametral, ensaios de desgaste, ensaios de fraturamento das partículas, ensaios de carregamento pontual, utilizados na caracterização da rocha e das partículas, também, podem ser bons indicadores da alterabilidade de enrocamentos, porém, de forma indireta.

O objetivo final do estudo da alterabilidade é a avaliação das condições de utilização do material a longo prazo. Para tanto, é fundamental a simulação da alteração do material no laboratório. Tal simulação deve ser rápida e reproduzir, da melhor forma, as condições de alteração no campo. Nos enrocamentos, a lixiviação contínua é provavelmente o ensaio de alteração no laboratório mais eficiente.