

DETERIORAÇÃO DE ROCHAS GRANÍTICAS EM EDIFICAÇÕES E MONUMENTOS – INVESTIGAÇÃO POR ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA

*DETERIORATION OF GRANITIC STONES IN BUILDINGS AND
MONUMENTS – INVESTIGATION BY ACCELERATED WEATHERING TESTS*

MARIA HELOISA BARROS DE OLIVEIRA FRASCÁ
*MHB Serviços Geológicos, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: mheloisa2@yahoo.com.br*

JORGE KAZUO YAMAMOTO
*Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: jkyamamo@usp.br*

RESUMO ABSTRACT

Os materiais rochosos usados na construção civil tendem a se alterar, naturalmente, com o tempo; porém este processo pode ser acelerado quando expostos a condições climáticas agressivas e ambientes poluídos, ou pela utilização de procedimentos construtivos ou de manutenção inadequados.

Dado que os processos de deterioração, ao se instalarem, são praticamente irreversíveis, é de fundamental importância o conhecimento antecipado das possíveis degradações em situações de uso; para o que se recorre aos ensaios de alteração acelerada, também chamados de intemperismo artificial ou de envelhecimento.

Os ensaios de alteração aqui apresentados foram experimentalmente conduzidos em rochas graníticas (material rochoso mais utilizado no Brasil), e buscaram simular algumas situações em que frequentemente são observadas deteriorações nestas rochas quando expostas ao meio ambiente, quais sejam: a ação climática (variações térmicas, atmosferas marítimas) e a ação de poluentes atmosféricos.

Estes estudos visaram tanto ao estabelecimento de metodologia para ensaios laboratoriais que permitam antecipar as deteriorações do material rochoso em situações de uso; como procuraram agregar a questão da durabilidade aos critérios de escolha dessas rochas, quando utilizadas como revestimento de edificações.

The stone materials used in civil construction tend to be altered, naturally, with the time. This process is usually sped up when they are exposed to aggressive climatic conditions and polluted environment, or by the use of inadequate constructive or maintenance procedures. The accelerated or artificial weathering tests, also known by ageing tests, are used for this purpose.

Since these deterioration processes, once started, are practically irreversible, the anticipation of the possible degradations in use situations has great importance.

The experimental tests here presented had been carried through by means of the simulation of climatic aggressiveness (thermal variations, marine environments) and the action of atmospheric pollutants, focusing on granitic rocks, widely used in Brazil.

These studies aim at, on one hand, the establishment of methodology for laboratorial tests that would allow foreseeing deteriorations of the stone materials in use situations and, on the other hand, to add the question of the durability as additional criteria of choice of these rocks, when used as cladding or flooring of buildings. The ageing test experimentally accomplished in this study showed distinctive results depending on the weathering agent (saline fog, sulfur dioxide or thermal

Os ensaios de alteração acelerada experimentalmente conduzidos neste trabalho exibiram resultados diversificados conforme o agente utilizado (névoa salina, dióxido de enxofre ou variações térmicas) e, principalmente, conforme as características intrínsecas da rocha granítica ensaiada, o que demonstra que mesmo se tratando de um grupo de rochas com composição mineralógica e feições texturais e estruturais semelhantes, fatores como estado microfissural e alterações minerais preexistentes tem importância fundamental na sua alterabilidade.

Palavras-chave: rochas graníticas; rochas para revestimento; deterioração de rochas; ensaios de alteração acelerada.

1 INTRODUÇÃO

As rochas foram os primeiros materiais de construção utilizados na Antiguidade: nos castelos, palácios, aquedutos e vários outros tipos de edificações, bem como em monumentos e estatuária. E são utilizados até hoje, na construção civil, tanto na forma de agregados como nas rochas para revestimento.

Este uso se deve à pronta disponibilidade, aliada à durabilidade da rocha, que geralmente mantém suas características de resistência, especialmente mecânica, por séculos.

Se no passado as rochas eram predominantemente empregadas na forma de alvenaria ou elementos estruturais (colunas e pilares), atualmente são largamente usadas na forma de placas para o revestimento de paredes, pisos e fachadas de edificações, bem como elementos ornamentais (arte funerária) e na confecção de pias, tampos de mesa e outras peças decorativas. No Brasil, as rochas graníticas, devido à abundante ocorrência e enorme variedade de cores e padrões texturais e estruturais, têm sido as mais utilizadas para essas finalidades.

Os materiais usados na construção civil, entre eles as rochas para revestimento, tendem a se alterar, naturalmente, com o tempo; processo que pode ser acelerado em condições climáticas agressivas, ambientes poluídos ou pela utilização de procedimentos construtivos ou de manutenção

(variations) and, mainly, on the intrinsic characteristics of each granitic rock tested, demonstrating that even in a group of rocks exhibiting similar mineralogical composition and textural and structural features, factors such as microcracking degree and pre-existing mineral alterations play fundamental role in their alterability.

Keywords. granites; dimension stone; stone deterioration; ageing tests.

inadequados, promovendo a degradação ou deterioração¹ de rochas.

Como uma vez instalados, os processos de deterioração são praticamente irreversíveis, se torna de fundamental importância o conhecimento antecipado das possíveis deteriorações em situações de uso, seja para a seleção mais apropriada do material rochoso a ser utilizado, como para estabelecimento das medidas de conservação adequadas. Para tanto, se recorre aos ensaios de alteração acelerada, também denominados de intemperismo artificial ou de envelhecimento.

Neste trabalho são apresentados estudos experimentais de alteração acelerada, realizados em rochas graníticas, que buscaram simular algumas situações em que frequentemente são observadas deteriorações nestas rochas quando expostas ao meio ambiente: a ação climática (variações térmicas, atmosferas marítimas) e a ação de poluentes atmosféricos.

Este estudo teve por objetivo tanto o estabelecimento de metodologia para ensaios laboratoriais que permitam antecipar as deteriorações do material rochoso em situações de uso, como

1 Segundo Houaiss; Villar (2009), degradação se refere a processo natural de desgaste ou decomposição; ao desgaste das rochas causado por fatores climáticos; erosão; e deterioração, ao estado alterado para pior; danificação, decomposição, estrago; de forma que se optou, neste trabalho, pelo uso da palavra deterioração ao se referir à alteração da rocha nas obras e monumentos, modernos ou históricos, por ações climáticas, de poluente e mesmo antrópicas.

procuraram agregar a questão da durabilidade aos critérios de escolha dessas rochas, quando utilizadas como revestimento de edificações.

2 ALTERAÇÃO E DETERIORAÇÃO DE ROCHAS

A alteração das rochas se inicia, na natureza, quando entram em contato com as condições atmosféricas reinantes na superfície terrestre, pela atuação do intemperismo.

Viles (1997) considera que a deterioração dessas rochas, ao serem utilizadas na construção civil, ocorre por meio de mudanças nas propriedades desses materiais, em contato com o ambiente natural, no decorrer do tempo, e ressalta que é importante reconhecer que a deterioração também é um fenômeno natural e, portanto, um “problema” não inteiramente induzido pela atividade humana e que possa ser inteiramente “resolvido”; ou seja, que mesmo em condições adequadas de uso e conservação, as rochas se alteram com o tempo.

A deterioração da rocha usada em construções e monumentos, modernos ou históricos, está empiricamente relacionada à interação das características petrográficas, físicas e mecânicas com os agentes do meio ambiente e com os procedimentos de fixação, limpeza e manutenção, ao longo do tempo.

Agrupando todos estes fatores, Aires-Barros (1991) define alterabilidade de rochas como um conceito dinâmico, que se refere à aptidão de uma rocha em se alterar, em função do tempo, aqui considerado em escala humana, ou seja, os fenômenos ocorrem concomitantemente ao uso, à escala do homem e das suas obras.

$$M = f(i, e, t) \quad (1)$$

onde: M = alterabilidade;

i = fatores intrínsecos, dependentes do tipo de rocha (natureza do material, mineralogia, grau de fissuramento ou porosidade, ou seja, da superfície exposta à alteração);

e = fatores extrínsecos, função do clima (temperatura e intensidade de chuvas, entre outros) e do meio em que se processa a alteração (temperatura, pH, Eh, quantidade de água, poluentes, forças bióticas e outros).

t = tempo.

A deterioração inclui mudanças físicas e químicas, que resultam na diminuição da resistência da rocha e modificações na aparência estética; desde alterações cromáticas até esfoliações de camadas superficiais ou ainda a perda de resistência mecânica.

Modificações físicas das rochas para revestimento, atribuídas às técnicas empregadas na extração e de beneficiamento, podem levar ao aumento do fissuramento, porosidade e outros (Dib et al. 1999; Frascá, 2003), aspectos que irão contribuir para a acentuação dos efeitos deletérios dos agentes intempéricos ou da ação antrópica.

Degradações da face exposta da rocha, como inchamento, escamação, destacamento de fragmentos minerais e outros, são muitas vezes decorrentes da formação de subflorescências, a partir de sais provenientes de argamassas (Frascá 2003).

3 CAUSAS E MECANISMOS DA DETERIORAÇÃO ROCHOSA

O clima, em todos seus aspectos, é uma das causas fundamentais da degradação das edificações, por meio da falência de seus materiais constituintes, os quais, por sua vez, afetam a estrutura (Feilden, 1994).

A atmosfera e seus componentes sólidos, líquidos e gasosos atuam sobre as rochas para revestimento por meio de mecanismos físicos (umedecimento, cristalização de sais e outros fenômenos provocados por variações do estado higrométrico da atmosfera) e químicos (sulfatação nas rochas carbonáticas, fenômenos de hidrólise nas rochas granitoides e outros). A estes se associam as ações biológicas (químicas e/ou físicas) promovidas por microrganismos diversos: bactérias, algas, fungos e líquens, musgo e outros.

Além das causas climáticas e da atuação dos poluentes, Frascá (2002) também atribui ao uso inadequado de técnicas construtivas e de conservação como causa de degradação, como exemplo:

- A ação de agentes de limpeza, os quais atuam através de diversas substâncias químicas, cujos componentes podem causar modificações, especialmente no aspecto estético das rochas;
- A cristalização de sais, em rochas usadas no revestimento de pisos e assentadas com argamassa.

3.1 Variações Térmicas

As mudanças da temperatura do ar são quase inteiramente causadas pelo aquecimento do sol durante o dia e pela perda desse calor durante a noite.

Todos os materiais de construção, inclusive as rochas para revestimento, expandem quando aquecidos e contraem quando resfriados – o chamado movimento térmico – que é um importante agente da degradação em edificações. A extensão do movimento térmico depende do intervalo de temperatura resultante do calor incidente e é modificado pela capacidade térmica da estrutura e pela espessura, condutividade e coeficiente de expansão dos materiais.

3.2 Sais Solúveis

A cristalização de sais é um dos agentes intempéricos mais poderosos, pois é responsável pela deterioração de rochas em ambientes marítimos (Figura 1), climas úmidos e ambientes poluídos.



Figura 1 - Aspecto de revestimento em rocha, exposto a nevoa salina na orla de Recife, exibindo eflorescências e manchamentos esbranquiçados, decorrentes da cristalização de sais.

O mecanismo de degradação é a pressão de cristalização dos sais nos poros ou microfissuras e depende do grau de saturação e do tamanho do poro (Winkler & Singer 1972).

A cristalização do sal pode ocorrer na superfície do material rochoso, formando as eflorescências; ou dentro dos capilares próximo à superfície da rocha, originando as subeflorescências, onde a ação mecânica de sais, nas fissuras, dá início ao trabalho destrutivo.

Em uma edificação, nas proximidades do solo, uma solução salina pode ascender através da rocha por capilaridade, até a altura potencial de ascensão capilar, denominada zona capilar, na qual ocorre a evaporação e conseqüente cristalização dos sais, dando origem a diversas formas de deterioração (Figura 2).

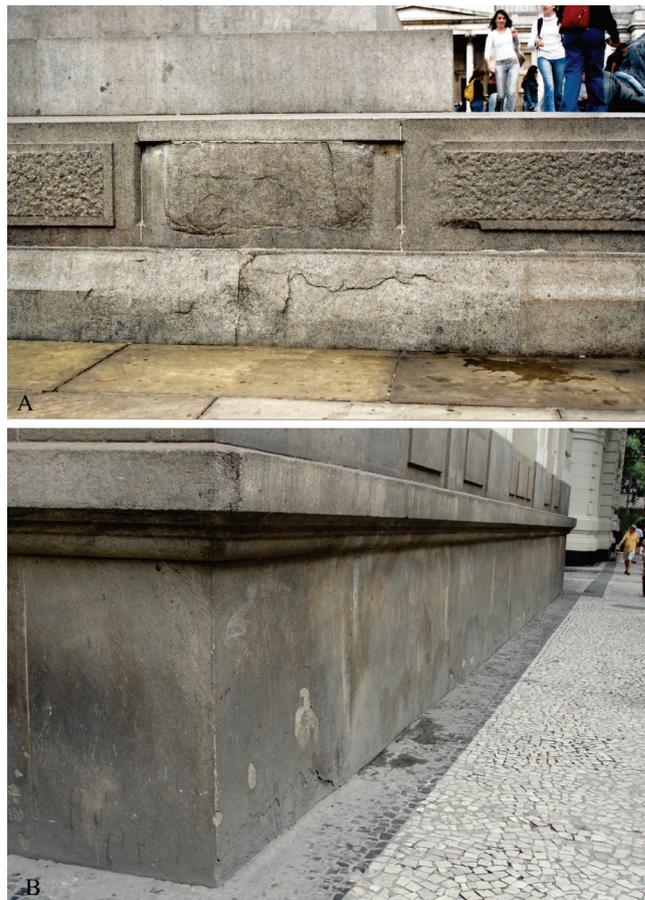


Figura 2 - Deteriorações resultantes da ação da cristalização de sais: (a) esfoliações² e (b) deslocamento.

3.3 Poluentes

A deterioração dos materiais rochosos é notavelmente mais pronunciada nos centros urbanos e industriais, pois a presença de poluentes, de fontes variadas, modifica e acelera os processos de alteração destes materiais, ou seja, modifica ou acelera os processos naturais.

Dentre os poluentes, o dióxido de enxofre (SO₂) é considerado o mais importante na degradação de rochas (Amoroso & Fassina 1983). Pode reagir com o ozônio (O₃), peróxido de hidrogênio

2 A terminologia empregada para descrição dos padrões de deterioração segue as orientações do ICOMOS (2008).

(H_2O_2), vapor d'água e outras substâncias na atmosfera para formar o ácido sulfúrico (H_2SO_4), um dos maiores contribuintes para a chuva ácida, que por sua vez afeta os mais diversos materiais de construção (Kobayashi et al. 1994), incluindo os vários tipos de rochas e até granitos (Figura 3).

Embora avaliem que a emissão de SO_2 esteja decrescendo nos países industrializados, Kuceira et al. (2004) consideram que está sendo criada uma nova situação multi-polvente, na qual a atuação dos compostos de nitrogênio, ozônio e particulados passam a ser mais relevantes.

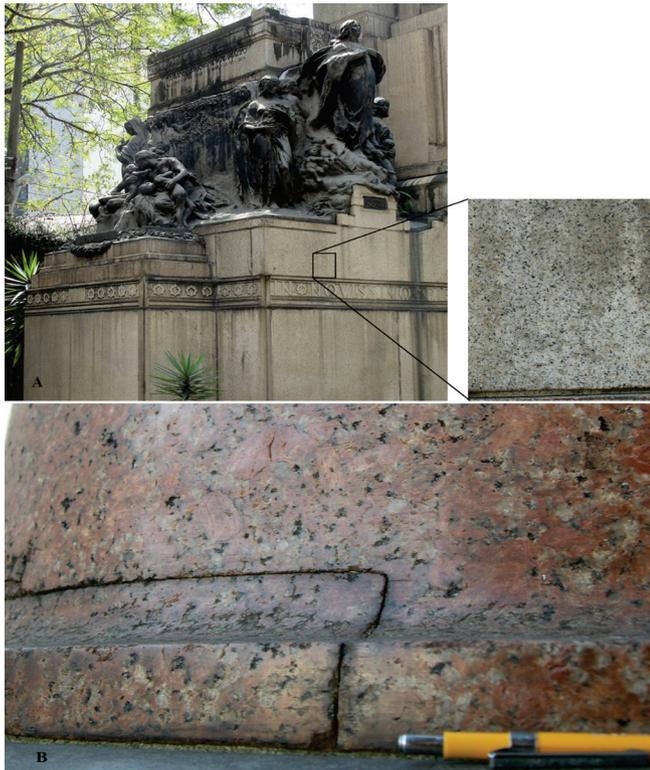


Figura 3 - Aspecto de deterioração de rocha granítica empregada em jazigo do Cemitério da Consolação (São Paulo, SP) resultante da poluição e outros agentes atmosféricos como particulados, aerossóis, chuva e insolação. No detalhe, notar escamação (a). Em (b), pilar em granito, localizado no centro de São Paulo (SP), com abundantes cavidades superficiais, devidas à perda de plaquetas de biotita e atribuídas à ação de poluentes associada ao umedecimento e secagem.

Todos os poluentes têm caráter ácido, e para a ocorrência do ataque químico dos poluentes nas rochas é necessária a presença de água, que age como solvente dos agentes agressivos, meio de transporte desses agentes e dos produtos de reação, e, em alguns casos, é componente dos produtos de reação (ex. gipso) (Zivica & Bajza 2001). A textura da rocha, nestes casos, é importante, pois superfícies rugosas proporcionam melhores substratos para deposição.

A consequência prática dos efeitos químicos do ataque ácido é a gradual deterioração da superfície exposta (Figura 3b). Com sua progressão para o interior da rocha, passa a ocorrer gradual perda da resistência, especialmente pelo aumento da porosidade.

Nestes processos deve se ressaltar que a degradação também pode ser causada, ou ao menos acelerada, pela ação biológica, como líquens, musgos e outros (Figura 4), processo que se denomina biodeterioração. Como muitos organismos são mais ativos em condições de baixo pH, a chuva ácida propicia um ambiente adequado para a ação das bactérias, que constituem, neste sentido, um agente adicional da deterioração das rochas, visto que alguns tipos são capazes de sintetizar ácido sulfúrico a partir de dióxido de enxofre presente no ar (Amoroso & Fassina 1983).



Figura 4 - Colonização biológica tem importante papel na deterioração da rocha.

4. ENSAIOS DE ALTERAÇÃO ACELERADA E PROCEDIMENTOS PROPOSTOS

Para a avaliação da alterabilidade, podem ser utilizadas várias técnicas, todas elas medindo a variação, no tempo, de uma grandeza intrínseca ou com ela intimamente correlacionada.

Nestes testes, a variável dependente é considerada a medida quantitativa de uma propriedade como densidade, massa, resistência à tensão etc. Algumas vezes, dados qualitativos como a hierarquização visual constitui a variável dependente. A variável independente, neste caso, é aquela que contribui para a mudança da variável dependente e, essencialmente, está sob controle do experimento (como temperatura, umidade, pH e outros).

Ensaio de alteração acelerada, que simulam situações deteriorantes em laboratório, visam fornecer informações quanto à alterabilidade da rocha em relação aos agentes intempéricos, além da investigação dos mecanismos de deterioração, para cada caso.

É importante ressaltar que os resultados obtidos nestes ensaios permitem uma previsão de desempenho na situação em foco, porém não permitem a extrapolação entre o tempo de aparecimento de efeitos em corpos-de-prova com aquele em que esses poderiam ocorrer em situações reais.

Outra característica importante, é que ensaios conduzidos em laboratório obviamente não reproduzem as condições naturais, estas sempre multicomponentes e complexas.

No entanto, essas investigações buscam inserir os conceitos de durabilidade³ entre os

parâmetros de escolha e seleção de rochas para revestimentos, tema, atualmente, de fundamental importância, pois as agressividades do meio ambiente estão cada vez mais acentuadas.

As simulações de alteração aqui apresentadas procuraram verificar – dentro de um grupo de rochas graníticas relativamente homogêneas, quanto à composição mineralógica e química, mas heterogêneas em relação à ambiência geológica – as respostas das características intrínsecas quando expostas aos mesmos ambientes potencialmente degradadores.

Dentre as várias causas e mecanismos de deterioração rochosa, foram consideradas relevantes e objetos de investigação aqueles relacionados à exposição ao meio ambiente: atmosferas marítimas e poluídas, e as variações térmicas (Frasca 2003), conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Ensaio propostos e principais características.

Ensaio	Simulação	Resultados esperados
Câmara de névoa salina	Atmosferas marítimas	Verificar eventual deterioração em ambientes marítimos (névoa salina)
Câmara de dióxido de enxofre	Ação de poluentes	Verificar eventual deterioração em ambientes urbanos poluídos (umidade e H ₂ SO ₄)
Choque térmico	Variações térmicas	Verificar o decaimento da resistência da rocha após ciclos de aquecimento e resfriamento rápido, ou seja, decorrente de variações térmicas bruscas que propiciem dilatação e contração constantes.

4.1 Câmaras Climáticas

A exposição ao meio ambiente foi simulada com o uso de “câmaras climáticas” (*wheathering chambers*), equipamentos projetados e construídos para atender a necessidade de realização de avaliações da resistência dos materiais ao intemperismo, mais rápidas que aquelas obtidas em testes de exposições ao ar livre. Dentre elas foram selecionadas as que simulam exposição ao dióxido de enxofre e à névoa salina.

4.1.1 Exposição ao dióxido de enxofre

A operação do equipamento para ensaio de exposição ao SO₂ baseia-se nas normas ABNT NBR 8096 (ABNT 1983a) e DIN 50018 (DIN 1997). Consiste em ciclos, de 24 horas cada, nos quais a câmara é mantida aquecida por 8 horas (a 40°C e com umidade relativa 100%), desligada e aberta, para ventilação, por 16 horas. Após isso, a água da câmara é renovada e inicia-se novo ciclo. A concentração de SO₂ estipulada pela norma é de 0,67%, que equivale a pH de aproximadamente 2.

Foram ensaiados três corpos-de-prova, por amostra, sendo reservado um corpo-de-prova padrão para controle.

Os corpos-de-prova permaneceram na câmara por 60 dias, com inspeções periódicas, sendo as quatro primeiras a cada 48 h e as seguintes semanais.

³ **Durabilidade:** medida da capacidade da rocha ornamental de resistir e manter as características essenciais e distintas de estabilidade, resistência à degradação e a aparência, em uso, ao longo do tempo. Este tempo dependerá do meio ambiente e do uso da rocha em questão (p. ex., em exteriores ou interiores) (ASTM 2011a).

4.1.2 Exposição à névoa salina

A operação do equipamento para ensaio de intemperismo artificial por exposição à névoa salina baseia-se nas normas ABNT NBR 8094 (ABNT 1983b) e ASTM B117 (ASTM 2011b). A solução salina é preparada dissolvendo-se cloreto de sódio em água, de tal forma que tenha pH entre 6,5 e 7,2.

Os corpos-de-prova são colocados em suportes na câmara, de modo a ficar com um ângulo de 15° a 30° com a vertical e permitir livre acesso da névoa a todos eles.

Foram ensaiados três corpos-de-prova, por amostra, sendo reservado um corpo-de-prova padrão para controle.

Os corpos-de prova permaneceram na câmara por 60 dias, com inspeções periódicas, sendo as quatro primeiras a cada 48 h e as seguintes semanais. Em cada inspeção, não ultrapassando o período de 30 minutos, os corpos-de-prova são lavados para eliminação do sal da superfície.

4.1.3 Choque térmico

O ensaio de alteração por choque térmico foi baseado nos procedimentos estabelecidos na norma EN 14066 (BSI 2003). González-Messones (2002) recomenda este ensaio para verificação da possível oxidação, em rochas ígneas, e de desagregação, em mármore e calcários.

Foram ensaiados cinco a seis (quando obtidos a partir de rochas gnáissicas) corpos-de-prova, no tamanho e formato prescritos para a determinação da resistência à flexão, segundo ASTM (2009), ensaio selecionado para avaliar o decaimento da resistência mecânica.

O ensaio propriamente dito consistiu em secagem dos corpos-de-prova em estufa até peso constante e na realização de 20 ciclos, definidos pela colocação dos corpos-de-prova por 18h em estufa a 105 °C, em seguida imediatamente submersos em água, a temperatura ambiente, por cerca de 6 h.

Após o 20º ciclo, os corpos-de-prova foram novamente secos em estufa e submetidos a ensaio de flexão. O decaimento por choque térmico é, então, verificado pela expressão:

$$\Delta_{RF} = \frac{RF_f - RF_i}{RF_i} \times 100 \quad (2)$$

onde Δ_{RF} = variação de resistência à flexão (%); RF_f = resistência à flexão após o ensaio (MPa); RF_i = resistência à flexão antes do ensaio (MPa).

5 RESULTADOS

Os principais resultados obtidos nos ensaios realizados estão sumariados a seguir.

5.1 Exposição ao Dióxido de Enxofre

A exposição de rochas graníticas selecionadas ao dióxido de enxofre resultou em (Frasca & Yamamoto 2004): (a) eflorescências e subeflorescências em fissuras, especialmente em feldspatos, ou espaços interlamelares em biotita (Figura 5a); (b) descoloração ou oxidação de minerais máficos; (c) amarelecimento ou branqueamento da face polida (Figura 5b).

A cristalização de sal – identificado em todas as amostras como gipso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – foi o principal mecanismo de deterioração, promovendo o inchamento, escamação e local desagregação, sendo a presença de minerais micáceos e o microfissuramento preexistente em feldspatos determinantes para a deposição dos sais.

A característica mobilidade do elemento ferro em ambientes exógenos promoveu a descoloração de minerais máficos (Figura 5b).

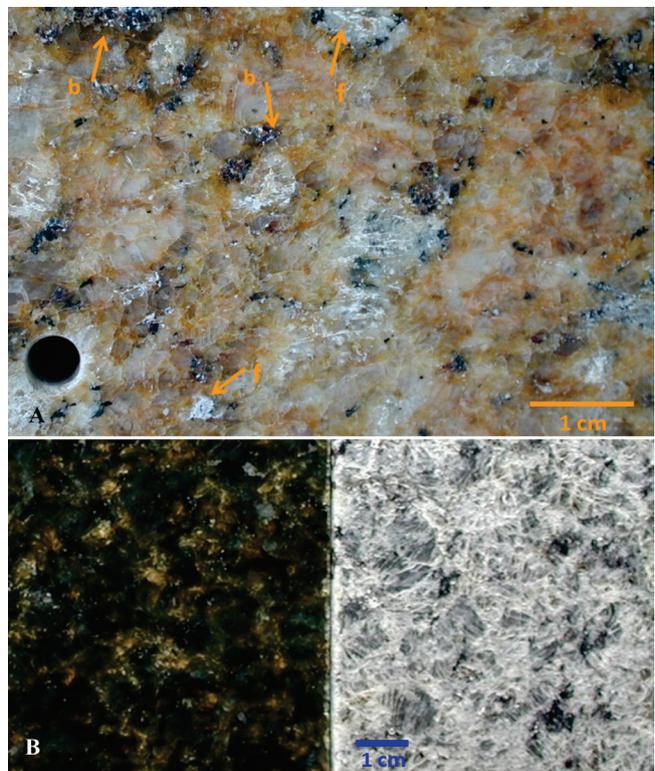


Figura 5 - (a) Cristalização de sais (gipso) em espaços interlamelares (em biotita - b) e microfissuras preexistentes (em feldspatos - f). Em 5(b), descoloração da face polida de rocha charnockítica (corpo-de-prova à direita).

5.2 Exposição à Névoa Salina

Grande parte das rochas graníticas ensaiadas não exibiu modificações visualmente perceptíveis após exposição à nevoa salina. Entretanto, algumas mostraram notável intensificação da oxidação de minerais já previamente oxidados (Figura 6a).

Menos comum foi o aparecimento ou aumento de irregularidades na face polida de corpos-de-prova (Figura 6b), em decorrência de provável destacamento de plaquetas em agregados biotíticos, produzindo efeito semelhante ao observado no pilar ilustrado na Figura 3b.

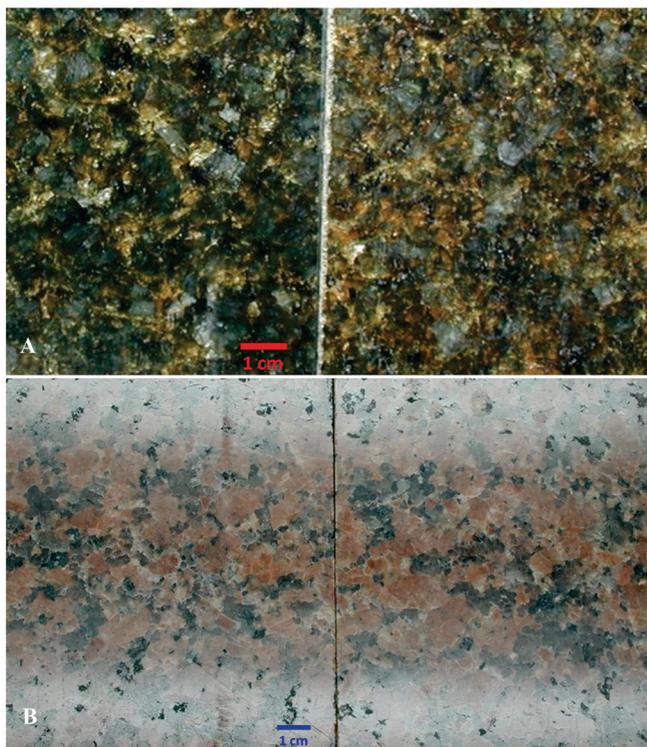


Figura 6 - Intensificação da oxidação preexistente (corpo-de-prova à direita), em rocha charnockítica (a) e aparecimento ou aumento de irregularidades na face polida (b); notar semelhança com a deterioração ilustrada na Fig. 3b.

5.3 Choque Térmico

O ensaio de choque térmico promoveu as seguintes modificações nas rochas graníticas aqui estudadas (Frasca & Yamamoto 2010):

- decaimento da resistência à flexão, diretamente proporcional às resistências obtidas nas determinações efetuadas na rocha no estado natural; porém variável conforme a estruturação da rocha: rochas isotrópicas mostraram valores de decaimento menores e mais

homogêneos (variando entre 7% e 26%), que as anisotrópicas (entre 5% e 49%). Adicionalmente, nas rochas anisotrópicas, as determinações da resistência à flexão obtidas paralelamente à direção da foliação, além de apresentarem os menores valores, evidenciaram os maiores decaimentos (entre 20% e 50%);

- parte das rochas ensaiadas exibiu modificação de cor, relacionada principalmente à intensificação da oxidação preexistente (Figura 7a), como também observado na exposição à névoa salina; e também o aparecimento ou intensificação de pequenas manchas ferruginosas (Figura 7b).

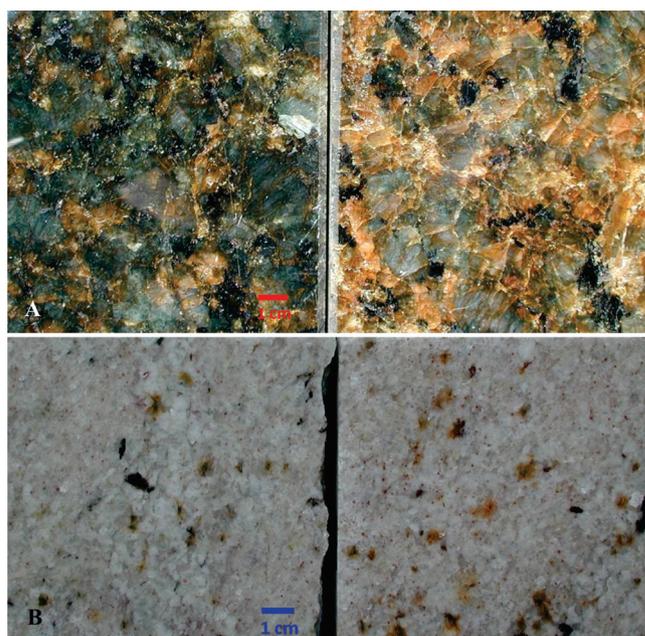


Figura 7 - Intensificação da oxidação preexistente (corpo-de-prova à direita), em rocha charnockítica e em (b) intensificação de pontuações ferruginosas dispersas na rocha (corpo-de-prova à direita)

6 CONSIDERAÇÕES

Os resultados obtidos nos ensaios propostos permitem as seguintes considerações:

- exposição ao dióxido de enxofre: promoveu a cristalização de sais (gipso), e evidenciou o papel degradador das atmosferas ácidas, em graus variados, em praticamente todas as rochas graníticas ensaiadas, que causou desde modificações cromáticas (descoloração) até escamação;
- exposição à névoa salina: os efeitos degradadores dos sais (NaCl) dissolvidos no ambiente foram menos agressivos que os verificados

na exposição ao dióxido de enxofre, mas visualmente é perceptível a intensificação da oxidação e/ou surgimento de pontos oxidados em certas rochas;

- choque térmico: as variações cíclicas de temperatura e umidade revelaram-se bastante agressivas, promovendo expressivo decaimento da resistência mecânica das rochas, modificações cromáticas (amarelecimento) e oxidação ou intensificação de oxidação preexistente em minerais.

As principais modificações visuais verificadas nas rochas graníticas ensaiadas evidenciaram o importante papel do ferro nas modificações cromáticas, quando expostas aos diferentes ambientes. Pode promover tanto a oxidação ou intensificação da oxidação de minerais, em virtude de seu potencial de oxidação nos ambientes exógenos, aqui sob a influência das variações bruscas de temperatura e umidade; como a descoloração da rocha, em decorrência da provável lixiviação do ferro, em meio ácido.

7 CONCLUSÕES

Os ensaios de alteração acelerada experimentalmente conduzidos neste trabalho exibiram resultados diversificados conforme o agente utilizado (névoa salina, dióxido de enxofre ou variações térmicas) e, principalmente, conforme as características intrínsecas da rocha granítica ensaiada.

Isto demonstra que, mesmo se tratando de um grupo de rochas com composição mineralógica e feições texturais e estruturais semelhantes, fatores como estado microfissural e alterações minerais preexistentes tem importância fundamental na alterabilidade, e conseqüentemente na durabilidade, de rochas graníticas empregadas na construção civil ou monumentos, sejam modernas ou históricas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fapesp - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, cujo apoio financeiro (Processo nº 99/06250-0) possibilitou a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1983a. NBR 8096: material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição ao dióxido de enxofre. Rio de Janeiro, ABNT, 3p.

_____. 1983b. NBR 8094: material metálico revestido e não revestido; corrosão por exposição à névoa salina. Rio de Janeiro, ABNT, 3p.

Aires-Barros L. 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica, Lisboa, 384 p.

_____. 2009. C 880: Standard test method for flexural strength of dimension stone. ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM, 3p.

American Society for Testing and Materials. 2011b. B117: Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM, 8p.

_____. 2011a. C 119: Standard terminology relating to dimension stone. ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM, 7p.

Amoroso G.G. & Fassina V. 1983. Stone decay and conservation. Materials science monograph; v. 11. Elsevier, Amsterdam, 453p.

British Standard Institution. 2003. BS EN 14066: natural stone test methods. Determination of resistance to ageing by thermal shock. London, BSI, 12p.

Dib P.P., Frascá M.H.B.O., Bettencourt J.S. 1999. Propriedades tecnológicas e petrográficas do “Granito Rosa Itupeva” ao longo dos estágios de extração e beneficiamento. In: SBG, Simpósio de Geologia do Sudeste, 6, São Pedro. Boletim de Resumos... São Pedro: SBG/UNESP, p. 154.

Deutsches Institut Für Normung. 1997. DIN 50018: Sulphur dioxide corrosion testing in a saturated atmosphere. Berlin, 3p.

Feilden B.M. 1994. Conservation of historic buildings. Reed Educational and Professional Publish, Oxford, 345 p.

- Frasca M.H.B.O. 2002. Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. In: Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, 1, Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2, Salvador. Anais... Rio de Janeiro: MCT/CETEM, p. 128-135.
- Frasca M.H.B.O. 2003. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 281p.
- Frasca M.H.B.O. & Yamamoto J.K. 2004. Accelerated weathering of granite building stone by sulfur dioxide exposure In: ICOMOS, STONE 2004 - 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm. Stockholm: ICOMOS, Sweden. v. 1, p. 67-74.
- Frasca M.H.B.O. & Yamamoto J.K. 2010. Thermal decay of selected Brazilian granite dimension stone In: IAEG, Geologically Active - 11th IAEG Congress, 2010, Auckland. Geologically Active - WILLIAMS et al. (eds). Leiden, The Netherlands: CRC Press/Balkema. p. 1376-1680.
- González-Messones F.L. 2002. La interpretación de los ensayos de caracterización de la piedra natural, en el marco de la nueva normativa europea. In: Curso de rochas ornamentais. Recife. CD-ROM.
- Houaiss A. & Villar M.S. 2009. Dicionário Houaiss da língua portuguesa. 1^a ed. Rio de Janeiro: Objetiva, 1986 p.
- International Council on Monuments and Sites - ICOMOS. 2008. Illustrated glossary on stone deterioration patterns. English-French version. ISCS - International Scientific Committee for Stone - Monuments And Sites XV. Champigny/Marne, France. 80 p.
- Kobayashi S., Sakamoto T., Kakitani S. 1994. Effects of acid rain on granitic building stone. In: IAEG, International Congress of the International Association of Engineering Geology, 7, Lisbon. Proceedings... Rotterdam: A.A.Balkema. v. 5, p. 3651-3658.
- Kucera V., Tidblad J., Yates, T. 2004. Trends of pollution and deterioration of heritage materials. In: ICOMOS, Stone 2004 - 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Stockholm: ICOMOS, Sweden. v.1. p. 15-26.
- Viles H.A. 1997. Urban air pollution and the deterioration of buildings and monuments. In: Brune, D.; Chapman, D.V.; Gruynne, M.D.; Pacyna, J.M. (Ed.) The global environment: science, technology and management. Weinheim: Scandinavian Science Publ. p. 599-609.
- Winkler E.M. & Singer P.C. 1972. Crystallization pressure of salts in stone and concrete. Geological Society of America Bulletin, 83 : 3509-3514.
- Zivica V. & Bajza A. 2001. Acidic attack of cement based materials: a review. Part 1: principle of acidic attack. Construction and Building Materials, 5 : 331-340.