



METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA PREVISÃO DA DURABILIDADE DE PEDRAS DE REVESTIMENTO

Lúcio F. S. Matos (1); Janaíde C. Rocha (2)

(1) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Regional de Blumenau - FURB, Brasil –
e-mail: lucius@furb.br

(2) Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Brasil –
e-mail: ecv1.jcr@ufsc.br

RESUMO

Proposta: O intemperismo pode levar a deterioração e alterações importantes nas pedras de revestimento, transformando até as propriedades originais de rocha em propriedades típicas de solo. O estudo dos fatores intrínsecos e extrínsecos que influenciam a degradação das pedras naturais em monumentos e edifícios é crucial para o estabelecimento de estimativas de durabilidade e para o planejamento de estratégias de reparo e manutenção. O artigo sintetiza os principais resultados de uma tese de doutorado que se propôs formular uma metodologia de previsão da durabilidade de pedras naturais de construção, principalmente de revestimento, pela comparação dos resultados de análises de caracterização e de cinco ensaios de alterabilidade aplicados a tipos de rochas bem distintos. **Método de pesquisa/Abordagens:** Foram analisadas três rochas: ardósia, arenito e mármore. As amostras foram submetidas a um teste de alteração natural por exposição atmosférica e a quatro testes laboratoriais de alteração acelerada: imersão parcial contínua em solução de sulfato de sódio, alteração em câmara de névoa salina, ciclagem água-estufa e lixiviação Soxhlet. Para cada amostra e teste, os espécimes foram serrados com forma prismática e de lajotas. A caracterização dos materiais foi feita por análise petrográfica (AP), difração de raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e porosimetria de intrusão de mercúrio (PIM). **Resultados:** A previsão da alterabilidade de curto prazo das pedras naturais de construção pode ser feita analiticamente por equações propostas na pesquisa, a partir dos dados de caracterização laboratorial do material. Para prazos maiores do que um ano, a estimativa da durabilidade pode ser feita com recurso, não só aos dados de caracterização do material rochoso, mas também a ábacos propostos neste estudo. **Contribuições/Originalidade:** A estimativa da durabilidade de pedras de revestimento pode ser realizada de forma qualitativa e quantitativa com base científica e recursos experimentais acessíveis.

Palavras-chave: pedras de revestimento; ensaios de durabilidade; previsão de durabilidade.

ABSTRACT

Propose: Weathering can induce important changes and deterioration in building stones, from original rock-like properties to soil-like properties. The study of factors affecting stone degradation in monuments and buildings - weathering agents or petrophysical and geomechanical characteristics of the stone material - is crucial to establish durability estimations and to plan maintenance or repair strategies. The paper synthesizes the principal results of a doctorate thesis that formulates a methodology for durability estimation of building stones, mainly the surface ones, by assessing comparatively the results of rock characterization analysis and of five methods of durability testing applied to quite different types of rocks. **Methods:** Three rocks were studied: slate, sandstone and marble. The samples were subjected to site alteration testing and four accelerated laboratory tests of durability: continuous partial immersion in sodium sulphate solution, saline-spray ageing test, wetting-drying cycling and Soxhlet lixiviation. Prismatic specimens were adopted for each sample and test. The characterization of the materials was done by petrography (PA), X-ray diffraction (XRD), X-ray

fluorescence (XRF) and mercury intrusion porosimetry (MIP) analyses. **Findings:** The durability estimation of natural stone for short periods it is possible analytically through equations presented in this work, based on stone characterization data. For periods longer than one year, the durability estimation may be done by geological characterization data and graphics proposed by this study. **Originality/value:** It's possible to estimate the durability of natural building stones in use situation, in a qualitative or quantitative way, by characterization analysis and accessible laboratorial experimental procedures.

Keywords: surface stones; durability testing; durability estimation.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema

É senso comum que as rochas para construção devem satisfazer os seguintes requisitos básicos:

- **resistência mecânica**, ou a capacidade de suportar o carregamento estimado em serviço, sem entrar em ruptura;
- **durabilidade**, que é a capacidade de manter suas propriedades físicas e mecânicas com o decorrer do tempo e sob ação de agentes degradadores, extrínsecos ou intrínsecos, físicos, químicos ou químico-biológicos;
- **trabalhabilidade**, ou afeiçãoamento com o mínimo de esforço;
- **estética**, isto é, o aspecto decorativo para fins de revestimento ou acabamento.

Mais especificamente, Frazão e Paraguassú (1998) enfatizam que as pedras de revestimento devem atender aos seguintes requisitos mínimos de qualidade:

- Alta resistência ao intemperismo e aos agentes químicos agressivos, nos revestimentos de exteriores;
- Baixa capacidade de absorção de líquidos, visando evitar manchamentos e a sua deterioração;
- Baixa dilatação térmica, o que possibilita a estabilidade dimensional do revestimento;
- Alta resistência ao desgaste, o que é um requisito essencial em pisos;
- Alta resistência à flexão, no revestimento externo fixado por ancoragens metálicas;
- Aspecto estético agradável.

Geralmente, as rochas utilizadas em cantaria, revestimento e calçamento passam por estudos limitados à determinação das características físicas e mecânicas, não havendo informação suficiente sobre sua alterabilidade nas condições normais de utilização. Esta é uma lacuna assaz importante, tanto na literatura nacional, como internacional.

Assim, face ao maior emprego da pedra natural como material de construção civil, trazido pelos avanços tecnológicos na produção de peças lapídeas ou blocos de cantaria, torna-se absolutamente necessário avançar num maior conhecimento científico quanto às variáveis que possibilitem a sua maior **durabilidade**.

1.2 Conceituação da alteração e alterabilidade em pedras de revestimento

1.2.1 Conceitos preliminares

O assunto *alteração de rochas* tem sido profusamente pesquisado por engenheiros e geólogos, inclusive com a proposição de índices quantitativos visando representar o estado de solidez ou de degradação do material, numa dada situação natural ou experimental, todavia, os estudos poucas vezes chegam à quantificação da *alterabilidade*, que é a velocidade da evolução do estado de alteração no

tempo. Ainda, menos chegam à previsão da ‘durabilidade’ dos materiais analisados, ou seja, da sua capacidade em manter as suas características essenciais e distintivas com o decorrer do tempo, nas condições normais ou reais de utilização.

A relação entre a massa dos espécimes com o tempo de intemperismo não é linear (curva *massa versus tempo de intemperismo*), mas convexa para cima, quando se atinge um longo tempo de alteração e, além disso, a perda de massa é mais lenta no estágio inicial e mais acentuada nos estágios posteriores (Matsukura et al., 2001). Isto equivale a dizer que a curva de alteração representada em termos de perda percentual de massa tende a ser côncava para cima, em longo prazo (Ladeira, 1983). Efetivamente, de acordo com Fitzner(2004), medições in loco realizadas nos túmulos de Petra - Jordânia esculpidos em rocha sedimentar mostram curvas de progressão que quantificam a recessão da superfície exposta em cm com uma progressão linear contínua nas fases mais avançadas do intemperismo (Gráfico 1).

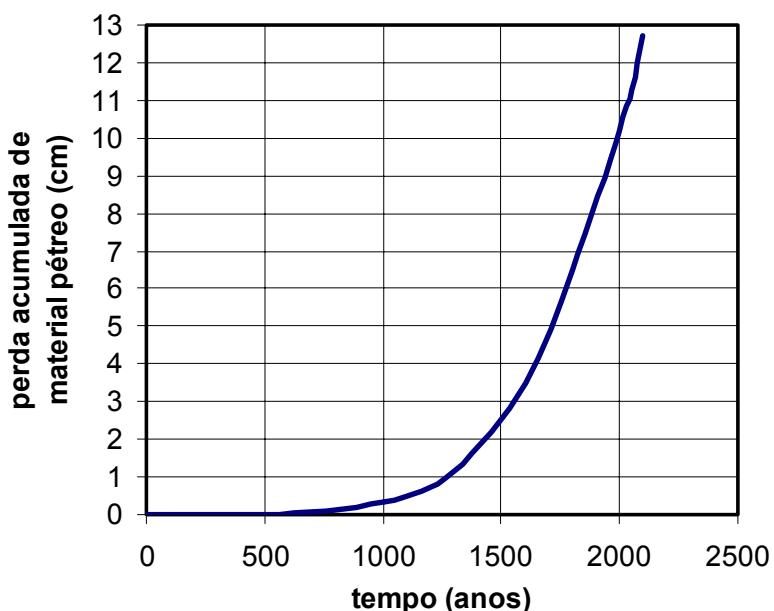


Gráfico 1 - Progressão e prognóstico de intemperismo nos monumentos de Petra - Jordânia (conforme os dados de Fitzner, 2004).

1.2.2 Causas da alteração da pedra natural

As alterações podem ser de vários tipos: mineralógicas, químicas, na permoporosidade, no teor de umidade, no volume molecular, na resistência mecânica, na deformabilidade, desplacamentos e outras. Manifestam-se visualmente por meio de mudanças de coloração, manchas, rachaduras ou fissuras, inchamentos, desfolhamentos, lasqueamentos, crostas, poeiras, páginas superficiais e até deformações conducentes ao colapso estrutural. Conforme a literatura especializada refere em geral, a alteração intempérica das rochas depende de fatores intrínsecos do próprio material, como composição mineralógica, alteração pré-existente, microestrutura (porosidade, porosimetria e forma de distribuição dos poros), grau de coerência e de fatores extrínsecos, como clima (temperatura e intensidade das chuvas), defeitos gerados no processo de beneficiamento (corte e/ou polimento), ação agressiva dos poluentes atmosféricos ou das condições de utilização corrente e dos procedimentos adotados na colocação em obra, manutenção e uso.

As causas reais de alteração ambiental dos materiais rochosos de construção são muito variadas e podem incluir a ação individual ou concomitante de vento, chuva, gelo, flutuações da temperatura e da umidade, ataque químico, cristalização de sais, poluição, biodeterioração, etc. (Price, 1996; Grieken et al., 1998).

Para Frascá (2001), no Brasil, as principais causas da degradação das pedras naturais de construção

são: a) clima tropical (intensas variações de temperatura e umidade); b) agentes de limpeza, que podem incluir substâncias químicas suscetíveis de induzir modificações, especialmente no aspecto estético do material; c) poluição ambiental, na qual têm grande influência os diversos poluentes dispersos na atmosfera (SO_2 , NO_x , CO e CO_2); d) procedimentos de assentamento inadequados.

2 OBJETIVOS

Este artigo tem como principal objetivo apresentar de forma muito sintética os resultados de uma pesquisa, principalmente, quanto a: 1) principais fatores intrínsecos que influenciam a alterabilidade das pedras naturais de revestimento; 2) ensaios laboratoriais acelerados de alteração mais convenientes a estudos de simulação da durabilidade das pedras naturais de construção; e, 3) uma metodologia de previsão da durabilidade das pedras de revestimento em situação de uso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais de estudo

Os materiais rochosos testados, no programa experimental, são correntemente comercializados no Estado de Santa Catarina para fins de construção civil, tendo sido selecionados três tipos litológicos pelas suas características petrofísicas e petrológicas diferenciadas. A Tabela 1 fornece uma descrição sumária destes materiais, tais como: nome comercial, ocorrência, classificação geológica e composição mineralógica aproximada.

Tabela 1 - Descrição resumida das rochas de estudo.

Nome comercial	Ocorrência	Classificação	Minerais Constituintes Possíveis
Ardósia de Blumenau	Blumenau (Complexo Metamórfico de Brusque)	Ardósia	Argilominerais, Quartzo, Feldspato, Micas, Epídoto, Apatita, Esfenio (GUEDES, 1989)
Arenito Rio do Sul	Rio do Sul (Seqüência Sedimentar)	Arenito Formação Rio do Sul	Quartzo (DNPM/CRM, 1987)
Mármore Camboriú	Camboriú (Complexo Metamórfico de Brusque)	Mármore	Carbonatos (calcita e dolomita), Olivina, Epídoto, Talco (GUEDES, 1989)

3.2 Caracterização dos materiais de estudo

A caracterização dos materiais foi a mais ampla possível, incluindo: 1) caracterização mineralógica: análise petrográfica, análise por difração de raios X e análise térmica diferencial; 2) caracterização química por fluorescência de raios X; 3) caracterização da porosimetria por injeção de mercúrio; 4) caracterização física: testes de índices físicos e teste de absorção de água por capilaridade (absortividade); caracterização mecânica: resistência à compressão e resistência à flexão.

Nos itens abaixo são apresentados resumidamente os resultados de caracterização dos materiais.

3.2.1 Análise petrográfica

As análises petrográficas por microscopia sobre lâminas delgadas permitem quantificar as fases mineralógicas por análise modal, além da caracterização de parâmetros texturais suscetíveis de

influenciar a durabilidade das rochas. Estas análises foram realizadas nos laboratórios do Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Departamento de Petrologia e Metalurgia da UNESP – Universidade Estadual Paulista, campus de Rio Claro, e forneceram entre vários resultados os que se resumem nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 - Composição modal média da ardósia.

Composição Mineralógica	% Modal Média
Quartzo	32,0 - 36,0
Mica Branca (sericita/muscovita)	30,0 - 32,0
Clorita	18,0 - 20,0
Feldspato (albita)	8,0 - 10,0
Carbonatos	5,0 - 6,0
Biotita	1,0 - 2,0
Óxidos de Ferro	<2,0
Turmalina	Tr
Titanita	Tr
Epidoto	Tr

Tabela 3 - Composição modal média do arenito.

Composição Mineralógica	% Modal Média
Quartzo	65,0
Feldspatos (plagioclásio e feldspato potássico)	24,0
Biotita	5,0
Muscovita	1,5
Opacos (ilmenita/magnetita)	<1,0
Limonita e óxidos/hidróxidos de ferro	2,5
Carbonatos	1,0
Zircão, Apatita, Rutilo e Turmalina	Tr
Epidoto e Sericita inclusas em cristais de feldspatos	Tr

Tabela 4 - Composição modal média do mármore.

Composição Mineralógica	% Modal Média
Calcita	45,0
Dolomita	25,0
Olivina magnesiana (Forsterita)	29,0
Serpentina	1,0
Flogopita	Tr

3.2.2 Análise química

Foi utilizada a técnica de análise química por espectrometria por fluorescência de raios-X por energia dispersiva – EDX ou FRX - em aparelho Shimadzu EDX-720, no Laboratório Valores - UFSC. Os resultados da análise química constam da Tabela 5.

Dos resultados da análise química, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- De forma genérica, a análise química confirma as conclusões assumidas na interpretação das análises de caracterização mineralógica, quanto à composição dos três tipos litológicos estudados.
- O valor de LOI (*loss-on-ignition*) ou de Perda ao Fogo é elevado para o Mármore Camboriú (26,24%), comparativamente ao das outras duas rochas (< 4,3%), o que denota ser importante a percentagem de carbonato de cálcio (CaCO_3) que se transforma em dióxido de carbono (CO_2) na reação de calcinação ($\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), além da secagem da água livre.

Tabela 5 - Resultados da análise química por FRX em termos de óxidos.

Óxido	Ardósia (%)	Arenito (%)	Mármore (%)
SiO ₂	56.922	65.939	8.316
Al ₂ O ₃	20.158	14.996	1.237
MnO	0.191	0.158	0.089
MgO	1.792	1.514	12.487
CaO	2.957	5.462	47.894
K ₂ O	5.412	3.400	0.953
TiO ₂	0.972	0.529	0.066
P ₂ O ₅	0.000	0.000	0.047
Fe ₂ O ₃	7.107	4.587	2.500
SnO ₂	0.098	0.083	0.088
ZnO	0.000	0.015	0.005
V ₂ O ₅	0.000	0.074	0.000
CuO	0.000	0.017	0.000
ZrO ₂	0.000	0.095	0.011
Rb ₂ O	0.031	0.009	0.000
SrO	0.026	0.020	0.068
SO ₃	0.094	0.000	0.000
LOI	4.240	3.080	26.240

3.2.3 Porosimetria

Entre os vários fatores que controlam a durabilidade das pedras naturais, a distribuição do tamanho de poros ou porosimetria pode ser considerada importante. As análises de porosimetria por intrusão de mercúrio (PIM) foram realizadas no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas - LMPT da UFSC, num porosímetro Micromeritics Pore Sizer 9320. Julga-se importante resumir aqui os resultados da distribuição de poros sob a forma de tabela e apresentar graficamente a determinação da dimensão fractal de cada amostra (Tabela 6 e Gráfico 2).

Tabela 6 - Resumo da distribuição de poros e porosidade efetiva.

ROCHA	DISTRIBUIÇÃO DE POROS (%)			POROSIDADE EFETIVA η_e (%)
	D>5μm V ₁	0.5μm<D<5μm V ₂	D<0.5μm V ₃	
ardósia	10.7	5.6	83.7	2.64
arenito	9.5	40.7	49.8	12.14
mármore	0	0	100	1.90

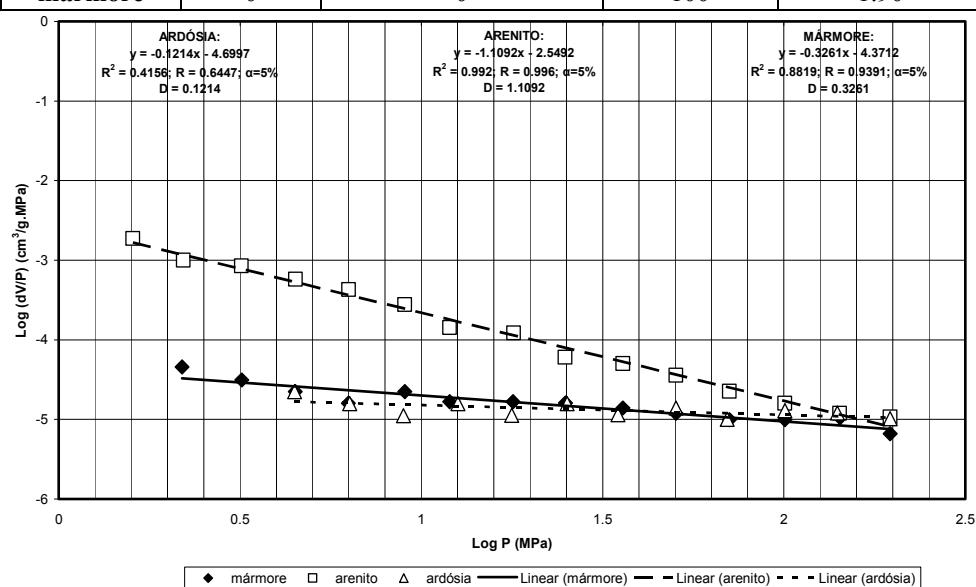


Gráfico 2 - Retas de regressão linear de cálculo da Dimensão Fractal D.

3.2.4 Índices físicos e absorção de água por capilaridade

Os índices físicos e os parâmetros determinados no ensaio de absorção por capilaridade estão resumidos na Tabela 7, abaixo.

Tabela 7 – Resumo dos resultados dos índices físicos e parâmetros de capilaridade.

Índice Físico		Ardósia	Arenito	Mármore
massa específica aparente	γ_d (g/cm ³)	2.71	2.32	2.85
porosidade aparente	η_a (%)	0.47	9.28	0.29
absorção d'água aparente	w_{max} (%)	0.17	4.00	0.10
massa específica real	γ_s (g/cm ³)	2.74	2.71	2.93
porosidade total	η_t (%)	1.04	14.64	2.75
porosidade acessível em 48h	η_{48} (%)	0.45	9.25	0.26
coeficiente de Hirschwald	S_{48} (%)	43.40	63.30	12.22
absortividade	S_c ($\times 10^{-3}$)	0.5869	23.879	0.1312
porosidade capilar	η_{cap} (%)	0.86	8.6	0.17

3.2.5 Caracterização mecânica

A Tabela 8 sintetiza os resultados de resistência mecânica obtidos por compressão uniaxial e flexão de três pontos.

Tabela 8 - Resultados das resistências mecânicas.

Rocha	Compressão Uniaxial		Flexão (por 3 pontos)	
	n (observações)	σ_c (MPa)	n (observações)	σ_f (MPa)
Ardósia	7	120.2	7	27.2
Arenito	8	62.8	8	12.8
Mármore	10	99.0	10	15.9

3.3 Ensaios de durabilidade

Durante a pesquisa, foram realizados cinco ensaios de durabilidade: um de exposição atmosférica ou meteorização e quatro laboratoriais de alteração acelerada. Os ensaios laboratoriais foram de ciclagem água-estufa, de ciclagem por imersão parcial em solução de sulfato de sódio a 14% em peso, de lixiviação Soxhlet e de exposição a névoa salina. Neste artigo, devido à limitação de páginas, apenas, vão ser apresentados os resultados dos ensaios de meteorização, ciclagem por imersão parcial em solução salina e lixiviação Soxhlet, pois são os utilizados na metodologia que se propõe para previsão quantitativa de durabilidade de pedras de revestimento em situação de uso.

Os procedimentos seguidos no ensaio de alteração atmosférica ou ciclagem natural, também, denominado de meteorização, foram essencialmente os subseqüentes: 1) colocação dos corpos-de-prova (prismas de 2.5cmx2.5cmx5cm), previamente limpos e secos em bandejas plastificadas de 15×100×3cm, sendo uma para cada tipo de rocha; 2) exposição das bandejas com as amostras às condições intempéricas no telhado, sobre plataforma de madeira, e em plano inclinado a 27° (latitude local) e voltado a norte, por ser esta a direção de maior freqüência dos ventos nas quatro estações do ano. 3) realização a cada mês do exame qualitativo e quantitativo do estado de alteração dos corpos-de-prova, após lavagem em água pura e secagem em estufa a $70 \pm 5^\circ\text{C}$, até peso constante. A quantificação da alteração é traduzida em termos de porcentagem do peso perdido de cada corpo-de-prova, calculado com base no peso inicial, e número acumulado de corpos-de-prova afetados, por desintegração, fragmentação, rachaduras e lasqueamento, para cada período de observação.

No ensaio de alteração por imersão parcial em solução de sulfato de sódio a 14% em peso são adotados os passos seguintes: 1) introdução, num reservatório de vidro com a solução salina, dos

corpos-de-prova (prismas de 2.5cmx2.5cmx5cm), previamente limpos e secos, apoiados sobre uma das suas bases menores e separados por tipo de rocha, com a solução atingindo a altura de 5mm ± 1mm (\approx 10% da altura do corpo-de-prova), permitindo assim que ela ascenda nos espécimes por capilaridade; 2) fechamento do reservatório de teste com a sua tampa de vidro e colocação numa câmara de banho-maria, onde o nível de água fica acima do nível interno da solução salina, a $40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, por 12h00min, possibilitando que esta temperatura se verifique também no interior do reservatório de teste, com a umidade relativa superior a 95% (estágio de capilaridade); 3) ao fim do estágio de capilaridade a quente, é feita a retirada dos corpos-de-prova do reservatório respectivo e a sua colocação em bandeja de alumínio ou plástico para resfriamento ao ar durante 60 minutos, enquanto é preparado o reservatório de imersão parcial a frio; 4) abertura do reservatório de imersão parcial a frio, instalado numa câmara fria com temperatura constante a $10^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, onde a solução salina está uma altura de 5mm ± 1mm (\approx 10% da altura do corpo-de-prova) na parte central, reservada a imersão dos corpos-de-prova, e com dessecante em prateleiras específicas (hidróxido de potássio, nas prateleiras laterais, e sílica gel, em prateleira superior); 5) introdução dos corpos-de-prova no reservatório de imersão parcial a frio, já preparado, fechamento seqüencial do reservatório de teste e da câmara fria de modo a que no interior do reservatório de teste se mantenha a temperatura a $10^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e a umidade relativa seja inferior a 70%, por 11h00min (estágio de resfriamento); 6) repetir os passos 1 a 5 até serem atingidos 5 ciclos de alteração e levar o ensaio até 30 ciclos; 7) avaliar a alteração qualitativa e quantitativa, como no ensaio de meteorização, após secagem completa dos corpos-de-prova em estufa a $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

O desenvolvimento do ensaio de lixiviação Soxhlet obedeceu aos seguintes procedimentos básicos: 1) colocação dos dezoito corpos-de-prova (prismas de 2.5cmx2.5cmx5cm) previamente limpos e secos no tubo extrator do aparelho Soxhlet, em três camadas, apoiados sobre suas bases menores; 2) colocação de 1 litro de água deionizada no balão de aquecimento; 3) montagem do tubo extrator com os corpos-de-prova rochosos e a coluna de condensação sobre o balão de aquecimento, tudo devidamente fixado no suporte de montagem; 4) ligação do aquecimento do líquido lixiviente, iniciando-se um ciclo de lixiviação que consta essencialmente do seguinte: a água evaporada no balão, devido à unidade de aquecimento controlável, condensa, precipita sobre a amostra e infiltra nos corpos-de-prova; quando a água atinge o nível do sifão, é sifonada de volta ao balão de aquecimento, recomeçando-se o ciclo; 5) o exame quantitativo do estado de alteração dos corpos-de-prova ocorreu periodicamente, após lavagem em água pura e secagem em estufa a $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$, até peso constante; o período de quantificação da alteração foi de 10 ciclos, até 100 ciclos, e de 20 ciclos após 100 ciclos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da alteração nos ensaios de durabilidade

A Tabela 9 sintetiza os valores finais dos índices de alteração, em termos de perda de massa, com o tempo para os corpos-de-prova testados nos três ensaios de durabilidade descritos no item 3.3. Verifica-se que os índices de alteração ocorridos para as três rochas testadas são muito baixos, somente perceptíveis em termos de permilagem (%).

Tabela 9 - Índices de alteração finais verificados nos ensaios de durabilidade.

Rocha	I _a (%) Soxhlet 500 ciclos	I _a (%) Imersão Parcial 15 ciclos	I _a (%) Meteorização 376 dias
ardósia	1.88	0.55	1.39
arenito	6.83	12.66	4.72
mármore	5.57	2.01	1.98

As curvas da evolução da alteração com o tempo ou curvas de alterabilidade experimentais podem ser representadas por polinômios com uma correlação forte ($R \geq 0.9$), portanto, são estas curvas teóricas que vão aparecer mais à frente nos ábacos de previsão da durabilidade.

4.2 Previsão da durabilidade em situação de uso até um ano

Verificou-se que existem correlações lineares significantes entre os índices de alteração do ensaio de meteorização ou alteração natural e a composição mineralógica em % de silicatos (crescente), porosidade total (crescente) e resistência à compressão (decrescente). Portanto, é possível estimar o índice de alteração na meteorização do material, a ser usado na região que concerne a presente pesquisa, a partir dos três parâmetros de caracterização referidos, o que torna essa previsão mais rápida do que a simulação experimental, mesmo de laboratório.

Entre outras possibilidades analisadas, foi concluído que o estimador dado pela equação 1 poderia resultar numa correlação perfeita com os valores do Índice de Alteração I_a (%) do ensaio de meteorização e as rochas desta tese.

$$EMD = \frac{\eta_t \times 10^6}{\%SiO \times \sigma_c^n} \quad (\text{eq.1})$$

, com EMD = Estimador Multivariante de Durabilidade;

η_t = Porosidade total da rocha (%);

$\%SiO$ = Composição percentual da rocha em silicatos, exceto filossilicatos (%);

σ_c = Resistência à compressão uniaxial da rocha (MPa).

Na seqüência do estudo, importava estabelecer regressões lineares entre os valores de I_a e EMD , para as três rochas testadas e vários valores do expoente n . Foi encontrado o valor $n=2.2$ como o primeiro a proporcionar uma correlação perfeita, isto é, conducente a um coeficiente de correlação de Pearson $R=1$.

Assim, as equações 2 e 3 permitem estimar a alteração por meteorização de um ano, conhecidas a porosidade total, a percentagem de silicatos – exceto filossilicatos –, e a resistência à compressão da pedra natural a ser colocada numa obra.

$$I_a = 189.81EMD + 1.2588 \quad (\text{eq.2})$$

$$\text{, com } EMD = \frac{\eta_t \times 10^6}{\%SiO \times \sigma_c^{2.2}} \quad (\text{eq.3})$$

4.3 Previsão da durabilidade em situação de uso após um ano

Para prazos superiores a um ano, é mais seguro partir para interpolações baseadas na experimentação, porque o crescimento da alterabilidade com o tempo não se mantém linear.

Para este tipo de previsão, com o ensaio de imersão parcial em solução salina, foram selecionados o arenito e o mármore como os padrões de referência para a construção do ábaco de durabilidade – Gráfico 3. A ardósia não foi selecionada porque a partir de 25 ciclos, no ensaio de imersão parcial em solução de Na_2SO_4 , experimenta uma desagregação rápida e quase total devido ao lasqueamento pelos seus planos de clivagem ardosiana; portanto, este comportamento aconselha a que se considere este tipo de pedras naturais num grupo específico em estudos de estimativa da durabilidade. As curvas padronizadas do arenito e do mármore foram determinadas pelas equações de regressão polinomial que apresentaram uma correlação mais forte com as curvas experimentais medidas.

Como o Gráfico 3 mostra, é importante determinar o Fator de Durabilidade DF da pedra natural cuja durabilidade se pretende simular ou prever, após a sua análise de porosimetria e aplicação da respectiva fórmula – $DF = 10.61 - 5.07D + 0.42D^2$ –, deduzida de acordo com a metodologia proposta por Gauri&Bandyopadhyay (1999). Com o valor de DF calculado é possível por interpolação traçar a sua curva de alterabilidade entre a do arenito ($DF=5.5$) e a do mármore ($DF=9$), como demonstra o gráfico, com a curva de simulação que hipoteticamente corresponde a uma rocha com $DF=7$.

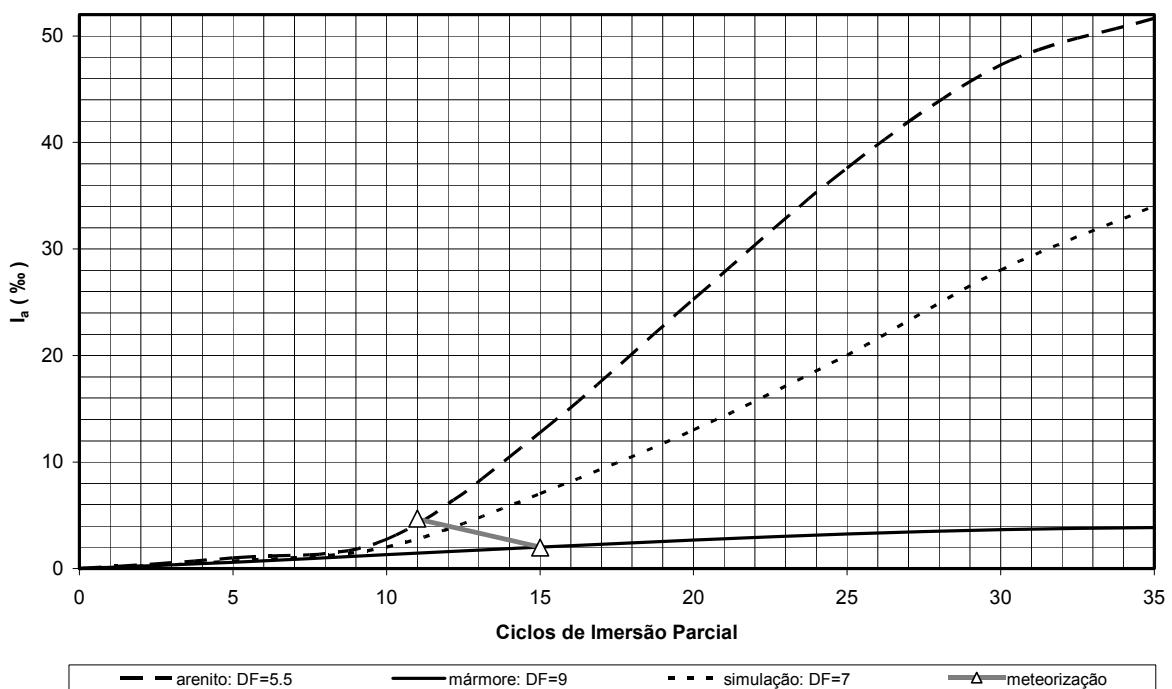


Gráfico 3 - Ábaco de previsão da durabilidade de pedras naturais de construção através do ensaio de alteração acelerada por imersão parcial em solução de sulfato de sódio.

A curva de simulação, no presente caso hipotético, intercepta a reta correspondente à reta de meteorização de 1 ano na abcissa de 12 ciclos do ensaio de alteração acelerada por imersão parcial. Portanto, por exemplo, a alteração de 3 anos da pedra em situação de uso, sem qualquer tratamento de impermeabilização, seria simulada por 36 ciclos no ensaio de imersão parcial em solução de sulfato de sódio.

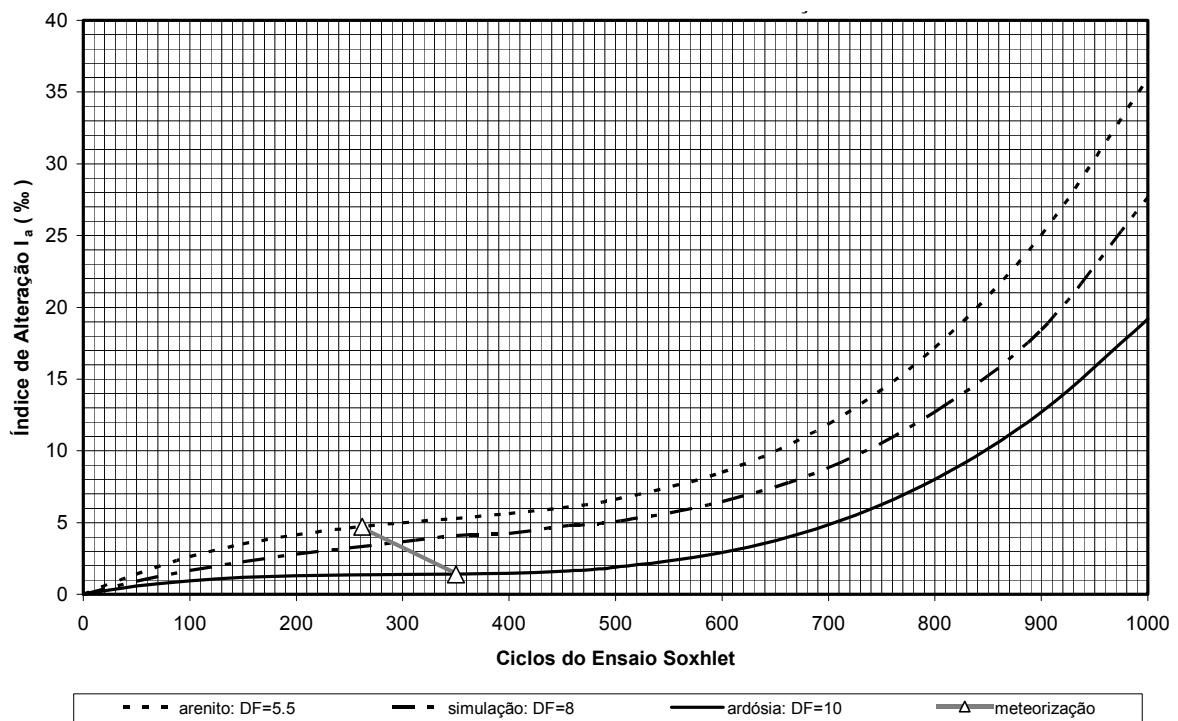


Gráfico 4 - Ábaco de previsão da durabilidade de pedras naturais de construção através do ensaio de lixiviação Soxhlet.

No caso de ser utilizado como ensaio de alteração acelerada o ensaio de lixiviação Soxhlet, seguir-se-ia a mesma metodologia de previsão ou estimativa explicada para o ensaio de imersão parcial em solução salina, usando o ábaco do Gráfico 4.

Assim, para uma pedra natural com DF=8, calculado a partir dos resultados da sua porosimetria, intercepta a reta de meteorização em 290 ciclos da lixiviação Soxhlet. Logo, a sua alteração natural em três anos de uso seria estimada por 870 ciclos de lixiviação Soxhlet, o que corresponderia no Gráfico 4 a um valor Ia= 16%.

5 REFERÊNCIAS

- FITZNER, B. Documentation and evaluation of stone damage on monuments. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON DETERIORATION AND CONSERVATION OF STONE, 10, 2004, Stockholm. **Proceedings...** Aachen, Germany: Geological Institute/ RWTH Aachen University, p.677-690. Disponível em: <<http://www.stone.rwth-aachen.de/stockholm2004.pdf>>. Acesso em: 27/09/2005.
- FRASCÁ, M.H.B.O. Qualificação de rochas ornamentais e para revestimento de edificações: caracterização tecnológica e ensaios de alterabilidade. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, 1 / SEMINÁRIO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2, 2001, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: Museu Geológico da Bahia, 2001. Cursos, p.128-135.
- FRAZÃO, E.B.; PARAGUASSU, A. B. Materiais rochosos para construção. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Eds.). **Geologia de Engenharia.** São Paulo: ABGE, 1998. P. 331-342.
- GAURI, K.L.; BANDYOPADHYAY, J.K. **Carbonate stone: chemical behaviour, durability, and conservation.** New York: John Wiley e Sons, Inc. 1999.
- GRIEKEN, R.V.; DELALIEUX, F.; GYSELS, K. Cultural heritage and the environment. **Pure and Applied Chemistry**, Vol.70, No. 12, p.2327-2331, 1998.
- LADEIRA, F.L. **Ensaios em Mecânica das Rochas: parte I. Ensaios de laboratório.** Ouro Preto-MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 1983. 150p. (Publicação no. 118).
- MATSUKURA, Y.; HIROSE, T.; OGUCHI, C. T. Rates of chemical weathering of porous rhyolites: 5-year measurements using the weight-loss method. **Catena**, v.43, p. 341-347, 2001.
- PRICE, C.A. **Stone conservation.** Santa Monica: The Getty Conservation Institute, 1996.