

# ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS NA AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS PÉTREOS NO PATRIMÔNIO CONSTRUÍDO

Emilio Velloso Barroso  
Eliane Aparecida Del Lama

## INTRODUÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

As rochas usadas como alvenarias em edificações, em artefatos funerários, como meio para a expressão artística em esculturas, ou mesmo permanecendo em seu local de origem, as pedreiras, estão sempre expostas às ações de agentes naturais presentes na atmosfera terrestre: temperatura, umidade, radiação solar, sais solúveis, dentre outros. Estes agentes promovem, nas rochas, a instalação e o desenvolvimento de uma série de processos químicos (e.g. hidrólise, oxidação, dissolução e hidratação) e físicos (e.g. fadiga térmica, variações de umidade, congelamento e degelo), cuja predominância relativa e intensidade são dependentes do clima local. Os fungos (Sterflinger 2010), líquens (Sohrabi et al. 2017) e bactérias (Ortega-Morales et al. 2019) também desempenham papel relevante para a conservação do patrimônio cultural. As ações, geralmente sinérgicas destes agentes, resultam na degradação dos materiais pétreos presentes nos bens culturais. Os efeitos da degradação englobam, entre outros, a alteração cromática das rochas, a formação de crostas superficiais e a redução de suas resistências mecânicas, os quais podem, respectivamente, causar prejuízos estéticos, obliterar os ornamentos na superfície da pedra e colocar em risco a estabilidade das construções quando as alvenarias de pedra exercem função estrutural. Vale ressaltar que, no interior dos museus, a ação destes agentes pode ser mais bem controlada, mas ainda assim não são espaços livres de suas consequências deletérias às rochas (Dias et al. 2020). Especialmente nas grandes cidades, todos estes processos podem ter suas velocidades e intensidades de atuação ampliadas a partir de diferentes fontes de contaminação ou

poluição: trânsito de veículos à combustão (La Russa et al. 2017), aterros permitindo a ascensão capilar de sais solúveis em regiões costeiras (Ricardo et al. 2017b), indústrias (Rovella et al. 2021), dentre outras.

Como consequência dos impactos deletérios causados por vários fatores do ambiente, formam-se nas pedras as morfologias de alteração (Icomos 2008). Estas formas de deterioração seguem padrões visíveis e bem definidos, cuja ocorrência e distribuição no patrimônio depende da interação do substrato pétreo com os agentes degradadores do ambiente. Portanto, são feições importantes para a avaliação geral do estado de degradação das pedras, cujo mapeamento é considerado o primeiro passo para esta diagnose. Contudo, apenas o mapeamento das formas de alteração não é suficiente para caracterizar o dano causado ao material pétreo. Proveniente de testes de laboratório ou executados *in situ*, dados analíticos complementares são necessários para quantificar a degradação e subsidiar os estudos para definir as intervenções de restauro mais adequadas, além de reduzir riscos gerados por decisões não suportadas em dados experimentais sobre o objeto do estudo (Delgado Rodrigues 2015).

Neste ponto, é obrigatório ressaltar a importância da superfície do material pétreo no contexto da preservação do patrimônio cultural. Antes de qualquer ação, deve-se compreender os valores tangíveis e intangíveis que estão associados ao bem a ser preservado. Os valores tangíveis costumam ser os mais evidentes, tendo em vista a materialidade da pedra que é a componente, ou um dos componentes, do patrimônio, o qual carrega consigo valores

que podem ser históricos, artísticos, arquitetônicos, etnográficos e paisagísticos. Há também que se ser capaz de reconhecer os processos de preparação e aplicação da pedra no patrimônio em estudo, um valor intangível relacionado com os saberes associados a uma determinada cultura ou civilização com o estágio tecnológico, localidade e período definido no tempo, como nos casos da manufatura da cantaria ou das técnicas de entalhe da pedra em esculturas. Portanto, a pedra possui valores diversos que nos fazem compreender as restrições quase sempre existentes para a sua amostragem no próprio patrimônio. Ainda que possíveis, tais amostras são de pequenas dimensões e permitem, quando muito, a confecção de lâminas petrográficas, pó para análises mineralógicas por difração de raios X ou determinações da composição químico-mineralógica e os componentes biológicos eventualmente presentes por meio da microscopia eletrônica. Suas dimensões reduzidas não permitem a avaliação de propriedades hidráulicas (e.g. absorção de água) ou mecânicas (e.g. parâmetros elásticos), o que exige que a aquisição de tais parâmetros seja realizada *in situ* e com técnicas não destrutivas.

A definição do número de análises em relação à complexidade dos problemas reais é uma tarefa não trivial, no entanto fundamental em processos decisórios em qualquer ação tecnicamente adequada de conservação (Delgado Rodrigues 2015). Uma parte importante para a definição do número de testes não destrutivos, que devem ser realizados *in situ* nos estudos de conservação, vem da compreensão de que as pedras são materiais naturais, cujas propriedades podem apresentar elevada variabilidade e que não se comportam como meios ideais. Duas características principais devem ser destacadas, a heterogeneidade e a anisotropia. É fundamental que se entenda como estas características condicionam o número de testes que devem ser realizados para caracterizar o material pétreo.

A heterogeneidade está relacionada com o valor medido para uma determinada proprieda-

de (e.g. cor, absorção de água ou resistência) em cada ponto da superfície do material pétreo. Assim, um meio heterogêneo apresenta diferentes valores, de ponto para ponto, para uma mesma propriedade. Deve-se ter em mente que rochas são materiais essencialmente heterogêneos (De Kock et al. 2017), pois são constituídas por associações de diferentes minerais. Na escala em que os testes *in situ* são realizados, e dependendo da área da superfície da pedra que afetam, rochas com grãos grossos ou textura porfírica ou porfiroblástica (Figura 20.1) tendem a ser mais heterogêneas. Nestes casos, dependendo da relação entre a área da medida e a área da seção exposta do mineral, pode-se estar medindo uma propriedade do mineral, e não do conjunto da pedra no patrimônio.



FIGURA 20.1: Textura porfiroblástica do gnaiss da Suíte Rio de Janeiro, tradicionalmente denominada de Gnaiss Facoidal. Esta rocha está presente em muitas construções tombadas na cidade homônima e em Niterói. Esta rocha é um excelente exemplo de meio heterogêneo, com a presença de megacristais de microclínio, com tamanhos variando entre 3 e 5 cm, em meio a uma matriz mais fina, rica em biotita. Local: Catedral Metropolitana São João Batista, Niterói, RJ.

Por sua vez, a anisotropia é definida como a dependência direcional de uma determinada propriedade. As rochas que apresentam foliação de qualquer natureza (Figura 20.2) tendem a ser anisotrópicas para a maior parte de suas propriedades. Definido como a razão entre o maior e o menor valor de uma dada propriedade, medida em diferentes direções, o grau de anisotropia pode se modificar com o avanço da degradação da rocha. Este é o caso da velocidade de propagação de ondas longitudinais (primárias ou compressionais) medidas



FIGURA 20.2: Estratificação sedimentar do Arenito Itararé na fachada da Casa França-Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. A origem deste arenito é atribuída ao Grupo Itararé, da Bacia do Paraná.

diametralmente (Figura 20.3A) em corpos de prova do Gnaiss Facoidal, submetidos a 30 ciclos de submersão em solução supersatura-

da de NaCl e secagem em estufa (Ricardo et al. 2017a). A ciclagem resultou na propagação e abertura de fraturas preexistentes na rocha (Figura 20.3B), reduzindo a velocidade de propagação das ondas, de cerca de 5.000 m/s na rocha não degradada, para velocidades da ordem de 1.700 m/s a 2.000 m/s. A orientação das fraturas geradas pela cristalização do NaCl também tornou o meio mais anisotrópico em relação à rocha sã (Figura 20.3C).

A complexidade do material pétreo a ser testado tem relação direta com o número de ensaios necessários para caracterizá-lo adequadamente. Quanto mais heterogêneo e anisotrópico for o meio, maior o número de medidas requeridas. Esta questão pode ser melhor entendida comparando-se dois meios distin-

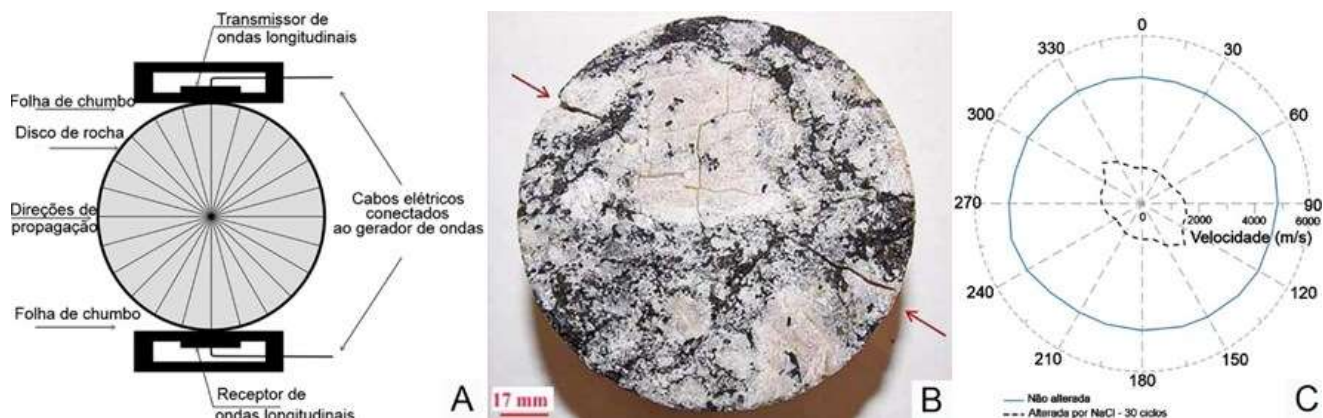


FIGURA 20.3: Caracterização dos efeitos da degradação do Gnaiss Facoidal por cristalização de NaCl sobre a velocidade de propagação de ondas longitudinais em laboratório. A. Esquema do ensaio de propagação diametral de ondas longitudinais. B. Fraturas desenvolvidas no corpo de prova. C. Redução das velocidades e aumento da anisotropia após 30 ciclos de submersão e secagem em solução de NaCl. Fonte: Ricardo et al. (2017a).

tos que serão testados em dois pontos. O primeiro, um meio mais simples, caracterizado por ser homogêneo e isotrópico (Figura 20.4A), enquanto o segundo é heterogêneo e anisotrópico (Figura 20.4B). As setas nas figuras representam a magnitude da propriedade medida, que pode ser qualquer, mas em ambos os meios tomadas nos pontos 1 e 2 e nas direções vertical (V) e horizontal (H). Nota-se claramente que, no meio homogêneo e isotrópico, todas as quatro medidas são iguais. Neste caso, apenas uma medida é suficiente para caracterizar completamente o meio. Já no caso

em que há heterogeneidade e anisotropia, o número de medidas é quatro vezes maior para descrever o meio com relação à mesma propriedade e aos mesmos dois pontos.

## OS TESTES NÃO-DESTRUTIVOS

Há inúmeras fontes de trabalhos de síntese (p. ex., Moses et al. 2014) onde o leitor poderá ter informações sobre uma enorme gama de ensaios disponíveis para a avaliação não destrutiva da pedra no patrimônio. Aqui serão apresentados e discutidos alguns ensaios frequen-

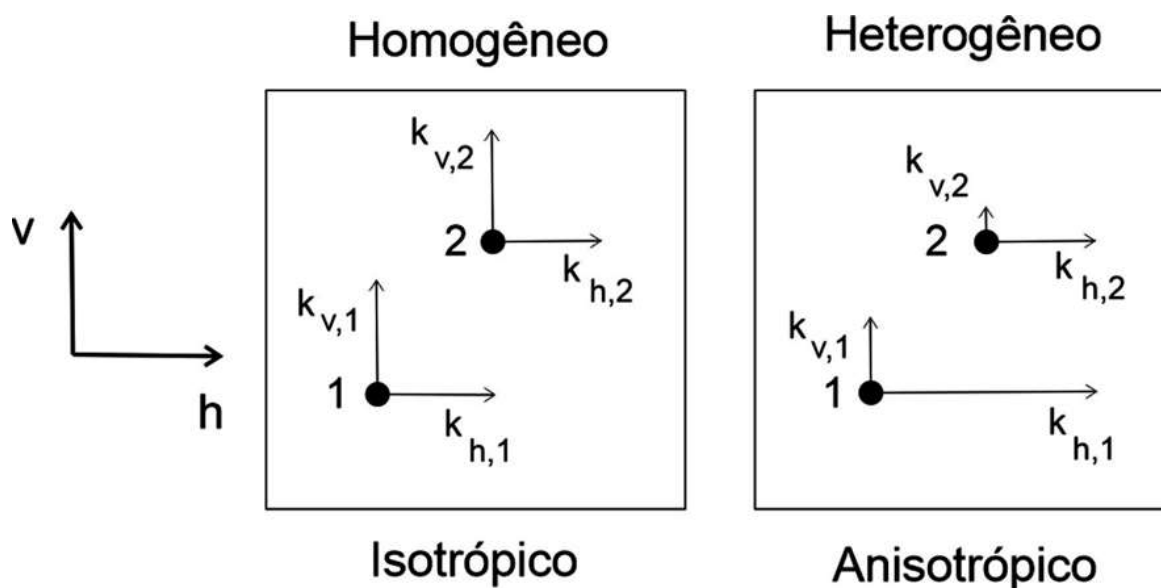


FIGURA 20.4: Avaliação do número de testes necessários para descrever distintos meios com relação à propriedade (k) nos pontos (1, 2). A. No meio homogêneo e isotrópico uma medida descreve completamente o meio com relação à propriedade ( $k_{h,1} = k_{v,1} = k_{h,2} = k_{v,2}$ ). B. No meio heterogêneo e anisotrópico são necessárias quatro medidas ( $k_{h,1} \neq k_{v,1} \neq k_{h,2} \neq k_{v,2}$ ).

temente executados *in situ* para a avaliação da degradação do material pétreo. Quatro testes com objetivos bastante distintos foram escolhidos para ilustrar esta atividade relevante para a conservação e o restauro: a colorimetria, indispensável para avaliar alterações cromáticas da pedra, as velocidades de ondas ultrassônicas, úteis para informar sobre o estado de alteração das rochas, a absorção de água, que nos fornece dados sobre a capacidade de armazenamento de fluidos de uma rocha e, finalmente, a esclerometria, que mede a dureza superficial e pode nos fornecer informações sobre a resistência da pedra.

### Colorimetria

A cor é uma sensação oriunda de ondas eletromagnéticas, determinada pelo comprimento de onda de luz refletida. Por exemplo, uma cor é verde quando há absorção dos outros comprimentos de onda excetuando o intervalo de 490 a 565 nm, que refletirá a cor verde. A cor depende intrinsecamente da percepção do observador, do tipo de iluminação e das características do objeto iluminado.

Assim, há uma certa subjetividade na determi-

nação da cor e, para eliminar essa subjetividade, são utilizados equipamentos para se fazer a quantificação da cor, denominados colorímetros ou espectrofotômetros (Figura 20.5A).

O colorímetro é um equipamento que funciona simulando a percepção do olho humano, adquirindo a cor através de 3 filtros receptores que simulam os tristímulos XYZ. Estes valores são baseados nos componentes teóricos da visão de cores, onde o olho possui 3 cones primários de cores (azul, verde e vermelho). A diferença entre colorímetro e espectrofotômetro é que, este, além da aquisição dos mesmos dados do colorímetro, ele também mede a reflectância de um objeto no intervalo do espectro visível.

Existem vários sistemas de classificação de cores, sendo os mais conhecidos: Sistema de Cor Munsell (usado no estudo de solos), RGB (usado em objetos que emitem luz), CMYK (usado na indústria gráfica), Espaço de Cor Hunter e Espaço de cor CIEL\*a\*b\*.

O sistema de cor mais utilizado em estudos do patrimônio construído é o espaço de cor CIELab (Figura 20.5B), desenvolvido pela Co-

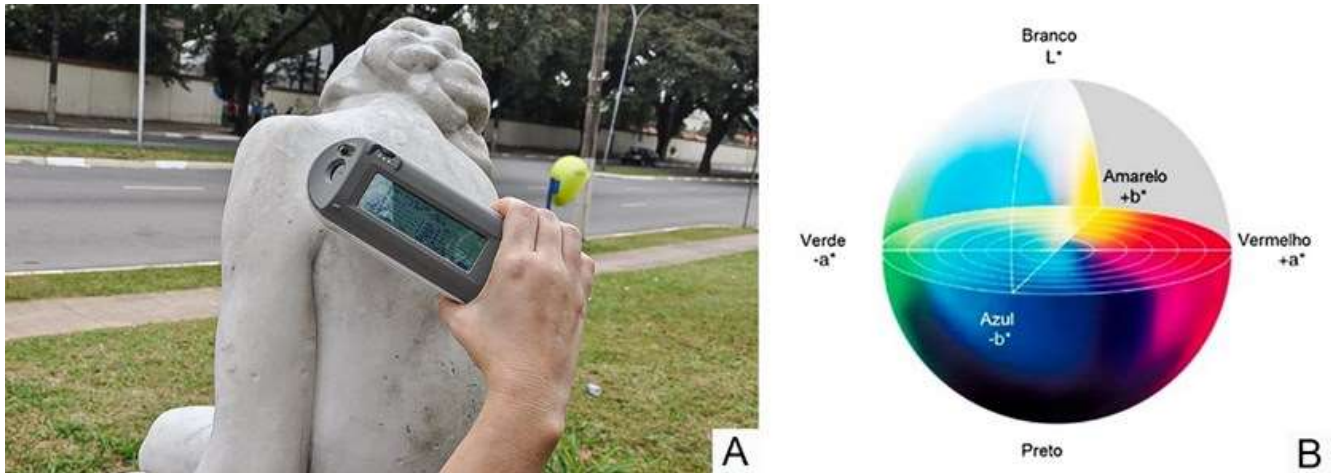


FIGURA 20.5: Espectrofotômetro. A. Medição de cor em trabalho de campo. B. Espaço de cor CIE L\*a\*b\*. Fonte: Konika-Minolta.

missão Internacional de Iluminação (CIE), sendo a cor descrita por 3 características: luminosidade (clara/escuro) no eixo N-S, cor no eixo E-W e saturação (pureza: cores vivas × cores sujas). L\* varia de 0 (preto) a 100 (branco), a\* e b\* são as coordenadas cromáticas: a\* positivo é vermelho e a\* negativo é verde, b\* positivo é amarelo e b\* negativo é azul.

Em projetos de restauração, a utilização de produtos tais como consolidantes, hidrofugantes, biocidas, produtos de limpeza e argamassa, pode provocar alteração cromática do objeto em estudo devido a reações com os mesmos (Costa & Delgado Rodrigues 1996, García-Talegon et al. 1998). Nestes casos, é indicado o uso do colorímetro para verificar se a alteração de cor que for induzida por quaisquer desses produtos, em fase prévia de teste à aplicação, seja aceitável.

Outro uso do colorímetro é monitorar a cor das pedras encontradas em edifícios e monumentos para se avaliar o seu grau de intemperismo. A exposição natural destas pedras altera suas cores, principalmente, por causa da poluição e do intemperismo, alterando principalmente os parâmetros L\* e b\*, escurecendo e amarelado a superfície da pedra (Fort et al. 2000, Grossi et al. 2007, Del Lama et al. 2016). Neste caso, é preciso também ter acesso à rocha fresca, para comparar os parâmetros cromáticos da rocha fresca e da rocha presente no monumento.

O colorímetro fornece os parâmetros L\*, a\* e b\* anteriormente descritos. No caso de um procedimento de consolidação de um monumento ou edifício, por exemplo, seleciona-se uma pequena área e se realiza medidas colorimétricas, antes e após o teste com o consolidante. Estes dados quantificam se a pedra clareou (se o valor de L\* aumentar), se ficou mais amarelada (se o valor de b\* diminuir) e assim por diante. E, a partir destes dados, pode-se fazer a medição da variação total da cor, conhecida como  $\Delta E^*$ :

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Alguns autores consideram que alterações cromáticas com  $\Delta E^* < 3$  não são detectáveis pelo olho humano (Berns 2000). No entanto, este valor não é consenso na literatura, sendo que outros autores apontam valores de 4, 5 ou 10 para a detecção do olho humano (Vidal et al. 2019). Sasse & Snethlage (1996) consideram que um  $\Delta E^* \leq 5$  é aceitável em projetos de restauração.

A medição de cor é um teste muito simples e barato. Os cuidados na obtenção dos dados devem focar no perfeito acoplamento da abertura do equipamento com a superfície a ser medida, além de se realizar as medições quando a pedra não estiver saturada, ou seja, não é recomendável obter medidas após chuvas recentes. A quantidade de medições a ser reali-

zada vai depender da textura e da homogeneidade da pedra a ser analisada. Como exemplo, Prieto et al. (2010) recomendam a obtenção de 14 medidas/36 cm<sup>2</sup> para rochas graníticas.

### Propagação e ondas acústicas

O uso de métodos vibracionais para ensaios não destrutivos foi originalmente desenvolvido para concreto, iniciando-se *ca.* 1920, com utilização de equipamento de ultrassom (Figura 20.6).



FIGURA 20.6: Equipamento para medir velocidade de ondas longitudinais ultrassônicas.

As ondas longitudinais provocam movimentos oscilatórios longitudinais nas partículas do material atravessado por elas, deslocando-as em

direção paralela à direção de propagação da onda.

Em materiais sólidos, a velocidade ultrassônica vai depender da densidade, das propriedades elásticas, da (an)isotropia, do grau de alteração e do índice de porosidade do material a ser analisado.

O método consiste na medição do tempo de travessia de um pulso ultrassônico entre um transdutor e um receptor acoplados a um objeto, sendo que o transdutor transforma o pulso ultrassônico em onda mecânica, e o receptor, por sua vez, transforma a onda mecânica em pulso elétrico novamente. O acoplamento do transdutor/receptor à superfície analisada dá-se por meio de gel para ultrassom, entre outros materiais.

Para o estudo de materiais pétreos, a frequência mais adequada varia de 20 a 250 kHz, sendo a mais utilizada a de 50 kHz.

O posicionamento do par transdutor/receptor pode ser feito com 3 geometrias diferentes (Figura 20.7): transmissão direta (transdutor e receptor são colocados em faces opostas), transmissão semidireta (transdutor e receptor são colocados em faces adjacentes) e transmissão indireta (transdutor e receptor são colocados na mesma face). A transmissão direta é a mais sensível, pois os pulsos ultrassônicos são propagados perpendicularmente à face do transdutor e o receptor recebe a máxima energia do pulso transmitido.

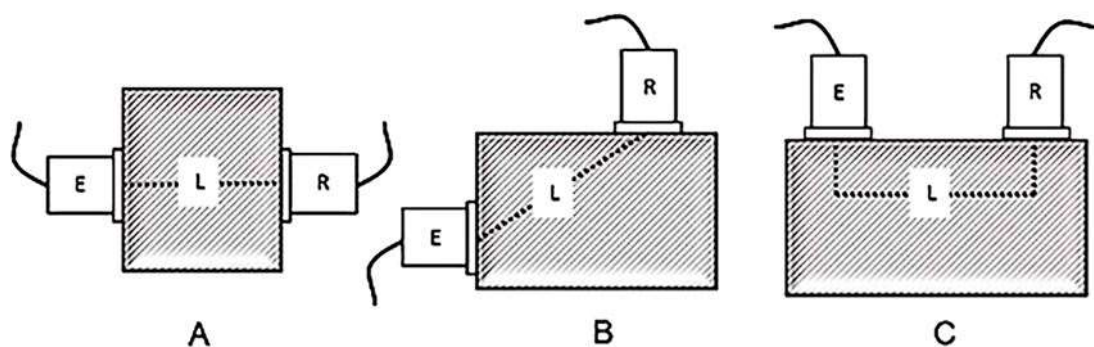


FIGURA 20.7: Tipos de transmissão com as diferentes geometrias do par transdutor (E) e receptor (R). L é a distância entre E e R. A. Transmissão direta. B. Transmissão semidireta. C. Transmissão indireta. Fonte: Gimenez & Del Lama (2014), adaptado da ABNT NBR 8802/94 (ABNT 1994).

A determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas permite avaliar o índice de qualidade do material (sanidade da pedra) e indicar a presença de eventuais descontinuidades (vazios ou fraturas) no seu interior, comparativamente com os valores das velocidades em mesmo material em condições não alteradas.

Esse método também é útil em procedimentos de tratamento da pedra para indicar a profundidade de penetração de consolidantes, e consequentemente avaliar sua eficácia (Delgado Rodrigues & Costa 2008, Scherer & Jiménez-González 2008).

A velocidade é calculada pela relação entre a distância entre os dois transdutores e o tempo de trânsito da onda na pedra. A distância é geralmente obtida com o uso do paquímetro, enquanto o tempo de trânsito pode ser lido diretamente no equipamento ou em um osciloscópio acoplado. Velocidades altas de propagação da onda ultrassônica e consequentemente tempos mais curtos, indicam rochas sãs.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para algumas rochas foi determinada por Chung & Law (1983): arenito, 2,5 - 4,2 km/s; calcário, 3,9 - 5,8 km/s; dolomito, 4,8 - 6,1 km/s; basalto, 5,3 - 6,0 km/s; granito, 4,0 - 5,6 km/s; e quartzito, 5,6 - 5,7 km/s.

Gimenez & Del Lama (2014) apresentaram uma proposta metodológica para o uso do ultrassom em monumentos.

O método ultrassônico é de fácil operação, portátil e de baixo custo. O cuidado em sua aplicação consiste na aderência do transdutor/receptor à superfície da pedra, implicando que esta seja plana e lisa. Vibrações de tráfego de veículos nas proximidades também podem atrapalhar a execução do ensaio. O usuário deve se atentar para o tipo de acoplante, pois alguns produtos, como graxa, podem manchar a superfície da pedra. Inspeções rotineiras com a utilização do ultrassom podem indicar processos de deterioração em fase inicial, e sua detecção prévia minimiza intervenções mais

robustas em monumentos e edifícios históricos.

## Dureza Superficial

A dureza é definida como a resistência que um material sólido oferece às deformações permanentes que lhes são impostas nas suas superfícies. Trata-se de uma propriedade característica dos sólidos e de grande relevância para a tribologia, área da ciência dos materiais que lida com o atrito e o desgaste gerado pela interação entre um corpo sólido e um contracorpo, que pode ser sólido, líquido ou gasoso. O sistema tribológico admite ainda elementos interfaciais entre o corpo e o contracorpo, os quais se constituem de outros sólidos, lubrificante, líquidos, gases, ou suas misturas.

Tendo em vista que as deformações nas superfícies dos materiais podem ser produzidas por diferentes processos, há diversos testes padronizados para se obter a dureza superficial de materiais. Assim a dureza *Shore*, por exemplo, se refere à impressão de uma marca na superfície do sólido causada pelo impacto da queda de uma ponta de diamante. Já a dureza *Brinell* se refere à penetração de uma esfera de aço na superfície polida do material sólido pela ação da compressão desta esfera de diâmetro padrão durante um determinado tempo, também padrão.

Em Geologia, a utilização da dureza é, certamente, mais conhecida na área da Mineralogia, onde a escala de Mohs, de dureza relativa ao risco dos minerais, é um parâmetro bastante empregado como critério de identificação macroscópica. Propriedades relacionadas à dureza das rochas, no entanto, têm sido empregadas para avaliar o desgaste de ferramentas de corte em escavações subterrâneas mecanizadas (Piazzetta et al. 2018) ou em perfurações (Plieninger 2008) ou para otimizar o corte de rochas ornamentais em teares multi-lâminas (Ribeiro et al. 2013).

A avaliação da dureza superficial de rochas, em geral, requer amostras para ensaios destrutivos de laboratório. Como já comentado

anteriormente, a disponibilidade de amostras é uma restrição quase sempre associada aos estudos da avaliação da degradação de rochas no patrimônio construído. O ensaio com o esclerômetro (também chamado de martelo) de Schmidt supera esta dificuldade por ser este equipamento portátil, podendo ser usado tanto *in situ* quanto no laboratório. Além disso é um ensaio barato e de fácil realização. Construído em 1948 pelo engenheiro suíço Ernest Schmidt para o teste de concretos, o martelo de Schmidt, mede o rebote (ou repique) de uma massa padrão, associada a uma mola com rigidez conhecida, que impacta sobre um êmbolo metálico. Este esquema confere uma

energia padrão de impacto contra a superfície a ser testada. Os esclerômetros são fabricados com a possibilidade de escolha de duas diferentes energias de impacto: 2,2 Nm (tipo N) e 0,7 Nm (tipo L). Nos estudos associados ao patrimônio pétreo, costuma-se empregar os esclerômetros do tipo L em razão da sua menor energia de impacto. A Figura 20.8 ilustra esquematicamente a parte interna e o funcionamento do equipamento.

O resultado obtido com o equipamento é um índice chamado de esclerométrico, que está associado com a dureza da superfície testada. Este índice é lido em uma escala no corpo do

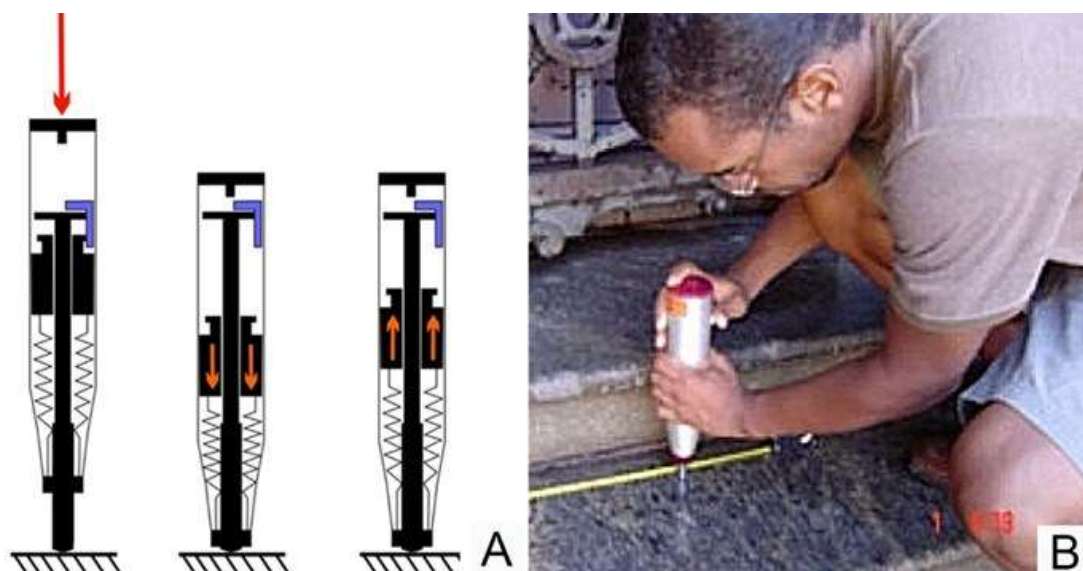


FIGURA 20.8: A. Esquema simplificado de um esclerômetro de Schmidt. O operador empurra o corpo do esclerômetro contra a superfície (seta vermelha) e a mola no interior do equipamento é tracionada; quando o equipamento alcança o fim do curso, a massa é liberada para o impacto (seta laranja para baixo) e após o impacto retorna (seta laranja para cima) conforme a dureza da superfície testada. B. Exemplo de aplicação no patrimônio pétreo (Teatro Municipal do Rio de Janeiro).

equipamento (modelo analógico) ou, nos modelos mais modernos, em um visor digital. O índice esclerométrico é empiricamente relacionado à resistência à compressão uniaxial. Os resultados dos ensaios devem ser interpretados de forma crítica e cuidadosa. Vários autores apresentaram correlações entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão uniaxial para diferentes tipos de rochas: gnaisses e mica xistos (Lassnig et al. 2012), arenitos

e calcários (Katz et al. 2000), gesso (Yilmaz & Sendir 2002), granitos (Tuğrul & Zarif 1999) e granitos em diferentes graus de alteração (Aydin & Basu 2005). A Tabela 20.1 exemplifica algumas destas correlações. As equações de correlação variam de rocha para rocha, e mesmo dentro do mesmo tipo de rocha, a depender do grau de alteração. Portanto, se não se tem dados experimentais de correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à com-

pressão uniaxial da rocha em estudo, o índice esclerométrico deve ser entendido como um dado qualitativo. Ainda assim, trata-se de uma informação bastante valiosa para fins de comparação do estado de conservação entre rochas do mesmo tipo presentes no patrimônio construído. Além deste aspecto fundamental, deve-se estar atento para a área bastante re-

duzida da superfície testada pelo esclerômetro, com mínimo de 10 medidas (ISRM 1981) para fins de representatividade estatística. Destaca-se aqui que este número de medidas pode ser ainda maior no caso de rochas porfíricas ou porfiroblásticas, como é o caso do Gnaiss Faoidal do Rio de Janeiro, cujos K-feldspatos podem alcançar tamanhos em torno de 50 mm.

TABELA 20.1: Algumas equações de correlação entre o índice esclerométrico e a resistência à compressão simples. Note diferentes funções de correlação para o mesmo tipo de rocha.

| Autores               | Tipo de Rocha            | Equação de correlação       |
|-----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Tuğrul & Zarif (1999) | Granito                  | $RCS = 8,36R_L - 416,00$    |
| Aydin & Basu (2005)   | Granitos são e alterados | $RCS = 1,45 e^{(0,07 R_L)}$ |

$RCS$  – Resistência à compressão simples;  $R_L$  – resultado do ensaio com esclerômetro do tipo L.

A realização do ensaio com o esclerômetro é especialmente recomendada para a avaliação de cantarias de rocha, em especial quando se deseja avaliar se o processo de alteração atuante sobre as rochas produziu significativa redução de suas resistências. Este tipo de avaliação torna-se ainda mais relevante quando a cantaria de rochas tem função estrutural na construção (Figura 20.9).

Para um mesmo tipo de esclerômetro, os resultados indiretos de resistência à compressão simples que se obtêm com o esclerômetro de Schmidt dependem do peso específico da rocha testada. Como o processo de alteração leva à geração de vazios (poros e microfraturas) no interior da rocha por processos físicos (e.g. fadiga térmica ou expansão e contração de argilominerais por ciclos de umedecimento e secagem) e químicos (e.g. lixiviação de componentes químicos dos minerais), como consequência do aumento da porosidade, ocorre a redução progressiva do peso específico da rocha, resultando em índices esclerométricos mais baixos.



FIGURA 20.9: Pilar de gnaiss no Mosteiro de São Bento, Rio de Janeiro.

Embora o ensaio seja simples, alguns cuidados devem ser tomados em relação à sua execução no campo. O primeiro deles é que, idealmente, a superfície de teste seja lisa, condição nem sempre encontrada em campo. Portanto, antes da realização do ensaio deve-se observar se nos locais de testes não há ressaltos ou grãos minerais pontiagudos. Estes pontos de ensaio devem ser evitados. Deve-se observar também se as morfologias de alteração presentes na rocha não foram produzidas por destacamento de partes de sua superfície, o que pode indicar fragmentos de rocha soltos e que vão gerar valores esclerométricos anormalmente baixos. Neste caso é comum se escutar um som característico de superfícies ocas. O levantamento sistemático em construções grandes pode levar vários dias. Neste caso, as condições de umidade da rocha em que os testes foram realizados devem ser considerados, especialmente nos casos de rochas com elevada capacidade de absorção de água. A presença da água nos poros, em rochas sedimentares ou rochas magmáticas e metamórficas alteradas, levará à redução do índice esclerométrico medido e dificultará a comparação de resultados obtidos em condições de umidade diferentes. Por fim, é necessário lembrar que o rebote da mola durante o ensaio é influenciado pela aceleração da gravidade, portanto a orientação do esclerômetro tem influência sobre os resultados obtidos. Assim, testes realizados no piso, com o esclerômetro na posição vertical e o repique da mola contra a aceleração da gravidade, apresentarão resultados distintos dos testes realizados nas paredes de uma construção. Esse fato deve ser levado em consideração para a interpretação dos resultados, os quais não são diretamente comparáveis quando realizados com diferentes orientações do equipamento.

Considerando o diâmetro de cerca 15 mm da haste metálica do martelo de Schmidt, a área afetada em cada teste é, em geral, pequena em relação às dimensões da pedra. Portanto, por fornecer uma medida da dureza superficial quase que pontual, testes com o martelo de

Schmidt têm sido realizados com a orientação de uma malha regular de pontos sobre a superfície da pedra. Nestes casos, é possível produzir um mapa da dureza superficial que tem se mostrado interessante para comparação com os mapas das formas de degradação. Esta abordagem foi empregada por Martínez-Martínez et al. (2021), para detectar os danos causados pela cristalização de sais em calcilutito com textura micrítica na Capela Muñoz da Catedral de Santa Maria (Espanha), e por Barroso et al. (2006) para investigar a presença de fraturas não visíveis no gnaiss utilizado na escadaria do Teatro Municipal do Rio de Janeiro.

### Absorção de Água

As rochas são classificadas por sua origem e com base em seus componentes minerais. No entanto, é através da percolação da água através dos seus vazios (poros e microfraturas) que ela interage, química e fisicamente, com a matriz da rocha e induz uma série de processos de degradação: lixiviação, dissolução, cristalização de sais solúveis, e congelamento e degelo. Por ser a água um importante agente da degradação, torna-se necessário avaliar a capacidade da rocha em absorvê-la e transportá-la em seu interior.

A absorção é normalmente referida em ensaios de laboratório como a massa de água absorvida pela rocha, após um tempo padrão em imersão, em relação à massa seca desta mesma rocha. No campo da conservação do patrimônio pétreo, o ensaio *in situ* mais frequentemente utilizado é aquele que se utiliza de um tubo com seção graduada de 5 mL. Este tubo graduado é conhecido como tubo de Karsten, e o método de ensaio como teste do cachimbo. O ensaio pode ser realizado tanto em superfícies verticais quanto em superfícies horizontais. O tubo de Karsten é fixado na superfície da pedra com o auxílio de uma massa de vidraceiro, que é colocada na seção circular localizada na base do tubo. Também pode ser usado o alginato, um hidrocoloide irreversível, com a vantagem de ser mais facilmente remo-

vível (Rodrigues 2012). Estes materiais têm a função adicional de promover a vedação do espaço entre o tubo e a superfície testada, uma vez que as irregularidades quase sempre existentes não permitem um acoplamento perfeito e estanque.

Os dois modelos do tubo de Karsten têm formas diferentes, o primeiro em "L" para superfícies verticais (Figura 20.10A) e o segundo, mais retilíneo, para superfícies horizontais (Figura 20.10B). Após a fixação do tubo na superfície da pedra, seu interior é preenchido com água até que o menisco esteja alinhado com a marca de zero mL. O cronômetro é então dispa-

do e leituras da posição do nível da água são realizadas a intervalos regulares de 5, 10, 15, 20, 30 e 60 min (Rilem 1980). Esta recomendação, com relação aos intervalos de leitura, pode ser modificada se a rocha ensaiada apresentar elevadas taxas de absorção, o que pode ocorrer no caso de rochas muito alteradas. Do ponto de vista físico, a absorção é medida com uma carga hidráulica variável, uma vez que a altura da coluna de água no interior do tubo é decrescente.

O ensaio de absorção é uma forma barata e rápida de se medir o grau de alteração já instalado na pedra (Soares 2009) e, por outro la-

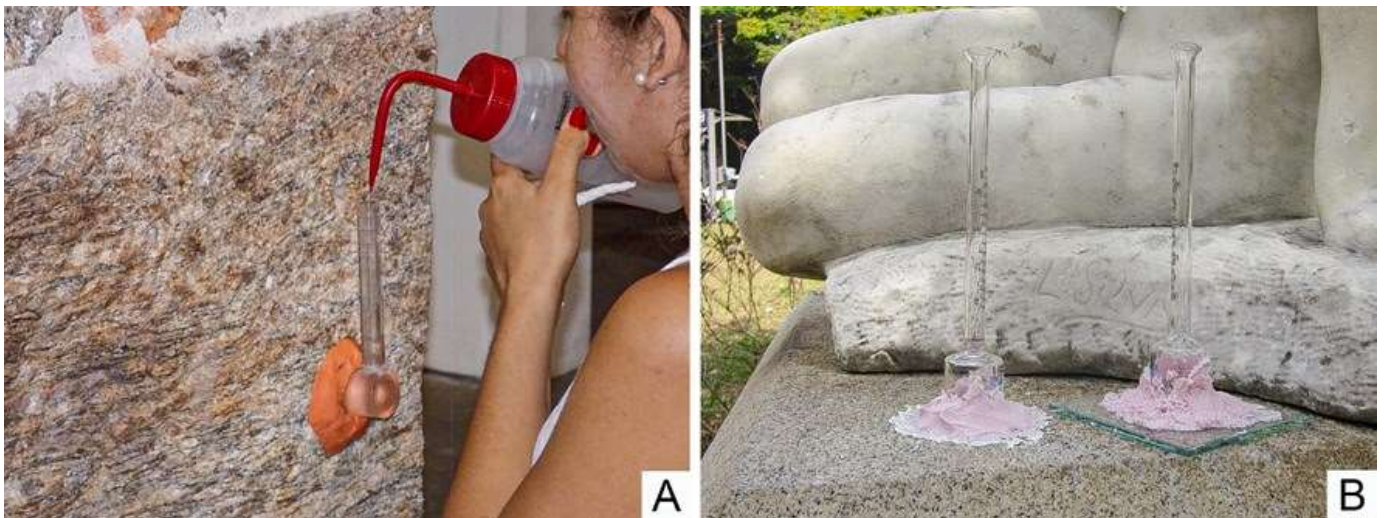


FIGURA 20.10: Modelos de tubos de Karsten para medidas de absorção. A. Superfícies verticais. B. Superfícies horizontais. Fotografia B: Natália Mendonça Rodrigues.

do, é útil para se avaliar a eficácia de intervenções de consolidação da pedra (Celik et al. 2020). Outra característica importante é sua praticidade, uma vez que pode ser executado tanto no campo quanto no laboratório.

Uma das interpretações possíveis para o ensaio é feita a partir do cálculo da inclinação da curva construída em um gráfico onde o eixo das abscissas representa a variável independente tempo e o eixo das ordenadas a variável dependente que corresponde ao volume de

água absorvido pela pedra. Dessa forma a inclinação da curva terá unidade de volume por tempo, que representa a vazão. Maior a vazão, mais água é absorvida pela pedra, significando que o espaço poroso se caracteriza por interconexão entre os poros, estes com grandes gargantas.

Uma outra abordagem é o cálculo da taxa de absorção para o tempo padrão de 10 minutos (Stazi et al. 2016), especialmente útil para materiais que apresentam elevada absorção. Nes-

te ensaio são realizadas leituras da redução do nível da água no interior do tubo a cada minuto, durante 15 minutos. A taxa de absorção de água é calculada pela seguinte equação:

$$C_{10 \text{ min}} = \frac{(m_{15 \text{ min}} - m_{5 \text{ min}})}{(A \times t_{10 \text{ min}})}$$

Na equação acima,  $m_{15 \text{ min}}$  e  $m_{5 \text{ min}}$  são as massas (g) de água absorvidas em 15 e 5 minutos, respectivamente;  $A$  ( $\text{m}^2$ ) é a área de contato entre o tubo e a superfície ensaiada;  $t_{10 \text{ min}}$  é tempo (s) equivalente a 10 minutos de ensaio. Com as unidades apresentadas a taxa de absorção para 10 minutos ( $C_{10 \text{ min}}$ ) é dada por  $\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$ .

Deve-se estar atento para o fato de que o volume de água absorvido pela pedra é dependente da sua umidade prévia à realização do ensaio. Quanto maior for a sua umidade inicial, menor o volume de poros não preenchidos por água e, portanto, menor será a absorção durante o ensaio. Em razão disto, principalmente para o material pétreo exposto no ambiente externo, os dados obtidos para diferentes condições iniciais devem ser comparados com cautela. É o caso de testes realizados em dias secos e sem chuvas nos dias precedentes e outros realizados após chuvas intensas que, eventualmente, tenham provocado o umedecimento da pedra. Outro ponto importante está relacionado com a posição do tubo. No caso de cantarias de pedra, por exemplo, recomenda-se não localizar o tubo em posições muito próximas às extremidades dos blocos, a fim de se evitar a fuga de água pela superfície lateral. Deve-se ainda observar se existem fraturas que interceptam a superfície da rocha. Estas estruturas podem ser condutos hidráulicos e o teste realizado não representará a absorção da matriz da rocha. Ainda com relação ao posicionamento do tubo de Karsten, sua fixação deve garantir que sua posição seja perfeitamente

vertical, caso contrário, a pressão inicial da coluna de água será alterada. No processo de fixação do tubo na superfície, recomenda-se a utilização de um instrumento de nivelamento para garantir a verticalidade. Durante todo o ensaio, a região do contato do tubo com a superfície da pedra deve ser monitorada com relação à estanqueidade. Possíveis vazamentos terão impacto relevante nos resultados obtidos e, se observados, o teste deverá ser interrompido.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto anteriormente, rochas não são materiais ideais e suas propriedades podem apresentar elevada dispersão causada por heterogeneidades e anisotropias intrínsecas. O efeito deletério do intemperismo natural e da degradação acelerada pela ação antrópica se superpõem, e resultam em um meio ainda mais complexo.

Quando a rocha é parte material constituinte do patrimônio, os processos de investigação quanto à conservação exigem um mínimo de obtenção de amostras, quando permitido. Não se pode, com o processo de amostragem excessivo da pedra, causar danos adicionais ao patrimônio, mesmo sob a alegação de se investigar a deterioração do material pétreo. Neste contexto, os testes não destrutivos e realizados *in situ* assumem grande relevância para, em conjunto com as formas de degradação, estabelecer um cenário que descreva fidedignamente as consequências das intrincadas interações entre o material pétreo e as condições do ambiente local.

Os testes não destrutivos aqui apresentados (existem muitos outros) baseiam-se em princípios físicos que devem ser entendidos para que os dados produzidos com estes equipamentos possam ser crítica e criteriosamente avaliados e adequadamente interpretados, caso contrário, não terão valor para a tomada de decisão nos projetos de conservação e restauro.

## REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. 1994. *NBR 8802 - Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica*. Rio de Janeiro, 8 p.
- Aydin A. & Basu A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, **81**(1):1-14.
- Barroso E.V., Silva L., Polivanov H. 2006. Weathering and deterioration evaluation of a Brazilian cultural heritage Building. In: 10th IAEG International Congress. Nottingham, *Proceedings*, Paper number 290, 10 p.
- Berns R.S. 2000. *Principles of Color Technology*. New York, Wiley-Interscience, 3rd ed., 272 p.
- Celik S.E., Gulen J., Viles H.A. 2020. Evaluating the effectiveness of DAP as a consolidant on Turkish building stones. *Construction and Building Materials*, **262**:120765.
- Chung H.W. & Law K.S. 1983 Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. *Concrete International*, **5**(10):42-49.
- Costa D. & Delgado Rodrigues J. 1996. Assessment of colour changes due to treatment products in heterochromatic stones. In: Delgado Rodrigues J. & Costa D. (eds.). *Conservation of granitic rocks*. Lisbon, LNEC, p. 95-101.
- De Kock T, Turmel A., Fronteau G., Cnudde V. 2017. Rock fabric heterogeneity and its influence on the petrophysical properties of a building limestone: Lede stone (Belgium) as an example. *Engineering Geology*, **216**:31-41.
- Del Lama E.A., Dehira L.K., Grossi D., Kuzmickas L. 2016. The colour of the granite that built the city of São Paulo, Brazil. *Color Research and Application*, **41**(3):241-245.
- Delgado Rodrigues J. & Costa D. 2008. The conservation of granite in Évora Cathedral. From laboratory to practice. In: Delgado Rodrigues J. & Mimoso J.M. (eds.). *International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage – research and practice*. Lisbon, LNEC, *Proceedings*, p. 101-110.
- Delgado Rodrigues J. 2015. Defining, mapping and assessing deterioration patterns in stone conservation projects. *Journal of Cultural Heritage*, **16**:267-275.
- Dias L., Rosado T., Candeias A., Mirão J., Caldeira A.T. 2020. A change in composition, a change in colour: The case of limestone sculptures from the Portuguese National Museum of Ancient Art. *Journal of Cultural Heritage*, **42**:255-262.
- Fort R., Mingarro F., López de Azcona M.C., Rodriguez Blanco J. 2000. Chromatic Parameters as Performance Indicators for Stone Cleaning Techniques. *Color Research and Application*, **25**(6):442-446.
- García-Talegon J., Vicente M.A., Vicente-Tavera S., Molina-Ballesteros E. 1998. Assessment of Chromatic Changes Due to Artificial Ageing and/or Conservation Treatments of Sandstones. *Color Research and Application*, **23**(1):46-51.
- Jimenez A.M.S. & Del Lama E.A. 2014. Comportamento de ondas ultrassônicas no Granito Mauá para a conservação do Monumento às Bandeiras. *Geologia USP, Série Científica*, **14**(3):47-60.
- Grossi C.M., Brimblecombe P., Esbert R.M., Alonso F.J. 2007. Color Changes in Architectural Limestones from Pollution and Cleaning. *Color Research and Application*, **32**(4):320-331.
- Icomos - International Scientific Committee for Stone. 2008. *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Icomos, 80 p.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics. 1981. *Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods*. Oxford, Pergamon Press, 211 p.
- Katz O., Reches Z., Roegiers, J.C. 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **37**:723-728.
- La Russa M.F., Fermo P., Comite V., Belfiore C.M., Barca D., Cerioni A., De Santis M., Barbagallo L.F., Ricca M., Ruffolo, S.A. 2017. The Oceanus statue of the Fontana di Trevi (Rome): The analysis of black crust as a tool to investigate the urban air pollution and its impact on the stone degradation. *Science of the Total Environment*, **593-594**:297-309.
- Lassnig K., Entacher M., Biermeier F., Galler R., Ebner F. 2012. Decrease of Schmidt hammer hardness controlled by schistosity orientation of metamorphic rocks after loading with TBM cutters. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **56**:27-33.
- Martínez-Martínez J., Torrero E., Sanz D., Navarro V. 2021. Salt crystallization dynamics in indoor environments: Stone weathering in the Muñoz Chapel of the Cathedral of Santa María (Cuenca, central Spain). *Journal of Cultural Heritage*, **47**:123-132.
- Moses C., Robinson D., Barlow J. 2014. Methods for measuring rock surface weathering and erosion. *Earth-Science Reviews*, **135**:141-161.
- Ortega-Morales O., Montero-Muñoz J.L., Baptista Neto J.A., Beech I.B., Sunner J., Gaularde C. 2019. Deterioration and microbial colonization of cultural heritage stone buildings in polluted and unpolluted tropical and subtropical climates: A meta-analysis. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **143**:104734.
- Piazzetta G.R., Lagoeiro L.E., Figueira I.F.R., Gonçalves M.A.R., Pintaude, G. 2018. Identification of abrasion regimes based on mechanisms of wear on the steel stylus used in the Cerchar abrasiveness test. *Wear*, **410-411**:181-189.
- Plieninger R.J. 2008. Abrasiveness Assessment for Hard Rock Drilling. *Geomechanics and Tunneling*, **1**(1):38-46.
- Prieto B., Sanmartín P., Silva B., Martínez-Verdú F. 2010. Measuring the color of granite rocks: a proposed procedure. *Color Research and Application*, **35**(5):368-375.
- Ribeiro R.P., Paraguassú A.B., Moreiras, S.T.F. 2013. Comparative study between coefficient of dynamic friction and slab surface of Brazilian siliceous dimension stones. *Key Engineering Materials*, **548**:65-71.
- Ricardo A.M., Barroso E.V., Mansur K., Vasquez G.F., Ribeiro, R.C.C. 2017a. Rock decay by salt crystallization and seismic signature. 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. San Francisco, ARMA, *Proceedings*, ARMA 17-360.
- Ricardo A.M., Mansur K.L., Barroso E.V., Senra F., Avellar G., Conceição R.C.R. 2017b. Mapeamento das morfologias de alteração das rochas do Paço Imperial, Rio de Janeiro. *Geologia USP, Série Científica*, **17**(2):44-58.
- Rilem - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux. 1980. *Test No. 11.4. Water absorption under low pressure (pipe method)*. Rilem Commission 25-PEM, Tentative Recommendations.
- Rodrigues N.M. 2012. *Ensaio não destrutivo em monumentos pétreos paulistanos*. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 75 p.
- Rovella N., Aly N., Comite V., Randazzo L., Fermo P., Barca D.,

- de Buergo M.A., La Russa M.F. 2021. The environmental impact of air pollution on the built heritage of historic Cairo (Egypt). *Science of the Total Environment*, **764**:142905.
- Sasse H.S. & Snethlage, R. 1996. Methods for the evaluation of stone conservation treatments. In: Sasse H.S. & Snethlage R. (eds.). *Dahlem Workshop on Saving our Architectural Heritage*. Berlin/Germany, John Wiley & Sons Ltd., p. 223-243.
- Scherer G.W. & Jiménez-González I. 2008. Swelling clays and salt crystallization: damage mechanisms and the role of consolidants. In: Delgado Rodrigues J. & Mimoso J.M. (eds.). *International Symposium Stone Consolidation in Cultural Heritage - research and practice*. Lisbon, LNEC, *Proceedings*, p. 29-39.
- Soares A.A. 2009. *Formas de alteração e avaliação da degradação dos granitos da cantaria da igreja de Santa Rita, Paraty-RJ*. Monografia de Graduação, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 64 p.
- Sohrabi M., Favero-Longo S.E., Perez-Ortega S., Ascaso C., Haghghat Z., Talebian M.H., Fadaei H., de los Ríos A. 2017. Lichen colonization and associated deterioration processes in Pasargadae, UNESCO world heritage site, Iran. *International Biodegradation & Biodegradation*, **117**:171-182.
- Stazi F., Naccia A., Tittarelli F., Pasqualini E., Munafò P. 2016. An experimental study on earth plasters for earthen building protection: the effects of different admixtures and surface treatments. *Journal of Cultural Heritage*, **17**:27-41.
- Sterflinger K. 2010. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biology Reviews*, **24**:47:55.
- Tuğrul A. & Zarif H. 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, **51**(4):303-317.
- Vidal F., Vicente R., Silva J.M. 2019. Review of environmental and air pollution impacts on built heritage: 10 questions on corrosion and soiling effects for urban intervention. *Journal of Cultural Heritage*, **37**:273-295.
- Yılmaz I. & Sendir H. 2002. Correlation of Schmidt hardness with unconfined compressive strength and Young's modulus in gypsum from Sivas (Turkey). *Engineering Geology*, **66**(3-4):211-219.

