

Avaliação da absorção de água e métodos de medição no Gnaiss Facoidal: a primeira “Pedra do Patrimônio” brasileira

Water absorption and measurement methods evaluation for the Facoidal Gneiss: the first Brazilian IUGS-Heritage Stone

Marcelle Lemos Amorim de Cerqueda
Bolsista PCI, Geóloga, D.Sc.

Nuria Fernández Castro
Supervisora, Engenheira de Minas, D.Sc.

Resumo

A presença de água é o principal fator de degradação da pedra na construção. No presente estudo, foram investigadas propriedades hidráulicas de amostras sãs e alteradas de Gnaiss Facoidal de cantarias da Santa Casa de Misericórdia, mediante a determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água, a determinação do coeficiente de absorção capilar, a absorção de água pelo método do tubo de Karsten e pelo método da esponja de contato, esse com diferentes formas de aplicação e tempos de contato. Obtiveram-se dados de um amplo intervalo que refletem o aumento da absorção com a degradação para todos os métodos utilizados. Verificou-se que a posição da esponja não afeta significativamente o resultado e que o tempo de contato de 90 segundos é adequado para o Gnaiss Facoidal, sendo este método mais apropriado quando a pedra não estiver muito deteriorada e o do tubo de Karsten no caso contrário. Os resultados dos diferentes métodos apresentaram melhores correlações entre si para o grupo das amostras alteradas, exceto os da esponja de contato.

Palavras-chave: Degradação da pedra; Propriedades Hidráulicas; Métodos *in loco*.

Abstract

Water is the main factor in building-stone decay. In this study, hydraulic properties of Facoidal Gneiss masonry from Santa Casa da Misericórdia were investigated through the determination of the apparent density, apparent porosity and water absorption, the capillary absorption coefficient, the water absorption by the Karsten tube method and by the contact sponge method, this one with different forms of application and contact times. The obtained data encompass a wide range and reflect the increase in absorption with degradation for all methods used. It was found that the position of the sponge does not significantly affect the result and that the contact time of 90 seconds is adequate for Facoidal Gneiss, this method being more appropriate when the stone is sound or slightly weathered and that of the Karsten tube in the opposite case. The results of the different methods correlate better in the weathered samples group, except for the contact sponge method results.

Key words: Stone decay; Hydraulic Properties; *In situ* Methods.

1. Introdução

O processo de alteração da rocha na construção (pedra) é acelerado pela exposição a condições ambientais diferentes daquelas em que se encontrava no ambiente natural, bem como às novas solicitações de uso nas edificações. A interação da água com a rocha, nas suas várias formas (chuva, névoa, umidade relativa do ar e outras), é considerada um dos mais importantes agentes deletérios (Vidal et al., 2014).

A percolação de água na pedra pode ocasionar alterações como formação de fissuras e rupturas devido a tensões geradas pela cristalização de sais higroscópicos nos poros ou pelo congelamento da água em climas frios; químicas pelas reações entre os minerais da rocha e os sais dissolvidos na água; e de ambos os tipos pela ação biológica, pois a umidade na pedra a torna substrato favorável para o crescimento de bactérias, fungos, líquens ou algas (Karagiannis et al, 2016). A principal manifestação da deterioração da pedra é o aumento da sua porosidade e, em consequência da sua capacidade de absorção d'água. Conforme Sass e Viles (2022), nas edificações, os mecanismos de entrada da água na pedra são: absorção, quando permanece em contato com esse líquido por tempo suficiente (p.ex. fundação abaixo do nível freático ou inundações), capilaridade, quando se estabelece um gradiente de umidade relativa entre a superfície e os capilares (p. ex. umidade na base do edifício ou chuva); e sorção de vapor pela condensação do vapor atmosférico na superfície da pedra, sendo a capilaridade ascendente um dos mecanismos mais deletérios.

A susceptibilidade da pedra à entrada de água pode ser avaliada por diversos métodos aplicados em laboratório e *in loco*. Em laboratório, costumam-se determinar a porosidade e a absorção de água à pressão atmosférica, a absorção de água por capilaridade e *in loco* pode se medir a absorção de água pelo tubo de Karsten e pelo método da esponja de contato, este último recentemente introduzido no Brasil, requerendo mais estudos (Castro, 2024).

Quando se trata de construções do patrimônio cultural, a seleção e a aplicação dos métodos para avaliar as propriedades hidráulicas torna-se uma tarefa complexa pois as análises não podem alterar as características originais da pedra, tampouco ser efetuada a coleta de amostras, logo, os ensaios precisam ser não destrutivos e aplicados *in loco*. O principal desafio do uso desses métodos é a comparação dos resultados obtidos com os daqueles executados em laboratório com amostras da mesma rocha, sãs ou alteradas artificialmente, já que as propriedades dessas amostras não refletem a realidade da pedra no monumento que tem sua própria história de alteração pela interação com outros elementos do sistema construtivo e com o ambiente, bem como pelos tratamentos de limpeza ou produtos de conservação nela aplicados (Saas e Viles, 2022).

No Rio de Janeiro, a rocha mais utilizada no patrimônio construído é o Gnaisse Facoidal, rocha característica da Suíte Rio de Janeiro, formada durante o orógeno desenvolvido pelas convergências litosféricas que atuaram entre o Neoproterozóico e o Cambro-Ordoviciano (Heilbron et al., 2016). Trata-se de um ortognaisse grosso bem foliado, apresentando uma estrutura oftálmica (*augen*) dada por megacristais de microclina com formas amendoadas (3 a 5 cm) em matriz granítica rica em biotita (Valeriano et al., 2012).

O Gnaiss Facoidal aflora em grande extensão nas cidades do Rio de Janeiro e Niterói, motivo pelo qual foi a principal pedra de construção dessas cidades entre os séculos XVI e XX (Castro, 2021). Sua grande presença no patrimônio natural (Pão de Açúcar, Corcovado e outros morros) e no cultural deu-lhe o apelido da “mais carioca das rochas” (Mansur et al. 2008) e, recentemente, a designação Pedra do Patrimônio (*IUGS-Heritage Stone*) pela União Internacional de Ciências Geológicas. A designação visa divulgar, seguindo uma norma geológica internacional, aquelas rochas com significância para o Patrimônio Cultural Mundial como, por exemplo, o Mármore Carrara ou o Calcário Lioz que fazem parte, junto com o Gnaiss Facoidal, da lista das primeiras 55 Pedras do Patrimônio da IUGS (Ehling et al., 2024).

A demolição de um dos prédios anexos da Santa Casa de Misericórdia, o Pavilhão Paulo César, de início do século XX, permitiu a doação de cantarias de Gnaiss Facoidal para o CETEM, a pedido o IPHAN, para serem utilizadas em estudos científicos que auxiliem na conservação do patrimônio. A disponibilidade de material, forneceu uma oportunidade para investigar propriedades hidráulicas dessa rocha e aprofundar no estudo da aplicabilidade dos métodos não destrutivos *in loco*, estudo necessário para o embasamento científico de tomadas de decisões quanto a medidas para mitigar ou sanar possíveis processos de deterioração da primeira Pedra do Patrimônio Mundial brasileira.

2. Objetivos

A pesquisa teve como objetivo investigar propriedades hidráulicas do Gnaiss Facoidal por diversos métodos de medição de absorção d'água avaliando sua aplicabilidade.

3. Material e Métodos

Foram utilizadas 48 amostras cúbicas (5 cm^3) de Gnaiss Facoidal, cortadas do interior das cantarias de demolição da Santa Casa de Misericórdia, consideradas como sãs. As mostras foram caracterizadas macroscopicamente, a olho nu e com o auxílio de uma lupa binocular, identificando o estado de fissuração e modificações cromáticas que evidenciassem alterações dos minerais, de acordo à Frascá (2003), permitindo a escolha das faces mais propícias a absorção de água. A seguir, foi realizada a caracterização das amostras quanto a propriedades de absorção de água, determinando-se a densidade aparente, porosidade aparente e absorção d'água segundo a norma 15845-2 (ABNT, 2015), o coeficiente de absorção de água por capilaridade conforme a EN 15801 (DIN, 2009), a absorção de água pelo método do tubo de Karsten adaptando a EN 16302 (CEN, 2013) para um tempo máximo de 1 hora de ensaio, e a absorção de água pelo método da esponja de contato pelo EN 17655 (BSI, 2022). Esse ensaio foi executado quatro vezes em cada corpo de prova para determinar a influência do posicionamento da esponja (horizontal apoiando o corpo de prova na esponja, método de laboratório, ou vertical, pressionando a esponja contra o corpo de prova, método necessário nas medições em monumentos) e do tempo de contato de 60 ou 90 segundos predeterminados como os que fornecem resultados mais consistentes para o Gnaiss Facoidal (Castro, 2024). Complementarmente, foi determinada a dureza superficial Leeb, com equipamento Equotip 3, da Proceq, adaptando a norma A956-12 (ASTM, 2017) para as 60 medições de Wilhelm et al. (2016). Após a

caracterização inicial, 24 corpos de prova foram alterados termicamente a diferentes temperaturas e tempos de exposição, conforme descrito em (Mello et al., 2024) repetindo-se os ensaios de caracterização. Os dados foram tratados e analisados com planilhas de cálculo @Microsoft Excel e o software Tibco @Statistica v.14.

4. Resultados e Discussão

A amostra de Gnaiss Facoidal utilizada apresenta textura porfiroblástica. É composta por, aproximadamente, 70% de feldspatos, de 2 a mais de 5 cm, esbranquiçados a róseos, geminados, com algumas microfissuras, 18% de quartzo, 10% de biotita e 2% de granada arredondada com até 0,5 mm de diâmetro, de cor avermelhada a acastanhada. Os corpos de prova alterados artificialmente apresentam modificações variáveis de acordo às temperaturas aplicadas como fissuras e fraturas intergranulares e desagregação superficial, aumento das microfissuras e esmaecimento da cor nos feldspatos, surgimento de fissuras no quartzo, mudanças na coloração da biotita e da granada, com perdas pontuais deste último mineral. Essas observações indicam que dentre as amostras consideradas sãs, encontram-se várias em grau incipiente de alteração e que a maioria das alteradas estão mais degradadas do que normalmente encontrado nos monumentos.

Os resultados dos ensaios realizados, corroboram essas observações, com valor máximo de porosidade, nas amostras sãs de 1,76 %, sendo o considerado padrão inferior a 0,7 % (Gimenez, 2018; Castro, 2024), e valores de até 7,12% para as alteradas. O coeficiente de absorção por capilaridade do grupo 'são' foi também maior que os de outras rochas semelhantes (Frasca, 2003; Silva, 2022), provavelmente devido às microfissuras observadas. As distribuições de frequência dos resultados mostraram a necessidade de realizar as análises estatísticas com base na alteração da rocha, separando o grupo de medições em rochas sãs do das alteradas (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados da caracterização das amostras analisadas.

	ρ (kg/m ³)					η (%)					α (%)					CA (kg/m ² vs)				
	N	μ	σ	Mín.	Máx.	N	μ	σ	Mín.	Máx.	N	μ	σ	Mín.	Máx.	N	μ	σ	Mín.	Máx.
GT	72	2.602	77	2.415	2.742	72	2,39	2,05	0,25	7,12	72	0,94	0,84	0,10	2,91	72	0,09	0,11	0,01	0,42
GS	48	2.651	22	2.603	2.742	48	1,04	0,34	0,25	1,76	48	0,39	0,13	0,10	0,67	48	0,03	0,03	0,01	0,21
GA	24	2.506	54	2.415	2.592	24	5,09	1,13	2,89	7,12	24	2,04	0,49	1,11	2,91	24	0,22	0,09	0,06	0,42

	W_a (mg/cm ² .min)					W_{90} (mg/cm ² .min)					HLD				
	N	μ	σ	Mín.	Máx.	N	μ	σ	Mín.	Máx.	N	μ	σ	Mín.	Máx.
GT	72	48,72	68,32	0,12	184,75	48	205,46	228,65	33,00	766,67	2.880	549	166	142	906
GS	48	3,01	1,45	0,12	6,58	24	13,42	13,24	0,33	44,67	1.920	695	102	195	906
GA	24	140,13	36,39	45,79	184,75	24	397,50	172,31	140,00	766,67	960	402	69	142	608

GT = Grupo total (todas as amostras); GS = Amostras sem alterar (sã); GA = Amostras alteradas; Qtde. = Corpos de prova; N = Número de medições; μ = Média; σ = Desvio padrão; Mín. = Valor mínimo; Máx. = Valor máximo; ρ = Densidade aparente; η = Porosidade aparente; α = Absorção de água à pressão atmosférica; CA = Coeficiente de absorção por capilaridade; W_a = Absorção pela Esponja Vertical (90 s); W_{90} = Absorção pelo tubo de Karsten (90 s); HLD = Dureza Leeb (sonda tipo D)

A comparação de aplicação do método da esponja (posições horizontal e vertical e tempos de 60 e 90 segundos) apresentou resultados mais consistentes para o tempo de 90 segundos, com menor dispersão. O contato de 60 segundos gerou valores maiores em todos os casos e mais dispersos, representativo da absorção no início, já que no primeiro contato o gradiente de umidade é maior. Não se obteve diferença estatisticamente significativa entre a posição horizontal e a vertical. Isto indica que as medições em paredes de monumentos e no laboratório são comparáveis. Por questão de clareza, na Tabela 1, apresenta-se apenas o resultado da esponja vertical com 90 segundos de contato.

Como esperado, os valores da absorção de água obtidos nos ensaios, aumentaram com a alteração, enquanto o valor da dureza superficial, medida de resistência, diminuiu. Os resultados das medições de absorção não são diretamente comparáveis, já que os fenômenos envolvidos em cada tipo de ensaio são diferentes. Por exemplo, o valor da absorção pelo tubo de Karsten, calculado para 90 segundos para facilitar a comparação com a esponja, é muito superior ao dessa última. O tubo de Karsten foi desenhado para simular o efeito da água da chuva com vento em paredes de edificações e o ingresso da água na pedra também ocorre por permeabilidade.

No intuito de comparar os resultados dos ensaios realizados foram analisadas possíveis correlações por regressão linear. Para o grupo das amostras alteradas, todas as medições apresentaram correlação entre si, mesmo que fraca. Obteve-se uma boa correlação ($r = 0,81$) entre a porosidade e a absorção por capilaridade, como esperado, pois, a segunda depende da primeira e do tamanho e distribuição dos poros. No entanto, para as amostras sãs não se verificou correlação entre essas variáveis, em concordância com a observação de Frascá (2003) de que o ensaio de absorção por capilaridade não é adequado para rochas com porosidade inferior a 1%. Por outro lado, sim encontrou-se correlação positiva ($r = 0,6 - 0,75$) entre a absorção por capilaridade e as medições da esponja nas diferentes condições de aplicação, mas não com as do tubo de Karsten. Já para as amostras alteradas encontrou-se uma correlação positiva entre a absorção por capilaridade e o tubo de Karsten ($r = 0,77$). Os resultados são condizentes com as recomendações de que o método da esponja é mais adequado para o Gnaiss Facoidal pouco alterado, com baixa absorção e o do tubo de Karsten para essa pedra quando se encontra mais alterada (Castro, 2024).

Quanto à dureza superficial Leeb, que foi incluída neste estudo por ter sido considerada boa estimadora do grau de degradação das rochas (Wilhem et al., 2016), foi apenas observada a tendência à sua diminuição com o aumento dos valores de absorção de água com todos os métodos testados.

5. Conclusão

O presente estudo gerou valores de ensaios de absorção de água no Gnaiss Facoidal, abrangendo um amplo intervalo, que servem de referência para futuras análises em monumentos. Comprovou-se que a posição da esponja de contato para medição da absorção capilar inicial não afeta o resultado obtido, sendo assim comparáveis os resultados *in loco* e no laboratório. Recomenda-se que, nas análises investigativas da percolação de água no Gnaiss Facoidal em monumentos, sejam utilizados o método da esponja com 90

segundos de contato para a absorção capilar da rocha sendo esta sã e o método do Karsten para as rochas mais alteradas.

Será ainda necessário complementar o estudo com mais amostras com grau de degradação intermediário (porosidade de 1,5% a 3%) para que o grupo total seja representativo de todos os estágios de alteração possíveis e as correlações aqui apontadas entre os resultados dos métodos possam ser verificadas.

6. Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo apoio financeiro, ao CETEM pela infraestrutura, ao Roberto Carlos Ribeiro, a Rosana Coppedê e a toda equipe do LACON pelo apoio técnico-científico durante o estudo.

7. Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAS **ASTM. A956-12**, Standard Test Method for Leeb Hardness Testing of Steel Products. 2017. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-2**. Rochas para Revestimento Parte: Determinação da Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2010. 4p.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 17655**. Conservation of cultural heritage - Determination of water absorption by contact sponge method. British Standards Limited, Londres. 2022. 13p.

CASTRO, N.F. **Pedras do Patrimônio da Cidade do Rio de Janeiro e Métodos de Diagnóstico para sua Conservação**. 2024. 283 p. Tese (Doutorado)-Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (Brasil).

CASTRO, N.F., MANSUR, K.L., FRASCÁ, M.H.B.O.; SILVA, R.E.C. 2021, 'A heritage stone of Rio de Janeiro (Brazil): the Facoidal gneiss', **Episodes**, v. 44, no. 1, pp. 59-74, 2021. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2020/0200s13>.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15801** Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity, Beuth Verlag GmbH, Berlim.2009, 11 p.

EHLING, A., KAUR, G., JACKSON, P. N. W., CASSAR, J., DEL LAMA, E. A., HELDAL, T. The first 55 IUGS Heritage Stones. IUGS Subcomission on Heritage Stones, 2024.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **EN 15801**. Conservation of cultural property - Test methods – Determination of water absorption by capillarity. 2009. 11 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – CEN. **EN 16302**. Test Methods. Measurement of water absorption by pipe method. European Standard. 2013. 15 p.

FRASCÁ, M.H.B.O. **Estudos Experimentais de Alteração Acelerada em Rochas Graníticas para Revestimento**. Instituto de Geociências. 2003. 263 p. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo. São Paulo (Brasil).

GIMENEZ, A.M.S. **Susceptibilidade experimental de rochas do patrimônio histórico aos agentes do intemperismo**. 2018. 295 p. Tese (Doutorado) -Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo (Brasil).

HEILBRON, M.; EIRADO, L.G.; ALMEIDA, L. J. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico e de recursos minerais**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2016. 182 p.

KARAGIANNIS, N.; KAROGLU, M.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. Building Materials Capillary Rise Coefficient: Concepts, Determination and Parameters Involved. In: Delgado, J.M.P.Q. (Ed). **Building Pathology and Rehabilitation**. New Approaches to Building Pathology and Durability. Springer. 2016, p.27-44.

MANSUR, K.L.; CARVALHO, I.S.; DELPHIM, C.F.M.; BARROSO, E.V. O Gnaiss Facoidal: a mais Carioca das Rochas. **Anuário do Instituto de Geociências**. v. 31, 2/2008, p. 9-22.

MELLO, B.B.; CERQUEDA, M.L.A.; RIBEIRO, R.C.C.; CASTRO, N.F. **Estudo dos Efeitos do Fogo no Gnaiss Facoidal do Pedestal do Monumento a Pedro Álvares Cabral**. In: XXXII Jornada de Iniciação Científica e VIII Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação. 2024. 5p.

SASS, O.; VILES, H. Heritage hydrology: a conceptual framework for understanding water fluxes and storage in built and rock-hewn heritage. **Heritage Science**. 2022. 10: 66. 18 p.

SCRIVANO, S.; GAGGERO, L. Non-invasive analytical technique to address water uptake on stone surfaces: The implemented Contact Sponge Method (i-CSM). **Journal of Cultural Heritage**. v. 28.2017. pp. 9-15.

VALERIANO, C.,M. et al. 2012, Geologia e Recursos Minerais da Folha Baía de Guanabara SF.23-Z-B- IV, Estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000. Belo Horizonte: CPRM, 2012. 156 p.

VANDEVOORDE, D.; CNUUDE, V.; DEWANCKELE, J.; BRABANT, L.; BOUW, M.; MEYNEM, V.; VERHAEVEN, E. Validation of in situ applicable measuring techniques for analysis of the water adsorption by stone. **Procedia Chemistry**. v.8.2013. pp-317-327.

VIDAL, F.W.H.; AZEVEDO, H.C.A.; CASTRO, N.F. Tecnologia de Rochas Ornamentais: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento. 2013. CETEM. 700p.

WILHELM, K.; VILES, H. & BURKE, Ó. 2016. Low impact surface hardness testing (Equotip) on porous surfaces - advances in methodology with implications for rock weathering and stone deterioration research. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41(8), p. 1027–1038. <https://doi.org/10.1002/esp.3882>.