

RELAÇÕES DE MEDIÇÕES COM ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

MEASUREMENT RELATIONS WITH NON-DESTRUCTIVE TESTS AND ORNAMENTAL STONES'S TECHNOLOGICAL PROPERTIES

Jader Luiz Maranhão Ferreira

Aluno de Graduação em Geologia 9º período, UFRJ
Período Estágio CIEE: setembro de 2019 a julho de 2020
jaderluiz10@gmail.com

Nuria Fernández Castro

Orientadora, Eng. de Minas, M.Sc.
ncastro@cetem.gov.br

Roberto Carlos C. Ribeiro

Co-orientador, Eng. Químico, D.Sc.
rcarlos@cetem.gov.br

RESUMO

O uso de Ensaio Não Destrutivo (END) reduz tempo e custos de análise e auxilia em estudos sobre o comportamento das rochas ornamentais e nas melhores práticas para sua conservação. Neste estudo, foram comparadas análises petrográficas e resultados de ensaios destrutivos (ED) do banco de dados do CETEM com valores obtidos mediante END realizados para estudo do comportamento frente a parâmetros tecnológicos de oito tipos de rochas. Como esperado, relacionada inversamente com o desgaste Amsler, a dureza superficial relacionou-se diretamente com a VPU, com valores altos para as amostras e, ambas, inversamente com as propriedades hidráulicas (porosidade, absorção de água e a absorção por capilaridade). Um quartzito apresentou valores discrepantes das demais amostras, evidenciando a capacidade dos END em detectar seu grau de alteração. Com variações nas diferentes faces de amostras anisotrópicas, os resultados de VPU mostraram que é um procedimento sensível a esta característica.

Palavras-chave: Rochas Ornamentais; END; Propriedades Hidráulicas.

ABSTRACT

The use of Non-Destructive Tests (NDT) reduces analysis time and costs and assists in studies on the behavior of natural stones and in best practices for their conservation. In this study, petrographic analysis, and results of destructive tests (DT) from the CETEM database were compared with values obtained through NDT carried out to study the behavior against technological parameters of eight types of rocks. As expected, inversely related to Amsler abrasive wear, surface hardness was directly related to UPV, with high values for the samples and, both, inversely with the hydraulic properties (porosity, water absorption and capillarity absorption). A quartzite presented discrepant values from the other samples, showing the ability of NDT to detect their degree of alteration. With variations in the different faces of anisotropic samples, the results of UPV showed that it is a procedure sensitive to this characteristic.

Keywords: Ornamental Stones; NDT; Hydraulic Properties.

1. INTRODUÇÃO

As rochas são usadas como material de construção há pelo menos 12.000 anos, como elementos estruturais ou decorativos (VIDAL *et. al.*, 2013). Hoje, a maior utilização das rochas naturais é em revestimentos internos e externos de edificações, e objetos como tampos de mesa, esculturas, lápides e arte funerária em geral. O Brasil é um dos maiores produtores mundiais e reconhecido por seus materiais silicáticos (ígneos ou metamórficos de origem ígnea) e silicosos (quartzitos e metaconglomerados) denominados exóticos e superexóticos (CHIODI FILHO & CHIODI, 2019). Embora sejam duráveis, como atestam os monumentos e construções do patrimônio, as rochas sofrem degradação com o tempo por agentes naturais ou antrópicos, que alteram as suas características, sendo fatores que dependem do ambiente e da rocha, tais como CO₂ e SO₂ em ambientes urbanos, a névoa salina marcante em regiões litorâneas, além de outros mecanismos intempéricos como chuva, vento e variações de temperatura (FRASCÁ & YAMAMOTO, 2014). Essa degradação depende também de propriedades, que são analisadas por ensaios destrutivos (como resistência à compressão, à flexão) e não destrutivos (como medição da absorção por capilaridade) em laboratório, requerendo amostras. O uso de Ensaio Não Destrutivo (END) com equipamentos portáteis permite a análise *in situ*, reduz tempo e custos de análise e é especialmente importante na análise de rochas do patrimônio construído, das quais não é possível se extrair amostras. O avanço da tecnologia tem permitido que propriedades inerentes às rochas e características tecnológicas possam ser estimadas mediante END. Por exemplo, a Velocidade do Pulso Ultrassônico (VPU) é um dos procedimentos mais usados para avaliar as características mecânicas da rocha, não necessitando de destruí-la (VASCONCELOS *et al.*, 2008). Estudos recentes têm focado em avaliar a eficiência de certos END para se estimar características petrofísicas das rochas (MENÉNDEZ, 2016). O LACON do CETEM é um laboratório moderno, com equipamentos capazes de executar END, mas ainda há poucos estudos que estimem as propriedades das rochas por esses meios. Desenvolver esse campo é de grande utilidade, pois pode permitir o estudo de rochas com menor necessidade de amostragem, agilidade e redução de custos. Por outro lado, materiais atualmente valorizados no mercado de rochas ornamentais, como os quartzitos, não contam com muitos estudos sobre suas propriedades tecnológicas.

2. OBJETIVOS

Realizar correlações de parâmetros tecnológicos a partir da análise dos diferentes resultados obtidos de END em diversos tipos de rocha.

3. METODOLOGIA

A partir da revisão bibliográfica, verificou-se que os ensaios conjugados são mais eficazes que individuais e a escolha dos métodos, enumerados a seguir, justifica-se pela possibilidade de correlação dos resultados. Um único END não seria eficaz, porém, um conjunto de END e a correlação gera uma maior eficiência na análise (MENÉNDEZ, *op. cit.*). Corpos de prova cúbicos de oito rochas distintas, atualmente comercializadas, de 5 a 7 cm de lado, foram fornecidos pelo NRES/CETEM (Figura 1): dois mármores (MAR575: calcita dolomita mármore, branco cinzento, granulação predominantemente média, com bandas turvas cinzentas e cristais centimétricos; MAR644: quartzo calcita dolomita mármore, branco, granulação fina, foliado); três quartzitos (QTZ577: cinza, granulação fina, com fraturas; QTZ578: cinza, granulação fina, foliação incipiente e agregados centimétricos escuros; QTZ580: branco, granulação fina); um metarenito (MET581: composto essencialmente por grãos de quartzo, marrom claro, granulação fina); um granito (GRA583: cinza escuro, porfírico, granulação fina a grossa, predominantemente média, maciço); e um biotita-gnaiss (BG696: cinza com bandas de biotita e veios de quartzo, bem foliado). Os resultados da caracterização tecnológica das amostras foram obtidos do banco de dados do CETEM e estão agrupados na Tabela 1, sendo: Desgaste Amsler (NBR 12042); Análise petrográfica (NBR 15845-1), Densidade aparente, Porosidade aparente e Absorção de água (NBR 15845-2); Congelamento e Degelo (NBR 15845-4); Compressão Uniaxial (NBR 15845-5); Módulo de ruptura (NBR 15845-6); Flexão quatro pontos (NBR 15845-7); e Impacto de corpo duro (NBR 15845-8). No LACON, realizaram-se ensaios de absorção por capilaridade

(BIANCHI, 1994); dureza superficial (HLD, *Leeb Hardness*), com equipamento Equotip 3, com sonda D, da marca Proceq, com metodologia adaptada de outros estudos (AOKI & MATSUKURA, 2007), medindo-se valores RIM (10 impactos sequenciais no mesmo ponto, indicando valores da rocha sã) e SIM (10 impactos únicos em pontos diferentes, indicando valores da rocha no momento da medição) em cada face das amostras; VPU, ondas P, método direto (faces opostas em contato com os transdutores), equipamento Pundit PL-200, transdutores de 54 kHz, de 4,5 cm de diâmetro, da marca Proceq. Com os resultados obtidos, fizeram-se análises comparativas entre as características tecnológicas das diferentes amostras obtidas por Ensaios Destrutivos (ED) e END.



Figura 1: Um exemplar de cada amostra utilizada, com a numeração correspondente.

Tabela 1: Resultados da caracterização tecnológica, fornecidos pelo NRES/CETEM.

Amostra	Orientação	RCU (MPa)	F3 (MPa)	F4 (MPa)	DA (mm)	C/D (MPa)	CE (k)	ICD (J)
MAR575		99,80 ± 12,19	8,01 ± 0,47	6,97 ± 0,32	5,44 ± 0,01	92,91 ± 26,41	0,92	3 ± 0,27
QTZ577		180,1 ± 49,85	30,78 ± 2,88	14,07 ± 7,33	0,6 ± 0,01	216,7 ± 122,99	1,2	4 ± 0,56
QTZ578		101,6 ± 14,67	1,19 ± 0,13	10,08 ± 4,41	1,47 ± 0,01	0,45 ± 0,27	0,38	9 ± 0,89
QTZ580		125,5 ± 37,16	16,77 ± 2,84	-	0,62 ± 0,01	101,1 ± 59,82	0,81	3 ± 0,74
MET581		189,2 ± 11,92	18,94 ± 1,10	23,82 ± 3,36	0,78 ± 0,01	254,3 ± 43,79	1,34	10 ± 0,82
GRA583		171,8 ± 10,82	13,11 ± 0,51	7,49 ± 1,33	1,12 ± 0,01	142,9 ± 18,96	0,83	5 ± 0,64
MAR644	∥	101,6 ± 14,67	21,07 ± 5,27	10,44 ± 2,30	2,74 ± 0,01	0,45 ± 0,27	0,38	13 ± 1,77
	⊥		8,73 ± 7,39	11,56 ± 1,81				14 ± 1,88
BG696	∥	67,23 ± 11,77	6,29 ± 1,59	8,75 ± 0,91	2,28 ± 0,01	103,32 ± 26,65	1,54	7 ± 1,77
	⊥		10,36 ± 1,07	-				94,39 ± 16,23

Legenda: (∥) paralelo ou (⊥) perpendicular à foliação. RCU: Resistência à Compressão Uniaxial; F3: Flexão 3 pontos (Módulo de Ruptura); F4: Flexão 4 pontos; DA: Desgaste Amsler; C/D: Congelamento e Degelo; CE: Coeficiente de Enfraquecimento; ICD: Impacto de Corpo Duro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A porosidade das rochas silicáticas (granitos e gnaisses) e silicosas (quartzitos), assim como a os mármore, é devida, principalmente, ao fissuramento (micro e macro), enquanto outras (calcários, alguns arenitos) devem sua porosidade aos espaços entre grãos (poros). Por esse motivo, a absorção de água por capilaridade acontece de forma rápida nas fissuradas e de forma mais lenta e continuada nas porosas, embora as primeiras absorvam menos que as segundas (DELGADO, 2018). As propriedades hidráulicas (absorção, porosidade, capilaridade) são de grande importância por ser a água o meio de transporte de agentes de degradação. Os resultados dessas propriedades mostram valores esperados para esses tipos de rocha, (CHIODI FILHO & CHIODI, 2019) indicando que se trata de rochas sãs, com exceção do QTZ578 que cujos valores foram ligeiramente superiores ao esperado. A maior absorção por capilaridade, nos primeiros 30 minutos foi observada em todas as amostras, alcançando alturas de marca d'água de entre 9 e 16

mm. Valores maiores mostraram a discrepância do QTZ578, que alcançou 40 mm em 30 minutos e foi a única amostra que continuava absorvendo no fim do experimento, após 60 minutos, chegando a 50mm.

O Equotip mede a dureza de uma camada fina próxima à superfície da rocha pela perda de energia no rebote de um ponteiro que a impacta (HLD, *Leeb Hardness*) e, ainda, pode servir como estimador da resistência à compressão (AOKI & MATSUKURA, 2008). Seus resultados não são afetados pelo tamanho da amostra e é considerado ideal para medir a dureza em rochas em fachadas (VILES *et al.*, 2012). A HLD (RIM) mostrou tendência crescente de valores nos impactos iniciais em todas as amostras como observaram Kurtulus e outros (2018), sendo também sucedida por um leve decréscimo. No MAR575, observou-se fragmentação dos carbonatos no ponto de aplicação, ao invés de rearranjo e compactação dos minerais como na biotita-gnaise.

As medições de VPU resultaram em valores médios altos (4.400 a 6.400 m/s) para quase todas as amostras, acordes com as rochas analisadas (densas, de baixa porosidade e absorção de água). Este END também mostrou variações nos valores para as diferentes direções de medição, em função da orientação mineral ou plano de foliação (VASCONCELOS *et al.*, 2008). O efeito da anisotropia pode ser melhor observado no BG696, com planos de foliação bem definidos e veios de quartzo. Novamente, os valores de VPU do QTZ578 surpreenderam, pois foram bem inferiores ao esperado para esse tipo de material, indicando que se encontra alterado, embora não se observe macroscopicamente. Os baixos valores de resistência mecânica e de dureza superficial (Tabelas 1 e 2) apoiam essa teoria e na análise petrográfica foi observada sericita (filossilicato de alteração da biotita). A Tabela 2 resume os valores de todos os resultados obtidos.

Tabela 2: Resultados dos END realizados durante o projeto.

Amostra	ρ_a (g/cm ³)	$\alpha_{\text{água}}$ (%)	η_a (%)	CC (g/cm ²)/√s	RIM (HLD)	SIM (HLD)	VPU _{MÉDIO} (m/s)
MAR575	2,84 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,35 ± 0,01	662 ± 50,38	592,2 ± 19,01	4967,67 ± 126,85
QTZ577	2,66 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,60 ± 0,01	910 ± 11,53	868,2 ± 22,24	5775,22 ± 26,93
QTZ578	2,63 ± 0,01	0,57 ± 0,01	1,51 ± 0,01	4,08 ± 0,01	860 ± 25,49	765 ± 29,45	3570,78 ± 206,92
QTZ580	2,64 ± 0,01	0,21 ± 0,01	0,55 ± 0,01	0,61 ± 0,01	904 ± 15,98	871,85 ± 18,85	4484,44 ± 86,52
MET581	2,65 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,36 ± 0,01	887 ± 10,13	835,9 ± 10,47	5238,89 ± 8,26
GRA583	2,72 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,20 ± 0,01	0,16 ± 0,01	866 ± 24,25	831,1 ± 29,27	6427,56 ± 45,49
MAR644	2,86 ± 0,01	0,19 ± 0,01	0,56 ± 0,01	0,64 ± 0,01	818 ± 15,91	685,55 ± 9,43	4875,44 ± 120,66
BG696	2,75 ± 0,01	0,25 ± 0,01	0,68 ± 0,01	1,09 ± 0,01	776 ± 50,73	634,1 ± 23,84	4986,11 ± 213,43

Legenda: ρ_a : Densidade aparente; $\alpha_{\text{água}}$: Absorção d'água; η_a : Porosidade aparente; CC: Coeficiente de Absorção por Capilaridade.

A Figura 2a mostra a relação direta entre a porosidade, o coeficiente de absorção por capilaridade e absorção de água e inversa da VPU com essas propriedades. Rochas anisotrópicas, como o BG696, mostram maiores valores de VPU em direções paralelas à foliação e amostras mais porosas, como o QTZ578, ou seja, com mais vazios, tem menor propagação de ondas elásticas, conforme a literatura (VASCONCELOS *et al.*, *op. cit.*). A Figura 2b mostra uma relação inversa entre o Desgaste por abrasão e a dureza superficial: maiores valores de desgaste por abrasão (menor resistência) se correspondem com menores valores de dureza superficial. Os mármore (MAR0575 e MAR0644) mostraram um maior desgaste à abrasão e isso deve-se às características de resistência ao risco dos minerais, similar ao visto no procedimento de dureza superficial.

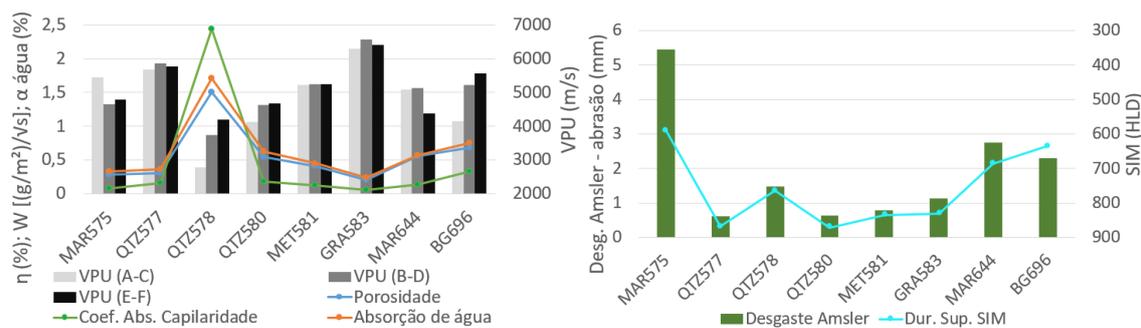


Figura 2: Relação direta entre porosidade, coeficiente de absorção por capilaridade e absorção de água (x2), que se correlacionam de modo inverso com a VPU (a); Relação inversa entre o Desgaste por abrasão a dureza superficial – escala HLD invertida (b).

5. CONCLUSÕES

Em resumo, os END utilizados parecem ser bons estimadores das propriedades da rocha e do seu estado de degradação. No entanto, é necessária a ampliação do estudo, para se analisar estatisticamente mais resultados, buscar mais possíveis correlações com o uso de dados da literatura e análises mais aprofundadas, garantindo a qualidade e precisão dos resultados, por conseguinte. Foram realizados outros ensaios de modo a caracterizar as rochas, porém, até o momento do projeto, não trazem resultados importantes, e serão inseridos em trabalhos futuros. Outra linha de ação seria a avaliação da medição de absorção por capilaridade com o tubo de Karsten, como possível substituto da medição em laboratório.

6. AGRADECIMENTOS

Aos orientadores, ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pelo apoio financeiro e infraestrutura e aos integrantes do Laboratório de Conservação e Alterabilidade de Materiais de Construção (LACON), pela parceria neste estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-NBR 15845 – Rochas para revestimento – métodos de ensaio. ABNT, 32 p., 2015.

AOKI, H; MATSUKURA, Y. A New Technique for Non-Destructive Field Measurement of Rock-Surface Strength: An Application of the Equotip Hardness Tester to Weathering Studies. **Earth Surface Processes and Landforms** 32 (12), 2007. p. 1759–69. <https://doi.org/10.1002/esp.1492>.

_____. Estimating the Unconfined Compressive Strength of Intact Rocks from Equotip Hardness. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment** 67 (1), 2008, p. 23–29. <https://doi.org/10.1007/s10064-007-0116-z>.

BIANCHI, H. K. (Org.). **Ideas- Investigations Into Devices Against Environmental Attack On Stones**. 1ed. Geesthacht, Alemanha: Gkss, V. 1, 1994.

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K. **As Rochas Ornamentais e de Revestimento**. Arquitetura. Vol. 1. Brasília: ABIROCHAS, 2019. 44 p. ISBN: 978 85 45530 03 9

DELGADO RODRIGUES, J. Os meios porosos (2), Aula do **Curso de Caracterização e Conservação da Pedra**. 3-13 dezembro, 2018. UFMG: Belo Horizontes. 2018

FRASCÁ, M.H.B.O.; YAMAMOTO, J.K. Deterioração de rochas graníticas em edificações e monumentos – Investigação por ensaios de aceleração acelerada, **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v.4, p.23-32, 2014.

KURTULUS, C.; SERTÇELIK, F.; SERTÇELIK, I.; Estimation of Unconfined Uniaxial Compressive Strength Using Schmidt Hardness and Ultrasonic Pulse Velocity, **Tehnički vjesnik**, v.25, p.1569-1574, 2018.

MENÉNDEZ, B. Non-Destructive Techniques Applied to Monumental Stone Conservation. Em: **Non-Destructive Testing**, Garcia Marquez, P.F; Papaelias, M.; Zaman, N. (Eds) IntechOpen, Jul. 2016. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/non-destructive-testing/non-destructive-techniques-applied-to-monumental-stone-conservation> Acesso em: 23 jun. 2020.

VASCONCELOS, G.; LOURENÇO, P.B.; ALVES, C.A.S.; PAMPLONA, J. Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granites, **Ultrasonics**, v.48, p.453-466, 2008.

VIDAL, F.W.H., CASTRO, N.F. & FRASCÁ, M.H.B.O. Introdução. Em: VIDAL, F.W.H., AZEVEDO, H.C.A. & CASTRO, N.F. (Eds). **Tecnologia de Rochas Ornamentais – Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. ISBN: 987-85– 8261-005-3., p.15–42, 2013.

VILES, H.; GOUDIE A.; GRAB S.; LALLEY J. The Use of the Schmidt Hammer and Equotip for Rock Hardness Assessment in Geomorphology and Heritage Science: A Comparative Analysis. **Earth Surface Processes and Landforms** 36 (3). 2011. p. 320–33. <https://doi.org/10.1002/esp.2040>.