DANIELLE GROSSI

Análise do estado de conservação do Monumento a Ramos de
Azevedo com utilização de métodos não destrutivos

Dissertação de Mestrado submetida ao programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo – USP, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Ciências (Geologia).

Área de concentração:
Mineralogia Experimental e Aplicada

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Eliane A. Del Lama

São Paulo
2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Grossi, Danielle

Análise do estado de conservação do Monumento a
Ramos de Azevedo com utilização de métodos não
destrutivos / Danielle Grossi. – São Paulo, 2013

138 p.: il + anexos

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Del Lama, Eliane A.

1. Monumento a Ramos de Azevedo 2. Mineralogia
aplicada 3. Métodos não destrutivos 4. Conservação
de monumentos I. Título

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora a Prof^a Dr^a Eliane A. Del Lama, pela dedicação e paciência com que se dedicou as minhas dúvidas e solicitações, em especial a sua contribuição para meu crescimento científico, profissional e intelectual.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro aos projetos “Análise do estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo com utilização de métodos não destrutivos” (Processo 2011/03728-0) e “A mineralogia aplicada ao estudo da herança cultural” (Processo 2009/02519-8).

Ao Santander pelo auxílio financeiro que proporcionou que uma parte dos estudos fosse realizada na Espanha, na Universidade de Salamanca.

A Prof^a Dr^a Jacinta García Tiegón e ao Prof. Dr. Adolfo C. Iñigo da Universidade de Salamanca pelo auxílio no tratamento dos dados e pela dedicação em minha recepção em Salamanca.

“Ao analisar o que você é, tenha o firme desejo de eliminar suas fraquezas e transformar-se no que deveria ser. Não se permita desanimar com imperfeições que são comumente reveladas através de uma auto-análise sincera”.

Paramahansa Yogananda

RESUMO

GROSSI, D. **Análise do estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo com utilização de métodos não destrutivos**. 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Grande parte dos monumentos, que constituem importantes registros da história da humanidade, é constituída por rochas, sobre as quais atuam processos intempéricos de ordem física e química, principalmente devido à ação do clima. Decorrente da atuação desses processos, essas rochas sofrem alterações que as degradam e colocam em risco a preservação patrimonial, levando, em casos extremos, à perda de parte da própria história da humanidade ou de um determinado local.

Como a grande maioria dos monumentos é tombada e a retirada de amostras nem sempre é viável, a melhor maneira de estudá-los é por meio de métodos não destrutivos.

O Monumento a Ramos de Azevedo, objeto deste estudo, é constituído pelo Granito Itaquera, apresenta também 7 figuras em bronze e está localizado na Praça Ramos de Azevedo, dentro da Cidade Universitária, na cidade de São Paulo.

O estudo do estado de conservação deste monumento com métodos não destrutivos possibilita a verificação do estado de sanidade da rocha sem que a danifique, auxiliando na preservação do patrimônio histórico e cultural. Foram utilizadas técnicas de espectrofotometria, velocidade de onda ultrassônica, esclerômetro, também conhecido como martelo de Schmidt, e tubo de Karsten.

As medições de cor com espectrofotômetro foram realizadas utilizando os parâmetros **L**, **a*** e **b*** do sistema CIELab. Com o equipamento de ultrassom foi calculada a velocidade de propagação das ondas **P** para percorrer o bloco de rocha, por diferentes métodos de acoplagem. Foram utilizados transdutores de 54 e 150 kHz. O esclerômetro foi usado para medir a dureza superficial e esta foi relacionada com a força compressiva uniaxial por meio de curvas de correlação. O tubo de Karsten permitiu medir a absorção de água sob baixa pressão. Os testes foram realizados *in situ* e em laboratório, utilizando amostra fresca.

Os resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas encontrados no monumento, de maneira geral, com ambas as frequências de transdutores pelo método semidireto, foram mais baixos do que os encontrados na amostra fresca.

O esclerômetro foi usado apenas em rocha fresca, devido ao fato do equipamento deixar marcas em superfícies apicoadas como a do monumento. O valor médio encontrado indica baixo grau de alteração.

Nos ensaios com tubo de Karsten, a absorção d'água observada no monumento foi um pouco maior que a encontrada na amostra fresca, com diferença numérica pequena.

Os dados de espectrofotometria foram coletados apenas no monumento devido a dificuldade de deixar a amostra com uma superfície apicuada semelhante ao encontrado *in loco*. Os dados coletados foram comparados com séries medidas anteriormente, e foi observada a diminuição da luminosidade e aumento da cor amarela.

Todos os testes levam a conclusão de que o monumento está em boas condições de conservação, no entanto encontra-se bastante sujo e um pouco amarelado, o que pode ser causado pela degradação da biotita.

Palavras chave: Monumento a Ramos de Azevedo, Granito Itaquera, métodos não destrutivos, conservação de monumentos, mineralogia aplicada.

ABSTRACT

Most monuments, which are important records of mankind, are composed of stones on which physical and chemical processes act, mainly due to climate action. These processes provoke alteration in the stones that degrade and endanger heritage preservation, leading in extreme cases to the loss of part of the history or of a particular site.

The vast majority of the monuments are declared as heritage sites and sample collection is not always possible, so the most feasible way of performing research is using non-destructive method technologies.

The Monument to Ramos de Azevedo, object of this study, is constituted of Itaquera Granite and 7 bronze figures. It is located in Ramos de Azevedo square, on the University of São Paulo Campus, in the city of São Paulo.

The study of monument conservation status, with non-destructive methods, allows one to identify the stone integrity without damaging it, thus assisting with the historical and cultural heritage preservation. A spectrophotometer, a sclerometer (also known as a Schmidt hammer), ultrasound equipment and the Karsten tube were used.

Color measurements were performed with a spectrophotometer, using **L**, **a*** and **b*** parameters from the CIELab system. The P-wave velocities of the stone were calculated with the ultrasound equipment, by different methods of coupling. 54 and 150 kHz transducers were used. The sclerometer was used to measure the surface hardness and the result was related to the uniaxial compressive strength with correlation curves. The Karsten tube allowed for the measurement of water absorption under low pressure. All tests were performed *in situ* and in the laboratory, using fresh samples.

In general, the results of the P-wave velocities found in the monument, with both transducers, by semidirect method, were lower than those found in the fresh samples.

The sclerometer was used only on fresh stone, since the equipment leaves marks on the rough surface of the stone monument. The average value found was 50.25 indicating a low degree of alteration.

In the tests with the Karsten tube, the water absorption observed was slightly higher than the one found in the sample, with small numerical differences.

The data obtained with the spectrophotometer was compared with previously measured series and a decrease in brightness and an increase of the yellow color were observed.

All tests lead to the conclusion that the monument is in good condition, however, somewhat dirty and a little yellowish, which can be caused by biotite degradation.

Keywords: Monument to Ramos de Azevedo, Itaquera Granite, nondestructive methods, conservation of monuments, applied mineralogy.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. OBJETO DE ESTUDO.....	5
3.1. Histórico do monumento.....	5
3.2. Localização do objeto de estudo	13
3.3. Granito Itaquera	14
4. MÉTODOS DE TRABALHO.....	17
4.1. Método de ondas ultrassônicas	17
4.1.1. Introdução.....	17
4.1.2. Método do ultrassom	19
4.1.3. Tipos de ondas	19
4.1.4. Descrição do método ultrassônico	23
4.1.5. Fatores que influenciam os resultados do ensaio.....	26
4.1.6. Vantagens e desvantagens.....	26
4.1.7. Normas Técnicas	26
4.1.8. Exemplos da aplicação do ultrassom em patrimônio histórico.....	29
4.1.9. Metodologia utilizada	38
4.2. Método esclerométrico	42
4.2.1. Introdução.....	42
4.2.2. Descrição do método esclerométrico	43
4.2.3. Vantagens e desvantagens.....	46
4.2.4. Normas Técnicas	47
4.2.5. Revisão bibliográfica sobre esclerometria	52
4.2.6. Exemplos da aplicação do esclerômetro em rochas	56
4.2.7. Metodologia utilizada	60
4.3. Tubo de <i>Karsten</i>	61
4.3.1. Introdução.....	61
4.3.2. Método do tubo de <i>Karsten</i>	62

4.3.3. Descrição do método do tubo de <i>Karsten</i>	65
4.3.4. Fatores que influenciam os resultados do ensaio.....	66
4.3.5. Vantagens e desvantagens.....	67
4.3.6. Normas técnicas	67
4.3.7. Exemplos da aplicação do tubo de Karsten em patrimônio histórico	68
4.3.8. Metodologia utilizada	71
4.4. Espectrofotômetro	72
4.4.1. Introdução.....	72
4.4.2. Método espectrofotométrico.....	75
4.4.3. Vantagens e Desvantagens	79
4.4.4. Normas técnicas	79
4.4.5. Exemplos da aplicação do espectrofotômetro em patrimônio histórico	79
4.4.6. Metodologia utilizada	83
5. RESULTADOS	84
5.1. Resultados ultrassom	84
5.1.1. Face 1 – 54 kHz.....	85
5.1.2. Face 2 – 54 kHz.....	88
5.1.3. Face 3 - 54 kHz.....	91
5.1.4. Bloco Cinza Mauá – Face 3 – 54 kHz	94
5.1.5. Face 4 – 54 kHz.....	95
5.1.6. Face 1 – 150 kHz.....	98
5.1.7. Face 2 – 150 kHz.....	100
5.1.8. Face 3 – 150 kHz.....	102
5.1.9. Bloco de Cinza Mauá – Face 3 – 150 kHz	104
5.1.10. Face 4 – 150 kHz.....	105
5.1.11. Repetição de ensaios.....	107
5.1.12. Granito Itaquera fresco	112
5.2. Resultados esclerômetro	116
5.3. Resultados tubo de <i>Karsten</i>	120

5.4. Resultados Espectrofotômetro	122
6. CONCLUSÕES.....	126
7. REFERÊNCIAS	128

1. INTRODUÇÃO

Na Europa, em países como França, Inglaterra, Portugal, Espanha e Itália, as pesquisas voltadas para a conservação de rochas de cantaria utilizadas em construções, revestimentos e esculturas têm sido realizadas há alguns anos e vem crescendo exponencialmente. Neste campo, os geólogos têm uma grande oportunidade no que se refere a trabalhar com as rochas como mármore, granitos, calcários e arenitos.

No Brasil, este mercado de conservação e preservação está crescendo, mas é ainda pouco conhecido e explorado. Alguns trabalhos foram desenvolvidos nesta área e dentre eles podemos citar Silva e Roesser (2003) que estudaram a pedra sabão no Museu da Inconfidência Mineira, Silva (2005) que estudou a degradação das rochas nas fachadas do Teatro Municipal e do Paço Imperial no Rio de Janeiro, Philipp e Di Benedetti (2007) realizaram a avaliação da deterioração do revestimento de mármore da cúpula da Catedral Metropolitana de Porto Alegre (RS), Reys *et al.* (2007) que realizaram o mapeamento de monumentos históricos na cidade de São Paulo, Silva (2007) que realizou ensaios no pórtico da Igreja do Outeiro da Glória no Rio de Janeiro, Del Lama *et al.* (2008) realizaram o mapeamento das formas de intemperismo do arenito da fachada do Teatro Municipal de São Paulo, Marques *et al.* (2010) que determinaram as propriedades geomecânicas de rochas metamórficas de maior ocorrência na cidade do Rio de Janeiro e Grossi e Del Lama (2012) que realizaram o mapeamento das formas de intemperismo no Monumento a Ramos de Azevedo.

A utilização de rochas como elementos ornamentais e decorativos em esculturas e revestimentos, ou como elementos estruturais, dentre eles colunas e pilares, vem sendo realizada em diversas obras. O início de seu uso foi em tempos remotos. No Brasil, sua utilização é mais recente devido à colonização tardia.

As rochas graníticas, que estão entre as mais elegidas quando disponíveis, tiveram sua importância econômica aumentada devido ao crescimento do mercado de rochas ornamentais e devido a sua alta dureza, que a torna durável, além de sua grande variedade de cores, texturas e estruturas. Com o aumento de sua utilização também cresceram os estudos para compreensão de sua resistência, durabilidade, distribuição das alterações e da necessidade de manutenção principalmente quando são utilizadas em cantaria.

Rochas ornamentais são definidas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como material rochoso natural que é beneficiado (aparelhamento, apicoamento, polimento, escultura ou bruta) para cumprir uma função estética. A mesma associação define a rocha de revestimento como rocha natural utilizada para acabamento de superfícies

como pisos e fachadas na construção civil, tendo sido submetida a variados graus de desdobramento e beneficiamento (Fraschá, 2003).

Ensaio e análises caracterizam essas rochas para que sejam conhecidos seus parâmetros petrográficos, físicos, químicos e mecânicos. Estes estudos garantem que um material de qualidade seja utilizado nas construções, assegurando sua competência e durabilidade (Ribeiro *et al.*, 2007).

Depois que as rochas são utilizadas em edificações e obras artísticas como estátuas, há a necessidade de acompanhar a evolução e o comportamento do material frente aos agentes intempéricos a que este está exposto. Muitas vezes é necessário ainda acompanhar a reação da rocha a determinados tratamentos durante processos de conservação e restauro. A manutenção constante e restauração são necessárias para conservar e salvaguardar monumentos históricos, tanto no que diz respeito ao testemunho histórico, quanto a própria arte neles contida, segundo a Carta de Veneza (1964).

Para a caracterização destas rochas ornamentais após sua utilização em edificações ou obras artísticas, existe muitas vezes, o empecilho da impossibilidade da retirada de material. Isso ocorre principalmente em prédios históricos tombados em que não há material disponível para a substituição de peças. Neste momento é necessário recorrer aos ensaios não destrutivos.

Ensaio não destrutivo é aquele que causa nenhum ou pequenos danos ao material ensaiado que podem ser reparados após o término do método, pois os testes não devem causar danos estruturais, não interferindo na resistência do material (Evangelista, 2002). Estes podem ser classificados de dois modos, sendo o primeiro relativo à medição de propriedades do corpo de prova como resistência, durabilidade e propriedades elásticas dos materiais. O segundo se refere à determinação de vazios, fissuras e teor de umidade do corpo de prova (Buyuksagis e Goktan, 2006).

As técnicas não destrutivas utilizadas em ensaios *in situ* objetivam determinar os materiais utilizados e a técnica empregada em sua aplicação, diagnosticar alterações e suas causas, bem como selecionar o melhor método de intervenção (Tavares e Veiga, 2007; Flores-Colen *et al.*, 2009). Para uma melhor avaliação do nível de desempenho de uma rocha a um determinado tratamento, aos poluentes ou mesmo aos agentes intempéricos, o ideal seria combinar os resultados obtidos com o uso de diferentes técnicas de ensaio *in situ*, com ensaios realizados em laboratório.

O processo natural de intemperismo produz progressivas mudanças químicas, mineralógicas e físicas e, portanto, alterações nas propriedades microestruturais nas rochas que estão expostas e até mesmo nas que estão em pequenas profundidades. Na região sudeste do Brasil, com seu clima subtropical, o intemperismo químico é o processo

dominante, principalmente em rochas com descontinuidades (Basu *et al.*, 2009). Tal fato é ainda agravado devido à grande atividade industrial desta região.

A água tem sido associada a processos de degradação que afetam os materiais de alvenaria. A sua presença no interior dos poros pode resultar na destruição física, se o material sofre ciclos de umedecimento e secagem ou congelamento e descongelamento. Este último é particularmente prejudicial se o material, seja ele alvenaria ou rocha, tem um alto conteúdo de minerais de argila. A presença de umidade é uma condição necessária para a maioria dos processos de deterioração. Alguns exemplos: gases poluentes são prejudiciais quando são dissolvidos em água, fenômenos de eflorescência dependem da migração dos sais dissolvidos na água e umidade é um requisito para o crescimento de organismos biológicos. Devido a estes fatores, a absorção de água de um material de alvenaria está relacionada com a sua durabilidade (RILEM, 1980 *apud* Apps, 2011).

Outras substâncias que aceleram o intemperismo em rochas são os sais solúveis como sulfatos, cloretos e nitratos. Estes sais causam problemas quando passam por períodos de umedecimento e secagem e por ciclos de aquecimento e resfriamento, devido a sua expansão e contração. Sais também atuam alterando a textura e estrutura da rocha. Quanto maior o tamanho dos poros e maior a umidade do local, maior a interação entre esses sais e a rocha (Grossi *et al.*, 1996).

A vida útil de um edifício ou monumento é definida pelo período de tempo após a sua construção, em que os seus elementos, principalmente os estruturais igualam ou excedem as exigências funcionais de desempenho (ISO, 2000 *apud* Apps, 2011). A intensidade dos agentes intempéricos a que está exposta a construção determina o desenvolvimento da degradação e seu tempo de vida útil.

Neste contexto, a presente dissertação está orientada para o estudo do estado de degradação do Monumento a Ramos de Azevedo e a utilização de técnicas não destrutivas para sua caracterização.

2. OBJETIVOS

Esta dissertação objetiva avaliar o estado atual de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo com técnicas não destrutivas.

A caracterização foi realizada por meio das técnicas de absorção de água com a utilização do Tubo de Karsten, verificação da coesão do material por meio do cálculo da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas utilizando equipamento de ultrassom, medição da cor da superfície com a utilização de espectrofotômetro e medição da dureza superficial utilizando esclerômetro.

A investigação com espectrofotômetro vem sendo realizada num estudo contínuo neste monumento desde o ano de 2009, com o intuito de avaliar a modificação da cor devido à sujeira e a degradação mineral, com o passar do tempo.

Através destes estudos pretende-se contribuir para a melhoria do diagnóstico do grau de intemperismo de rochas ornamentais por meio de técnicas não destrutivas.

3. OBJETO DE ESTUDO

3.1. Histórico do monumento

O Monumento a Ramos de Azevedo (Figura 1) foi uma obra de iniciativa dos empreiteiros, mestres de obras e operários que trabalharam com Ramos de Azevedo para homenageá-lo após sua morte, aos 77 anos. A concorrência aberta, que ocorreu por volta de 1929, teve como vencedor e realizador da obra o pintor, escultor e arquiteto Galileo Emendabili, nascido na Itália em 1898, e que em 1923 imigrou para o Brasil. Já a Folha de São Paulo de 10 de outubro de 1972 relata que a iniciativa para a construção do monumento, bem como a arrecadação do dinheiro, 1.040 contos de réis, foi feita pelos funcionários e alunos do Liceu de Artes e Ofícios, em 1928, logo após o falecimento de seu diretor, Ramos de Azevedo. Para a arrecadação do montante, foi estabelecida a Comissão Promotora da Construção ao Monumento Ramos de Azevedo, de acordo com um modelo de procedimento estabelecido na França na década de 1880, tendo como presidente Luís Scattolin, e como conselheiros Pedro Susanna e Antonio Ambroggi. O júri foi composto por sete membros: J. Pires do Rio, prefeito da capital; Prof. Corrêa Lima, diretor da Escola Nacional de Belas Artes do Rio de Janeiro; Ricardo Severo, diretor interino do Liceu de Artes e Ofícios; Luiz Anhaia Mello, vice-diretor da Escola Politécnica; Godofredo Silva Telles, vereador municipal; Comm. Ferruccio Rubiani, presidente da Sociedade “Muse Italiche”; Cav. Arnaldo Mercozzi, professor e decorador (Martins, 2006). Essa Comissão se encarregava de atividades paralelas e de apoio à construção, assumindo todas as responsabilidades, realizando subscrições, estabelecendo normas no edital de concorrência, promovendo o concurso, fiscalizando o andamento das obras e escolhendo o local de implantação do monumento e tendo suas atividades encerradas com a prestação de contas, momento no qual foi impressa uma brochura com os nomes dos subscritores e a soma com a qual cada um deles contribuiu (Zimmermann, 2000).

Figura 1 - Maquete do primeiro projeto para o Monumento a Ramos de Azevedo, 1929 (Arquivo: Fiammetta Emendabili).

O monumento, que demorou cinco anos para ser construído (Figura 2), foi inaugurado em 25 de janeiro de 1934, aniversário da cidade (mostrando a íntima relação do arquiteto com o ar moderno e civilizado que São Paulo adquiriu com seu trabalho), durante a Gestão do Prefeito Antônio Carlos Assunção. O monumento foi instalado na Avenida Tiradentes (Figura 3) em frente à Pinacoteca, sede do Liceu de Artes e Ofícios, onde permaneceu até 1967, quando foi retirado pela Indústria Eletromecânica S. A. (IEMSA) devido a obras da linha norte-sul do metrô e alargamento da Avenida Tiradentes (Diário Popular, 18 de maio de 1997; Martins, 2006).

O monumento servia ao propósito educativo, na visão de Mário de Andrade:

[...] só vejo um jeito do monumento ser educativo: é pela grandiosidade obstruente e incomodatória. O monumento, pra chamar a atenção de verdade, o monumento que obriga a gente a parar, não pode fazer parte da rua. O monumento tem que atrapalhar.

Figura 2 - Fundações do Monumento a Ramos de Azevedo na Avenida Tiradentes, 8 de julho de 1932 (Arquivo: Fiammetta Emendabili).

Figura 3 - Monumento na Avenida Tiradentes (Fonte: Acervo São Paulo).

Antes da inauguração, o filho de Ramos de Azevedo visitou o monumento, que ainda estava coberto por tapumes, ficou indignado e quis saber por que Galileo representara seu pai com *beijola de negro*. Galileo respondeu a ele dizendo que havia reproduzido seu pai como ele era, pois o conheceu pessoalmente. Ramos de Azevedo possuía ascendência

negra por parte de mãe e viveu toda sua vida sem que isso atrapalhasse sua ascensão na sociedade extremamente racista da época (Martins, 2006).

Durante sua inauguração, a única voz destoante foi a de Mário de Andrade dizendo: “[...] os monumentos de nada valem, pois o homenageado é logo esquecido e só funcionam quando incomodam [...]”.

O monumento é composto por oito colunas dóricas em Granito Itaquera sustentadas por uma arquitrave, que por sua vez sustenta um cavalo alado em bronze, tendo uma altura total a partir do solo de 25 metros. Na época, São Paulo não possuía monumentos em grandes proporções como este. Na parte anterior da base encontram-se duas figuras femininas representando a *engenharia* e a *escultura*. Na parte posterior estão outras duas figuras femininas, símbolos da *pintura* e da *arquitetura*. À direita está a estátua de Ramos de Azevedo, que “está praticamente sentado, estudando, traçando a campanha desse outro exército de operários, que não são soldados destruidores, mas construtores de cidades e, como esses, humildemente à beira dos alicerces de todas as grandes obras sociais ou de artes...” (Gordinho, 2000). Na mesma altura e em lado oposto estão os *construtores*, representando a luta diária. A parte inferior é dedicada à prática e tangível da obra do arquiteto e a superior é apoteótica, onde está localizado o cavalo alado (Pégasus) sobre a arquitrave, representando o progresso. A figura que está por cima representa o espírito animador de Ramos de Azevedo e o homem alcançando regiões sublimes e triunfando sobre as forças da perversão e da ignorância. Em suas mãos está uma esfera, que é símbolo da força universal, sobre a qual está uma deusa grega alada, representado, por sua vez, a criação. Essa figura superior, com todos seus atributos, representa, em linhas gerais, o progresso humano e sua vitória sobre os obstáculos que interpõem seu caminho. Todo o monumento está sobre uma base do mesmo granito das colunas, com dimensões de 5,60 x 15,50 x 13 m. Toda a parte de granito foi fornecida pela Empresa Irmãos Incerpi (Comissão de Patrimônio Cultural, 1997; Gordinho, 2000).

Na face voltada para noroeste, há um bloco da base que foi substituído pelo Granito Cinza Mauá, não tendo sido encontrado nenhum registro deste reparo. Este granito foi estudado e descrito petrograficamente por Alves (2009) e ensaios de propagação de ondas ultrassônicas foram realizados por Gimenez (2012).

Quanto à figura de Ramos de Azevedo, Emendabili escreve no memorial (Emendabili, 1929):

Na estátua, procurei e creio ter conseguido reproduzir, da maneira mais realística possível, sem esquecer, porém, os preceitos da arte sã, a figura típica e majestosa do Arquiteto máximo de São Paulo; a cabeça é o seu retrato representado de maneira vigorosa, e a sua postura é, praticamente, a mesma que o Ilustre Construtor adotava normalmente nos dias de sua vida, seja na intimidade, em conversação amigável com

peças gradas, seja em seu gabinete de trabalho, ou em suas construções, ao analisar a execução que se ia dando aos seus planos grandiosos. [...]

Como na maioria dos monumentos do século XIX e início do século XX, o Monumento a Ramos de Azevedo também é caracterizado por dois registros estilísticos: um realista, que é utilizado na construção da figura do homenageado e outro clássico, utilizado nas alegorias para demonstrar os feitos do homenageado (Fabris, 1997).

Nas laterais da base que o sustentam, estão gravados, em baixo relevo, os dizeres a seguir:

De um lado:

Base do grupo superior:

ARS LONGA

VITA BREVIS

Base inferior:

FRANCISCO DE PAVLA RAMOS DE AZEVEDO

QUI AB ANNO MDCCCLXXIX

AD MCMXXVIII VSQUE

VIVIDA INGENI ASCIE

INSTRAVRANDAE PAVLIANAE METROPOLI

AD ARCHITECTONICAS RATIONES

STRENVE AD LABORAVIT

Do outro lado:

Base do grupo superior:

AGE

QUOD AGIS

Base inferior:

MONUMENTVM HOC

AERE POPVLI COLLATO

AMICI COLEGAEQVE

POSVERE

ANNO DOMINI MCMXXXIV

O monumento sofreu algumas alterações desde seu projeto até sua execução. Podemos citar dentre elas o número de colunas, que eram dez no projeto e se tornaram oito na execução. Tal alteração ocorreu porque foi acrescentada uma estrutura horizontal abaixo

da figura do *Progresso*. Outra alteração considerável foi a substituição do grupo dos lutadores, que simbolizaria a luta do homenageado para impor uma nova norma para construção no âmbito da arquitetura, pelo dos construtores, mostrando melhor o empenho pessoal e modernizador de Ramos de Azevedo. Tais alterações foram aprovadas por membros do júri, conforme recorte de jornal guardado por Emendabili e pelo contrato de execução que previa o pagamento de 5:200\$000 a Emendabili pelas modificações e aumento no tamanho das quatro alegorias (escultura, pintura, arquitetura e engenharia) e da estátua de Ramos de Azevedo. Com essas alterações o monumento passou de uma homenagem a Ramos de Azevedo a uma exaltação ao progresso (Fabris, 1997).

Na época do concurso para a escolha do escultor que realizaria a construção do monumento, Emendabili recebeu críticas negativas por Silveira Bueno, que disse que sua obra tinha muita coisa para emendar (Figura 4) na concepção da ideia e da execução, fazendo uma alusão ao seu sobrenome. Já Nino Daniele, considerou uma das melhores obras, mesmo não a considerando mais adequada para homenagear um arquiteto. Um dos críticos, Raul de Polillo, que reconhecia a inexperiência das comissões que cuidavam de todos os detalhes para a construção do monumento, principalmente em relação à elaboração de editais, dando margem a muitas interpretações, elogiou a grande prudência com o qual este foi realizado. Menotti Del Picchia, em sua coluna, chamou a atenção do poder público por permitir a inauguração de monumentos que seriam lições perpétuas de arte pública, atentando para a necessidade de haver alguém capacitado no setor da arte para dar um parecer técnico sobre o assunto.

Após a sua construção e inauguração, as críticas passaram a ser positivas. O *Corriere degli Italiani* resalta a beleza dórica de seu estilo, Tito Tuccimei diz que as estátuas são ecos de Michelangelo e que a base das quatro alegorias possui fatura excelente, Raul de Polillo, um dos avaliadores do concurso, satisfeito com a realização de sua *profecia*, diz que o monumento vai além de sua finalidade objetiva, sendo um símbolo. A Comissão promotora do concurso, satisfeita com o trabalho de Emendabili, avalia seu trabalho como valiosa obra de arte, digna do progresso de São Paulo.

Essa mudança de comportamento dos críticos, bem como a justificativa da construção do monumento, são explicadas pela lógica da *tradição inventada*, que é um conjunto de práticas, de natureza ritual ou simbólica, que visam inserir determinados valores através da repetição, estabelecendo uma linha contínua entre presente e passado, além da coesão social (Hobsbawn, 1984).

Figura 4 - Desenho em perspectiva do primeiro projeto para o Monumento a Ramos de Azevedo, 1929 (Arquivo: Fiammetta Emendabili).

Em 1952, durante a administração de Armando Arruda Pereira cogitou-se a redução do monumento e doação do cavalo ao Jockey, reduzindo-o a figura de Ramos de Azevedo para que ele não mais atrapalhasse.

Após sua transferência em 1967, o monumento permaneceu abandonado durante anos no Jardim da Luz, onde a estátua de Ramos de Azevedo chegou até a perder um dedo, as alegorias perderam alguns atributos, como o compasso da *arquitetura*, os pincéis da *pintura* e o cinzel plano da *escultura*, mostrando, que mesmo uma pessoa emblemática e associada ao progresso cai rapidamente em esquecimento (Fabris, 1997).

Por iniciativa de José Carlos de Figueiredo Ferraz, então prefeito de São Paulo, ex-aluno e também professor da Escola Politécnica, em agosto de 1972, a prefeitura de São Paulo abriu concorrência para a recuperação e transporte do monumento até a Cidade Universitária, próximo à Escola Politécnica, onde se encontra até hoje (Figura 5). Tal local foi escolhido numa tentativa de recuperar, de certa forma, o seu significado simbólico original. Para tal realocação foram destinados Cr\$ 1.000.000,00 (um milhão de cruzeiros) devido ao peso e material da obra, segundo a Folha de São Paulo de 12 de agosto de 1972. A empresa vencedora foi a Sergus Engenharia e Comércio Ltda. (Fabris, 1997). A remontagem exigiu a reconvocação do arquiteto e do escultor da época. A demora na montagem do monumento na Cidade Universitária foi devido ao medo de haver problemas no momento da justaposição das peças. O serviço de cantaria passou por muitas dificuldades por não encontrar mão de obra especializada para sua realização, sendo

picotadas as peças de granito, que já haviam sido danificadas pelo tempo. Emendabili, que falece em 14 de janeiro de 1974, antes de ver o resultado final da remontagem, sugere o uso da *pícola*, um martelo dentado, que dá o aspecto granulado a rocha para que o resultado esperado seja atingido. Em 17 de dezembro de 1975 o monumento é reinaugurado e a praça que o recebe é batizada com o nome do arquiteto (O Diário Popular, 17 de dezembro de 1975).

Figura 5 – Monumento a Ramos de Azevedo na Cidade Universitária.

Em 12 de fevereiro de 1988, o então prefeito Jânio Quadros solicita a José Goldenberg, reitor da Universidade de São Paulo, a devolução do monumento, alegando que este se encontra em local que não afina com a imponência da escultura, cabendo à prefeitura encontrar local aprazível à grandiosidade da obra. A ideia da prefeitura era a de deslocar o monumento 14 bis em 500 metros e colocar o monumento a Ramos de Azevedo na Praça Campo de Bagatelle, local onde ele se dirigia para contemplar a expansão urbana de São Paulo. Nestor Goulart dos Reis Filho, Fundusp e a Prefeitura da Cidade Universitária concordam com a devolução, porém, esta não segue adiante.

Em 15 de abril de 1997 ocorreu na Pinacoteca do Estado a exposição iconográfica intitulada *Monumento a Ramos de Azevedo: do concurso ao exílio* que foi uma forma de restaurar simbolicamente o monumento e seu local de origem, mostrando sua trajetória, a partir de 100 fotografias e documentos reunidos pela curadora Silvana Brunelli, como mostra

o Jornal da Tarde de 14 de abril de 1997. Durante a comparação entre fotos do monumento em seu lugar original com a sua remontagem, Silvana percebeu que a remontagem não obedeceu ao projeto inicial, sendo que a alegoria da *engenharia* foi colocada ao lado dos construtores e a da *escultura* está próxima a Ramos de Azevedo.

Em 1980 o monumento passou por novas modificações as quais não foram especificadas e descritas (Comissão de Patrimônio Cultural, 1997).

Devido a sua grande importância na arquitetura e engenharia de grandes construções, principalmente no centro de São Paulo, em obras como Teatro Municipal, antigo Instituto Caetano de Campos, Caixa Econômica Estadual, Secretaria de Agricultura (Bolsa de Valores), Portal do Cemitério da Consolação e a antiga Escola Politécnica (situada na Praça Fernando Prestes, próxima ao Parque da Luz), Francisco de Paula Ramos de Azevedo, um dos fundadores e primeiro diretor da Escola Politécnica, foi considerado um dos atores da transformação e modernização da cidade de São Paulo, inserindo nela a arquitetura com inspiração europeia, principalmente na época da República Velha e da República do Café (Comissão de Patrimônio Cultural, 1997; Martins, 2006).

As pessoas que conviveram com o Monumento a Ramos de Azevedo conhecem o seu significado, mesmo que não seja de modo profundo e tem por ele um afeto que se desenvolveu durante as situações que a pessoa viveu quando passava pelo local. Hoje não há essa conotação dentro da cidade universitária, pois as pessoas que por ali circulam não acompanharam ou mesmo não conhecem sua trajetória (Fabris, 1997).

3.2. Localização do objeto de estudo

O Monumento a Ramos de Azevedo está localizado dentro da Cidade Universitária, na cidade de São Paulo (Figura 6).

Figura 6 - Delimitação da área estudada (Fonte: Google Maps).

3.3. Granito Itaquera

Este granito foi largamente utilizado no começo do século 20 e na cidade de São Paulo encontramos diversos monumentos que utilizaram esta rocha, dentre eles: pedestal de *A Menina* e o *Bezerro*, *Aretuza*, *Fauno*, *Depois do Banho*, *Nostalgia*, *O Ceifador*, em parte da Igreja São Bento, na base do Teatro Municipal de São Paulo, no pórtico da entrada do Cemitério da Consolação e no Monumento a Ramos de Azevedo (Figura 7a). Gradativamente a utilização desta rocha foi diminuindo e em seu lugar passou a ser utilizado o Granito Cinza Mauá (Del Lama *et al.*, 2009). Não se sabe ao certo o motivo desta substituição, mas como causa provável podemos citar melhor desempenho do Mauá e a exaustão da Pedreira Itaquera em 1999, que há alguns anos extraía apenas brita e não mais blocos para rochas ornamentais e paralelepípedos.

Figura 7a – Granito Itaquera do Monumento a Ramos de Azevedo, em detalhe.

A análise petrográfica do Granito Itaquera é encontrada em Augusto (2009) e Del Lama *et al.* (2009) e citam que este possui coloração cinza, granulação inequigranular seriada, com cristais que variam de 0,2 até 2 mm. Possui pequena anisotropia devido à estrutura levemente orientada. São comuns enclaves micáceos de dimensões centimétricas. Denomina-se biotita monzogranito pelo diagrama QFAP (quartzo, feldspatoide, feldspato alcalino e plagioclásio). Sua composição é oligoclásio (38%), microclínio (33%), quartzo (18%) e biotita (9%). Como minerais acessórios foram encontrados titanita (1%) e como elementos traço zircão, apatita e opacos. Como mineral secundário epidoto.

O hábito do oligoclásio é subédrico, ou seja, com faces incompletas, cristais subtabulares, que muitas vezes apresentam-se zonados variando de 1 a 5 mm. Seus grãos possuem, localmente, lamelas de geminação curvas que indicam deformação.

É observada grande variação granulométrica (submilimétrico até 1 cm) nos cristais de microclínio. Possui geminação marcante em grade e alguns cristais são pertíticos.

O quartzo ocorre como cristais anedrais. Em alguns cristais nota-se extinção ondulante, que é o desenvolvimento de subgrãos por recristalização, formando grãos menores, de submilimétricos até 1 mm.

Os cristais de biotita indicam baixa temperatura de cristalização devido a sua coloração de verde a verde amarronzada e apresentam-se curvos. Estes cristais apresentam-se corroídos e com tamanhos de submilimétrico a 2 mm.

O epidoto tem hábito granular, está associado à biotita e encontra-se disperso por toda a rocha. Ocorre em agregados granulares e preenchendo fraturas. Os cristais são minúsculos e chegam a 0,5 mm.

A titanita ocorre com sua forma característica, como cristais losangulares bem formados. Seus cristais apresentam diâmetros que variam de 0,5 mm a 1,5 mm. Aparece abundantemente quando associada ao epidoto e à biotita. Porém pode ocorrer como inclusão no microclínio.

O zircão apresenta halos pleocróicos devido a sua ocorrência como inclusão em biotitas.

A apatita apresenta-se como cristais hexagonais e prismáticos, sendo comumente encontrada associada à biotita.

Em inclusões na biotita aparecem cristais de zircão, gerando halos que variam de cor (pleocroísmo) devido à desintegração de elementos radioativos contidos no zircão.

A clorita substitui a biotita nas bordas de seus cristais, como alteração.

Seus minerais indicam que houve alteração hidrotermal, indicada pela extinção ondulante e recristalização do quartzo, lamelas de geminação curvas do plagioclásio, cristais de biotita curvos e pela relativa abundância de epidoto e saussuritização do plagioclásio (Figura 7b).

Figura 7b – (A) Plagioclásio zonado. Nicóis cruzados. (B) Epidotização do plagioclásio. Nicóis cruzados (Del Lama *et al.*, 2009).

4. MÉTODOS DE TRABALHO

Nesta pesquisa foram utilizados apenas métodos não destrutivos como esclerometria, espectrofotometria, ondas ultrassônicas e tubo de Karsten devido ao monumento ser tombado e a retirada de partes para estudos causar danos estéticos. Os métodos não destrutivos têm sido uma ferramenta bastante utilizada por conservadores-restauradores devido a sua facilidade de aplicação tanto *in situ* como em laboratório, consistência dos dados obtidos, e claro, por não ser necessário coleta de amostras *in situ*.

4.1. Método de ondas ultrassônicas

4.1.1. Introdução

O uso do ultrassom como ferramenta para avaliação de materiais, inclusive pétreos é de grande relevância, principalmente se considerarmos as peças de pequenas dimensões feitas em pedra, nas quais qualquer tipo de retirada de material modificará negativamente a aparência da obra ou ainda em obras tombadas onde a retirada de material não é permitida. A técnica de medição de velocidade de ondas ultrassônicas é largamente utilizada na Europa, onde os estudos estão mais avançados e o campo da conservação possui grande incentivo.

Ao serem expostas aos processos intempéricos (químicos, físicos e biológicos), as rochas são degradadas.

Como processos de ordem química podem-se citar a chuva ácida, deposição de poluentes e infiltração de água. Dentre os físicos estão: incêndio, cristalização de sais (físico-químico) e congelamento de água em fraturas e fissuras. Nos biológicos os mais comuns são o crescimento de plantas superiores e raízes (biofísico) e dissolução da rocha por bactérias (bioquímico).

Um dos modos de avaliar as consequências físicas desses processos, que causam decaimento das rochas em construções e monumentos históricos com valor artístico ou cultural, é o ultrassom. Tal técnica é amplamente recomendada devido à inexistência da necessidade de coletar material como é necessário em métodos de análise petrográfica e *Drill Resistance Measurement System*. Essa última técnica é bastante utilizada na Europa e

alguns autores chegam a citá-la como a técnica mais comum utilizada para avaliação de peças históricas e também para avaliar mecanismos de degradação como ciclos de congelamento ou processos de cristalização de sais (Valdeón *et al.*, 1992; Papida *et al.*, 2000), sendo este último, o mais comum no Brasil. Testes ultrassônicos são ideais para quantificar danos nas rochas, principalmente se combinados a outros dados (Myrin e Malaga, 2008).

Antigamente eram utilizados dados do núcleo da rocha, mas atualmente estão sendo utilizadas as ondas superficiais para avaliar a camada de deterioração que se forma na superfície devido à ação das intempéries.

A análise de uma rocha por meio de ondas ultrassônicas é mais completa quando, juntamente com o valor da velocidade, for realizada a análise do sinal digital, que fornece mais informações como, por exemplo, o centro de frequência do espectro. Estes parâmetros mostram pequenas mudanças, que podem ser características das rochas. A atenuação das ondas ultrassônicas é recomendada principalmente quando empreendidos estudos sobre o decaimento de rochas em construções. A amplitude das ondas e a variação de velocidade são parâmetros que identificam processos progressivos de degradação e mecanismos de deterioração. A magnitude de atenuação mostra pequenas mudanças nas características físicas das rochas, especialmente anisotropia e tamanho do grão. Para isso é necessário comparar os valores da rocha medida com os valores da rocha fresca (Valdeón *et al.*, 1992). Ondas S não são tão precisas quanto as ondas compressionais (P) devido à dificuldade em determinar o momento de sua chegada no receptor. Dados das ondas P são suficientes para revelar o estado de deterioração das rochas. Para utilizar as ondas S como parâmetro, seria necessário utilizar equipamentos mais sofisticados que o ultrassom (Myrin e Malaga, 2008).

Os valores da velocidade da onda ultrassônica são dependentes de características físicas das rochas como homogeneidade, densidade, porosidade e saturação por água. Devido a essa característica, esses fatores devem ser considerados no momento da avaliação do resultado de uma medição ultrassônica. A diminuição da velocidade ultrassônica provém de descontinuidades ou obstáculos no caminho de sua propagação (Papida *et al.*, 2000; Kahraman, 2002). Os pequenos defeitos nas rochas, da ordem de milímetros, podem ser detectados quanto maior for a frequência do aparelho, preferencialmente acima de 500 kHz. Este método pode ser utilizado para verificar o comportamento físico de rochas frente a tratamentos por ácidos ou consolidantes (Myrin e Malaga, 2008).

Os dados de rochas tratadas com consolidantes servem para verificar a profundidade de penetração do produto e se este preencheu os poros. Quando consolidantes são aplicados, é interessante que penetrem o máximo possível para tornar aquela capa de rocha

que está se desagregando em algo firme e que resista melhor ao tempo, e que aumente sua durabilidade. As ondas ultrassônicas são capazes de demonstrar a eficácia do tratamento (Rossi-Maranesi e Tucci, 1983; Delgado-Rodrigues e Costa, 1996).

Juntamente com o teste de ultrassom, duas outras técnicas que podem ser realizadas em campo são importantes para a avaliação física da rocha: análise visual do material e ensaio de permeabilidade. Em condições laboratoriais, o equipamento de ultrassom oferece grande facilidade de utilização, devido à realização em condições ideais (Myrin e Malaga, 2008).

O método de medição de velocidade ultrassônica é utilizado em diversas áreas sempre com o objetivo de avaliar o estado interno de determinado material (Papida *et al.*, 2000). Atualmente ele tem sido utilizado em diversos materiais como madeira (Pelizan, 2004), rochas, concreto e cimento (Martins, 2008).

4.1.2. Método do ultrassom

As primeiras aplicações de ondas ultrassônicas foram realizadas em 1929 pelo cientista Sokolov em materiais metálicos, seguido por Firestone em 1942. A utilização desta tecnologia em escala industrial iniciou-se em 1945 pela necessidade de maior qualidade e certeza na produção de peças para carros e maquinários industriais. Na década de 60 a tecnologia evoluiu e foi desenvolvido um equipamento portátil com visor digital para mostrar o tempo de trânsito (Evangelista, 2002).

Atualmente o equipamento de ultrassom tem sido muito utilizado na área de geologia de engenharia para caracterização de massas rochosas, na exploração mineral, nas operações de mineração, bem como na investigação de sítios. Pode ainda ser utilizado para detectar e localizar características irregulares em corpos homogêneos e estimar o grau de fraturamento em massas rochosas (King, 1983).

4.1.3. Tipos de ondas

Ondas elásticas podem ser divididas, grosso modo, em ondas volumétricas, que são aquelas que percorrem o interior do corpo sólido e as ondas superficiais, que como o próprio nome sugere, se propagam na superfície do material.

As ondas volumétricas podem ser classificadas em dois tipos principais:

- Ondas longitudinais ou de compressão (P): são ondas nas quais as partículas se movimentam no mesmo sentido da propagação da onda (Figura 8), tendo alta velocidade de transmissão. Podem se propagar em sólidos, líquidos e gases. Como estas ondas são as primeiras a chegar, por se propagarem rapidamente, elas nos permitem avaliar melhor o material. Este tipo de onda é o objeto de estudo dentro dos ensaios de ondas ultrassônicas.

Figura 8 - Ondas longitudinais (Andreucci, 2002).

A velocidade de propagação das ondas P já é conhecida para alguns materiais (Tabela 1).

Tabela 1 - Velocidades de propagação das ondas longitudinais (modificado de Andreucci, 2002).

Material	Velocidade (km/s)
Ar	0,33
Alumínio	6,3
Cobre	4,7
Ouro	3,2
Aço	5,9
Aço	5,8
Aço fundido	4,8
Nylon	2,6
Óleo (SAE 30)	1,7
Água	1,5
Prata	3,6
Titânio	6,1
Níquel	5,6
Tungstênio	5,2
Magnésio	5,8
Acrílico	2,7

- Ondas transversais ou de cisalhamento (S): nestas ondas, as partículas do material se movimentam perpendicularmente à direção de propagação da onda (Figura 9). Estas só se propagam em meios sólidos.

Figura 9 - Ondas transversais (Andreucci, 2002).

Também são conhecidos valores das velocidades das ondas transversais (S) para alguns materiais (Tabela 2).

Tabela 2 - Velocidade de propagação das ondas transversais (modificado de Andreucci, 2002).

Material	Velocidade (km/s)
Ar	-
Alumínio	3,1
Cobre	2,3
Acrílico	1,1
Ouro	1,2
Aço	3,2
Aço	3,1
Aço fundido	2,4
Nylon	1,1
Óleo (SAE) 30)	-
Água	-
Prata	1,6
Titânio	3,1
Níquel	3,0
Magnésio	3,0

Dentre as ondas superficiais, podemos citar as ondas de Rayleigh (R), as quais possuem complexo movimento oscilatório. E as ondas *Lamb* que são ondas que podem ser geradas a partir de ondas P.

Outra característica das ondas é que elas possuem frequência, amplitude, comprimento e velocidade. Frequência é quantas vezes uma onda se repete e pode ser medida em ciclos por segundo, ou seja, quantas ondas passam por aquele local durante o tempo de 1 segundo. Podem ser utilizadas as unidades ciclos por segundo ou Hertz (Hz). Frequências acima de 20.000 Hz ou 20 kHz são inaudíveis e denominadas ultrassônicas (Figura 10).

Figura 10 - Campo de audibilidade das vibrações mecânicas (Andreucci, 2002).

A velocidade de propagação é definida como distância percorrida por uma onda em uma determinada unidade de tempo. Esta variável é característica de cada material e independente da frequência.

Comprimento de onda (Figura 11) é a distância entre dois picos ou dois vales, ou ainda um pico e um vale consecutivos da onda.

Figura 11 - Comprimento de onda.

4.1.4. Descrição do método ultrassônico

O ultrassom é um aparelho que trabalha com emissão e recepção de ondas ultrassônicas elásticas de alta frequência (50 e 54 kHz), que não são percebidas pelo ouvido humano. No passado, para verificar a qualidade de eixos ferroviários e sinos, as peças eram marteladas e o som que elas produziam mostrava se tinham defeitos como rachaduras ou trincas grandes. Do mesmo modo como uma onda sonora é refletida ao encontrar um anteparo, as ondas ultrassônicas também refletirão ao colidirem com obstáculo, ao entrarem em contato com uma descontinuidade do material e até mesmo com uma trinca. Quando há uma descontinuidade, o aparelho de ultrassom mostra um pico de onda com maior amplitude (Figura 12).

Figura 12 - Princípio básico da inspeção de materiais por ultrassom (Andreucci, 2002).

Este método tem como objetivo determinar a velocidade de propagação das ondas elásticas entre a extremidade emissora de ondas e a extremidade receptora do aparelho, que atravessam o material que está sendo estudado, sem lhe causar nenhum dano, sendo possível, portanto, verificar se há variação da homogeneidade interna, a presença de fendas ou defeitos no material, estado de degradação, avaliação das propriedades mecânicas, bem como a resistência do material ensaiado (Martins, 2008; Galvão, 2009). Tal fato é observado na variação da velocidade da onda enquanto atravessa o material. Quanto maior a densidade deste, maior será a velocidade de propagação das ondas, ou seja, materiais mais degradados apresentarão menor velocidade.

A velocidade de propagação de ondas volumétricas em um dado meio elástico, isotrópico e homogêneo depende da massa específica, Coeficiente de Poisson e do módulo

de elasticidade dinâmico. A Equação 1 relaciona a velocidade das ondas primárias com as constantes elásticas do meio (Silva, 2005).

$$V_p = \left[\frac{E (1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Onde:

ρ = massa específica;

μ = coeficiente de Poisson;

E_d = módulo de elasticidade dinâmico;

V_p = velocidade das ondas primárias.

Para realizar a medição da velocidade de propagação da onda é preciso colocar os dois transdutores em contato com a superfície do objeto a ser analisado, sendo que um dos transdutores (emissor) emitirá o pulso ultrassônico e o outro (receptor) receberá esse pulso, sendo medido o tempo gasto nesse percurso. Por meio do tempo é possível calcular a velocidade de propagação. Para melhorar o contato entre o transdutor e a superfície, é utilizado gel para ultrassom.

A técnica consiste em liberação de um pulso elétrico pelo aparelho, que é transformado em onda mecânica no transdutor emissor, esta onda atravessa o corpo de prova e é recebida pelo transdutor receptor que transforma novamente essa onda mecânica em pulso elétrico. O equipamento central transforma essa informação em uma onda digital ou no valor do tempo. A distância entre os pontos de contato dos transdutores com a rocha é medida com uma trena e a velocidade de propagação, expressa em km/s ou outra unidade qualquer, é calculada de acordo com a Equação 2.

$$V = \frac{d}{t} \quad (2)$$

Onde:

V = velocidade de propagação;

d = distância;

t = tempo.

Alguns autores preferem expressar a velocidade em m/s, conforme as regras do Sistema Internacional (SI). No entanto essa unidade gera valores grandes que não são muito práticos.

A velocidade ultrassônica pode ser utilizada, por meio de tratamento de dados, para indicar diferentes litotipos utilizados (mas não uma caracterização completa) em uma construção, que não são identificáveis a olho nu, bem como para determinar seu estado de deterioração (Köhler *et al.*, 1996). Em alguns materiais a velocidade já foi analisada e estipulada. Dependendo da constituição mineralógica de uma rocha, é possível estimar qual deveria ser a velocidade para uma amostra fresca. Alguns valores são:

- Quartzo: 6,0 km/s;
- Ortoclásio: 5,7 km/s;
- Calcita: 6,6 km/s;
- Água: 1,5 km/s;
- Ar: 0,34 km/s.

Para fissuras, fraturas e poros, consideramos o valor da propagação da onda no ar.

Foram estabelecidos também, valores de velocidade ultrassônica para os diferentes estágios de alteração do mármore (Köhler, 1988):

- Amostra de mármore fresco: $V_p > 5$ km/s;
- Bom estado: $V_p = 4 - 5$ km/s;
- Estado aceitável: $V_p = 3 - 4$ km/s;
- Intemperismo inicial: $V_p = 2 - 3$ km/s;
- Intemperismo avançado: $V_p = 1,5 - 2$ km/s;
- Desintegração estrutural: $V_p < 1,5$ km/s.

Outros tipos de rochas também tiveram seus valores de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas estabelecidos (Chung e Law, 1983):

- Basalto: $V_p = 6,02 - 5,27$ km/s;
- Dolomito: $V_p = 6,09 - 4,37$ km/s;
- Granito: $V_p = 5,79 - 4,00$ km/s;
- Calcário: $V_p = 5,78 - 3,91$ km/s;
- Arenito: $V_p = 4,23 - 2,55$ km/s;
- Quartzito: $V_p = 5,72 - 5,57$ km/s.

4.1.5. Fatores que influenciam os resultados do ensaio

Os resultados da velocidade ultrassônica são alterados devido a características físicas das rochas como homogeneidade, densidade, porosidade e saturação por água. Qualquer diminuição na velocidade ultrassônica se deve a descontinuidades ou obstáculos no caminho de sua propagação. Aspectos mineralógicos também podem alterar a velocidade de propagação das ondas.

Outro fator que é de extrema importância é o perfeito acoplamento entre os transdutores e a superfície. Caso isso não ocorra é possível que exista ar entre o transdutor e a superfície, o que atenuará muito o resultado, pois a maioria das ondas não se propaga no ar.

4.1.6. Vantagens e desvantagens

Dentre as vantagens do método pode-se citar sua sensibilidade na detecção de pequenas estruturas como descontinuidades internas. É um equipamento de fácil manuseio, custo de aquisição relativamente baixo e que realiza medidas de modo rápido e de maneira totalmente não destrutiva. Essa última característica permite que o método seja repetido várias vezes em um mesmo lugar e que seja utilizado ao longo de todo o corpo de prova. Dentre as desvantagens pode-se citar a necessidade da acoplagem de outro aparelho para gravar o caminhamento das ondas, não mostrar em que profundidade essa descontinuidade aparece e a superfície precisa ser lisa para sua aplicação. Outra desvantagem é em relação à interpretação dos resultados ser complexa devido ao grande número de fatores que são inerentes a medição. Dentre alguns dos fatores que podem afetar os resultados temos: a constituição do material, umidade e rugosidade da superfície, forma do corpo e a presença de descontinuidades.

4.1.7. Normas Técnicas

As normas que tratam da utilização do método de propagação de ondas ultrassônicas são descritas a seguir.

4.1.7.1. RILEM NDT 1 (1972) - Testing of concrete by the ultrasonic pulse method.

Esta norma foi desenvolvida para ensaios em concreto e sugere as seguintes condições para os testes:

- frequência do ultrassom entre 20 e 200 kHz;
- a superfície deve ser plana. Caso isso não seja possível a norma recomenda que a distância entre os transdutores seja aumentada para no mínimo 15 cm para transmissão direta e 40 cm para indiretas;
- a distância entre os transdutores deve ter a precisão de mais ou menos 1%;
- temperaturas ambientais entre 5 e 30°C não interferem nos resultados. Para temperaturas diferentes destas, é sugerida uma tabela de correção dos resultados em concreto.

É sugerida por esta norma uma relação entre a frequência natural do transdutor e as dimensões da amostra ensaiada (Tabela 3). Observando esta relação conclui-se que quanto maior a dimensão da peça a ser ensaiada, menor deve ser a frequência do transdutor.

Tabela 3 - Relação entre tamanho do corpo ensaiado e frequência do transdutor.

Distância a ser percorrida pela onda (mm)	Dimensão transversal mínima do elemento (mm)	Frequência natural do transdutor (kHz)
100 – 700	70	60
700 - 1500	150	40
> 1500	300	20

4.1.7.2. ABNT NRB 8802 (1994) – Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

Detalha as condições de execução do ensaio não destrutivo utilizando aparelho de ultrassom para determinar a velocidade de propagação de ondas longitudinais em concretos.

São sugeridas as seguintes condições:

- frequência de vibração de onda acima de 20 kHz;
- utilização de fina camada de acoplantes como graxas de silicone ou mineral e vaselina;
- precisão de leitura de pelo menos 0,1 μ s;
- superfícies planas, lisas e isentas de sujeira;

- caso a superfície não seja plana, pode ser regularizada com espessura mínima de pasta de cimento, gesso ou resina epóxi;
- o aparelho deve ser calibrado usando barra de referência ou dispositivo equivalente;
- o acoplamento é considerado satisfatório caso o valor da leitura não varie mais que 1% para mais ou para menos;
- deve ser dada preferência para obtenção de dados em medidas diretas. Caso isso não seja possível, a segunda opção deve ser o método indireto e por último o método semidireto;
- em nota observam que superfícies úmidas não causam problemas para a os testes, diferente do que Galvão (2009) e Gonçalves (2010) atestam.

4.1.7.3. ASTM 2845/00 (2000) - *Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock.*

É uma norma específica para testes em rochas.

Esta norma cita as seguintes orientações:

- a distância entre os transdutores deve ser de 10 vezes a média do tamanho dos grãos;
- a linha imaginária que liga o centro dos transdutores não deve estar inclinada mais que 2°;
- as superfícies devem ser bem lisas;
- devem ser usadas faces opostas;
- a energia entre a rocha e os transdutores pode ser aumentada utilizando acoplantes como salicilato de fenila, graxa de alto vácuo ou resina e pressionando os transdutores contra a superfície com pouca força;
- as rochas devem possuir baixo grau de anisotropia;
- para estimar o grau de anisotropia, devem ser realizadas medidas em três direções diferentes e em 40 direções orientadas a 45° da medida anterior.

Os procedimentos básicos das três normas acima encontram-se reunidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre normas para ensaio de ultrassom.

	RILEM 1/1972	NBR 8802/1994	ASTM 2845/00
Frequência do Ultrassom	De 20 a 200 kHz	Acima de 20 kHz	20 kHz a 150 kHz
Medições de velocidade	Precisão de $\pm 1 \%$	Precisão de $\pm 1 \%$	-
Distância entre os transdutores	Precisão de $\pm 1 \%$	Precisão de $\pm 1 \%$	Precisão de 0,5 %
Superfície	Plana	Seca ao ar, limpa e plana	Lisa

4.1.8. Exemplos da aplicação do ultrassom em patrimônio histórico

Serão abordados alguns casos que possuem objetivos diferentes e que tratam os dados obtidos por meio de equipamento de ultrassom, o que também é realizado de maneira distinta. Devido a essas diferenças não existe a possibilidade de compará-los. No entanto foi construída uma tabela que é mostrada ao final do texto, com o intuito de condensar e facilitar a compreensão das informações fornecidas pelos autores.

Em muitos dos textos utilizados para realizar este compêndio não constam informações importantíssimas para a avaliação dos dados fornecidos. Dentre elas podem-se citar frequência dos transdutores, método de medida (direto, semidireto ou indireto), modo de análise dos dados e que tipo de ondas foram consideradas (P ou S). Essas informações são de suma importância para que os dados fornecidos possam ser comparados e analisados.

O ultrassom foi utilizado para avaliar a ação da solução de silicone acrílico principalmente na união de crostas em arenito com cimento calcítico, largamente utilizado em construções na cidade de Bologna (Itália). Rossi-Maranesi e Tucci (1983) observaram que os mesmos são deteriorados por processos químicos com a formação de crostas foliadas e profunda perda de coesão entre os grãos. Neste trabalho foram analisadas três colunas da fachada do *Palazzo Gaudenzi* antes e depois do trabalho de consolidação.

As medidas de velocidade ultrassônica foram realizadas nos diferentes estágios de trabalho: 1 - antes do tratamento e depois da pré-consolidação, 2 - depois da pré-consolidação e limpeza e antes da aplicação da água de cal, 3 - depois de todas as etapas.

Foram obtidas 10 medidas em cada coluna, distantes 10 cm da anterior nos métodos direto e indireto. Quando a velocidade indireta mostrou-se maior que a direta foi avaliada como sendo devido à cobertura de sujeira. Os testes *in situ* mostraram que os poros foram pouco preenchidos.

Para os testes de laboratório foram utilizadas amostras de 4 x 4 x 6,5 cm, sendo a maior face paralela ao plano de estratificação (Tabela 5). As amostras tratadas com Paraloide-Silicone mostraram aumento de 50% na velocidade ultrassônica em relação às amostras não tratadas. Após o tratamento a rocha apresentou boa hidrofugação, mas pouca consolidação. A porosidade dessa rocha varia entre 15% a 25%, que é 50% a 150% maior do que o comum em amostras dessa rocha.

Tabela 5 - Velocidade ultrassônica (km/s) – medição direta – distância 6,5 cm (extraída e modificada de Rossi-Maranesi e Tucci, 1983).

	Antes do tratamento	Depois do tratamento
Perpendicular ao plano de estratificação	1,5	1,7
Paralelo ao plano de estratificação	2,2	2,5

Valdeón *et al.* (1992) analisaram dois tipos de rocha utilizados na construção do *Westminster Abbey*, em Londres: Calcários Caen (originário da França) e Portland (proveniente da Inglaterra). Os autores compararam as rochas que eram utilizadas em construções há cerca de cem ou duzentos anos e que possuem o mesmo nome das que são utilizadas atualmente. Essas rochas, apesar de terem o mesmo nome, são provenientes de pedreiras distintas. Foram comparados os dados resultantes da análise de frequência destes dois tipos de rochas pré e pós ciclos de congelamento. No ciclo 1, as rochas foram saturadas em água e mantidas por quatro horas a -3°C. No ciclo 2, a temperatura foi reduzida a -18°C por 15 horas. Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Velocidade das ondas compressoriais e cisalhantes nos dois tipos de rocha antes e depois dos ciclos 1 e 2 de congelamento (Valdeón *et al.*, 1992).

Tipo de rocha	Velocidade compressional (km/s)			Velocidade de onda cisalhante (km/s)		
	Pré 1	Pós 1	Diferença (%)	Pré 2	Pós 2	Diferença (%)
Portland (novo)	4,175	4,070	2,5	2,426	2,370	2,3
Portland (antigo)	4,190	2,775	38,5	2,373	1,248	47,4
Caen (novo)	3,228	2,965	8,4	1,885	1,812	4
Caen (antigo)	3,064	3,004	2	1,823	1,809	0,8

Foram utilizados os valores das ondas de compressão (P) e de cisalhamento (S) e o equipamento foi o PUNDIT (CNS Eletronics, Londres). Como este equipamento não possui visor digital, ele foi conectado a um osciloscópio Tektronix 7603 digital com o *plug-in* 7D20 digital. Isso permite visualizar e gravar a onda na memória do equipamento. As ondas foram analisadas no computador quanto à frequência e tempo de deslocamento. A análise da

frequência permite que se obtenha o espectro de frequência de Fourier. Para construir esse espectro, são analisados os picos de frequência antes e depois dos ciclos de congelamento e descongelamento aos quais foram submetidas as amostras. A atenuação foi calculada com base no fator de qualidade (Q), que é calculado usando a técnica de raios espectrais. A técnica que utiliza a análise conjunta do pulso espectral e do sinal digital gerado baseia-se no fato de que a amplitude é inversamente proporcional à frequência.

Como resultado a amostra do Portland antigo foi a que mostrou o maior decréscimo de velocidade após o congelamento e descongelamento. As outras rochas mostraram pequena variação. Com isso os autores concluem que as rachaduras provocadas pelos ciclos de congelamento e descongelamento afetam muito os valores das velocidades.

Em tufos da Capadócia (Turquia), Topal e Doyuran (1995) realizaram testes de durabilidade em laboratório envolvendo congelamento e descongelamento, cristalização de sais e umedecimento e secagem da rocha. Para análise dos danos causados por essas mudanças foi utilizado o equipamento de ultrassom.

Para medir a velocidade das ondas P, foram usados transdutores de 63 kHz e o aparelho foi um gerador de pulso de alta voltagem modelo 5324, OYO. Para as ondas S foram usados transdutores de 100 kHz.

Diminuição de velocidade das ondas P e S superiores a 25% ou 28% indicam danos internos nos tufos vulcânicos. A Tabela 7 mostra os dados obtidos.

Conclui-se que o tufo não é resistente à cristalização de sais. Os testes de congelamento mostraram danos visíveis, enquanto os testes de umedecimento e secagem não causaram nenhum dano aparente. No entanto, as velocidades ultrassônicas foram bastante alteradas em todos os testes. Os autores relatam que para utilizar as ondas S como parâmetro para identificar o grau de dano da rocha, seriam necessários instrumentos mais sofisticados.

Tabela 7 - Dados ultrassônicos nos três testes em ciclos diferentes (Topal e Doyuran, 1995).

Tipo de teste	Teste N°	Velocidade ondas P (km/s)	Velocidade ondas S (km/s)	Peso (%)
Fresco	-	2,082	1,124	100,00
Saturado/seco	10	1,702	1,016	98,99
Saturado/seco	30	1,613	0,950	98,82
Saturado/seco	44	1,588	0,872	98,80
Saturado/seco	52	1,502	0,008	98,80
Congelamento/degelo	10	1,701	0,977	97,90
Congelamento/degelo	30	1,680	0,874	95,86
Congelamento/degelo	44	1,531	0,826	89,35
Congelamento/degelo	52	1,501	0,856	72,57
Cristalização de sais	1	1,971	1,096	99,32
Cristalização de sais	2	1,707	1,009	98,78
Cristalização de sais	3	1,559	0,845	98,38

Köhler *et al.* (1996) realizaram o estudo da fachada da Catedral de *St. Stephen*, em Viena, que passou por diversas reformas, reestruturações, bem como restaurações e não possuíam material necessário para que fosse realizada análise petrográfica de todos os prováveis litotipos. Assim o ultrassom foi de extrema importância. A partir dos resultados pôde-se inferir que, em linhas gerais, as rochas utilizadas foram de 3 litotipos, sendo um calcário e dois arenitos. Porém não se pôde realizar uma caracterização completa. Estes resultados foram obtidos a partir das velocidades ultrassônicas das rochas da catedral, do valor das velocidades em rochas conhecidas e da utilização de cada litotipo em certo período.

Foram realizadas mais de 1.000 medidas em todo o portal, sendo utilizada a frequência de 250 kHz e os transdutores foram acoplados à rocha por meio de moldes de argila. As medidas foram realizadas com distância de 2 cm da anterior. A Tabela 8 mostra os resultados encontrados nas seguintes rochas:

- calcário poroso com detritos de algas com pedaços de quartzo arenito e estruturas sedimentares (BWS);
- 2 arenitos foraminíferos com algas de pedreiras distintas (ALK/ SMK).

Tabela 8 - Velocidades ultrassônicas das diferentes rochas (Köhler *et al.*, 1996).

Rocha	Velocidade Mínima (km/s)	Velocidade Máxima (km/s)
BWS - A	3,3	3,7
BWS - B	-	3,9
ALK	2,4	2,8
SMK	2,8	4,4

Em outra pesquisa, realizada por Papida *et al.* (2000), dois calcários provenientes de Creta (Grécia) e o Dolomito Mansfield do Reino Unido foram avaliados quanto a sua resistência física e ao ataque microbiológico por meio de velocidade de onda ultrassônica.

Após tratamento com água destilada e NaCl apresentaram aumento da velocidade de ondas ultrassônicas longitudinais e transversais. Quando o mesmo é tratado com Na₂SO₄, a velocidade diminuiu. Foi observada a correlação entre os resultados da dureza da superfície e a colonização por bactérias, mostrando que a colonização biológica diminuiu muito a resistência da rocha, tornando-a mais suscetível à degradação.

A técnica de velocidade ultrassônica foi utilizada por Sheremeti-Kabashi e Snethlage (2000) para determinar a anisotropia estrutural do Mármore de Carrara. Utilizando a velocidade e a tomografia ultrassônicas, foi possível determinar a orientação dos cristais de calcita. Seus cristais mostraram diferentes velocidades de acordo com o seu eixo ótico. A velocidade máxima foi encontrada paralela ao eixo *a* e a mínima paralela ao eixo *c*, sendo, respectivamente 7,73 km/s e 5,71 km/s.

Foram utilizados cubos de mármore intemperizado (P1, P2, P3, P4 e P5) e um não intemperizado (P6) com 20 x 20 x 20 cm. Foram realizadas 180 medidas ao longo de todas as faces e foi considerado o valor da onda P. O aparelho utilizado foi USME-C com frequência de 46 kHz.

A velocidade da amostra não intemperizada (P6) foi utilizada como referência no qual cerca de 60% das velocidades estão entre 5 e 5,49 km/s. As amostras ficaram expostas por 9 anos ao ar livre e 59% das medidas ficaram entre 4 – 4,49 km/s.

Dionísio (2005) objetivou avaliar o estado do calcário calcítico da Catedral de Lisboa, que possui grande conteúdo fossilífero. O aparelho utilizado foi um ultrassom portátil STEINKAMP – modelo BP7. Foram comparados os resultados de rochas que foram afetados por incêndio com valores de rochas que não passaram por esse processo.

Os transdutores foram colocados nas posições mais diversas, mantendo sempre a distância de 5 cm entre eles. O objetivo foi o de verificar as partes mais afetadas deste monumento, que é o mais antigo de Lisboa e que sofreu muito com terremotos e incêndios. Através do alinhamento dos pontos de medidas das ondas ultrassônicas, foi possível mensurar a espessura e a camada de subsuperfície onde ocorre maior alteração na rocha.

Os blocos afetados pelo fogo apresentaram valores máximos de 2,0 km/s, sendo que a grande maioria (90%) mostra valores abaixo deste, mas não apresentam padrão especial em suas velocidades. Nestes locais os blocos apresentam-se visivelmente fragmentados. Blocos não afetados pelo fogo apresentaram valor médio de 2,55 km/s (com erro de 0,18 km/s).

Alvarez *et al.* (2008) trabalharam com a consolidação da Igreja *San Juan de los Reyes*, localizada na cidade de Toledo, na Espanha, que é constituída principalmente por granitos que possuem vários tipos de deterioração como intensa arenização, bolhas, esfoliação, fragmentação, rachaduras, pátina escura, ferrugem, crosta negra, fezes de pássaros, líquens, desintegração granular e plantas superiores. Este granito é classificado como biotita monzogranito de granulação grossa com ocorrência de fenocristais de feldspato. A velocidade ultrassônica da onda P foi medida em amostras tratadas, que foram submetidas a congelamento e degelo para simular as condições climáticas a que essas rochas ficam expostas. Foram utilizados transdutores de 1 MHz e pulsos contínuos com voltagem de 1200 V.

Como resultado houve aumento de coesão das partículas, com penetração substancial do consolidante (12 – 25 cm). Em amostras tratadas com consolidante houve aumento da velocidade das ondas P entre 32% - 54% (Tegovakon V100) e 40% – 61% (Wacker OH 100). Nas amostras submetidas a ciclos de congelamento e degelo o aumento da velocidade ficou entre 5 -16% (Tegovakon V100) e 11 - 21% (Wacker OH 100).

O caso da Catedral de Évora, que é constituída por vários tipos de rochas, foi estudado por Delgado-Rodrigues e Costa (2008). Na época da construção, a tecnologia para extração de rochas de cantaria era pouca e a parte utilizada, era a que estava exposta, ou seja, geralmente intemperizada. Nas paredes externas foi utilizada uma variedade de granito cinza que é altamente permeável, contribuindo para a infiltração de água de chuva. Os granitos encontrados variam de granodiorito com granulação média, a granito a 2 micas de granulação fina a grossa. A parte que estava em pior estado, sendo, portanto tratada como prioridade, era a lanterna do Zimbório, que é toda construída com blocos de granito. O mapeamento desta parte apontou a presença de arenização, esfoliação, erosão e biocolonização. As intervenções iniciaram pela parte externa do Zimbório para sanar os problemas que eram gerados na parte interna. As velocidades ultrassônicas em profundidade foram utilizadas para determinar qual o melhor tratamento com consolidante.

Um estudo levado a cabo por Myrin e Malaga (2008) objetivou analisar a efetividade dos dados ultrassônicos obtidos no monitoramento de rochas que passaram por tratamento. Dados obtidos em campo foram comparados a dados de amostras ensaiadas em laboratório. Os testes foram realizados no Arenito Gotland da casa da família Petersen, localizada em Estocolmo (Suécia), que já havia passado por vários trabalhos de restauração

que incluíram pintura com óleo de linhaça. A restauração atual envolveu pré-consolidação, limpeza, colagem, dessalinização, consolidação e trabalho de reparo. Os ensaios em campo foram comparados a ensaios em rocha fresca realizados em laboratório.

A frequência utilizada no equipamento de ultrassom portátil foi de 60 kHz. A medida foi repetida 5 vezes em cada ponto e calculada a média. Foram realizadas medidas diretas e indiretas. As mesmas áreas foram medidas dois meses após o tratamento, nos verões dos anos 2005, 2006 e 2007.

Nas amostras frescas o procedimento de medida foi obter dados paralelos e perpendiculares à laminação. Nas rochas alteradas a medida foi realizada em apenas uma direção, pois não é visível uma direção de laminação.

Dois meses depois do tratamento as velocidades aumentaram (0,3 km/s - deterioradas e 1,7 km/s - não deterioradas) mostrando que a rocha ficou mais resistente. Acompanhando os resultados nos anos consecutivos os autores observaram que os valores continuaram aumentando. Em algumas áreas a velocidade caiu devido a rachaduras e fissuras dentro das rochas ou pela diminuição do efeito da consolidação.

As rochas frescas também foram tratadas com consolidantes e apresentaram aumento de 0,4 km/s na velocidade ultrassônica.

A diferença de velocidade entre as medidas nas duas faces da laminação foi semelhante a do tratamento (0,5 km/s).

Silva (2005) investigou os gnaisses do Teatro Municipal e do Paço Imperial, ambos localizados na região central da cidade do Rio de Janeiro. As técnicas empregadas foram avaliação das morfologias de alteração, difração e fluorescência de raios X, e teste de sais por via úmida. Dentre os ensaios não destrutivos, foram utilizados o esclerômetro e o equipamento de ultrassom (PUNDIT). Nos ensaios acústicos foram obtidas medidas pelo método direto de acordo com a norma ISRM (1981). Foi observado que a vibração causada pelo tráfego causou alteração nos valores obtidos. Para o Teatro Municipal foi encontrada a velocidade média de 4,0 km/s. No Paço imperial não foi possível a obtenção de dados devido a grande rugosidade da rocha. De modo geral, observando o resultado de todos os ensaios, as faces que apresentaram maior alteração foram as que estão voltadas para o mar.

Marques *et al.* (2010) estudaram e caracterizaram física e mecanicamente três gnaisses mais comuns no Rio de Janeiro: Kinzigito, Augen Gnaiss e Leptinito. Mais de 300 blocos de amostras das três rochas foram produzidos para testes em laboratório. A mineralogia destas rochas foi determinada por microscopia óptica e por difração de raios X. As propriedades físicas foram determinadas por meio do peso específico da rocha seca e saturada, porosidade, teor de umidade da amostra saturada, velocidade de propagação da onda ultrassônica, e teste de carga pontual. A partir dos resultados, os autores concluíram

que as propriedades físicas estão diretamente relacionadas com a textura das rochas e com o grau de alteração. Os valores de velocidade ultrassônica foram obtidos em diferentes ângulos em relação à orientação da foliação destes gnaisses. O Kinzigito apresentou as maiores velocidades de ondas P e o Leptinito as menores. Os valores encontrados para estas duas rochas apresentam-se na Tabela 9. Vale ressaltar que não são apresentados dados de velocidade ultrassônica para o Augen Gnaisse.

Tabela 9 - Velocidade de onda ultrassônica para Kinzigito e Leptinito (adaptado de Marques *et al.*, 2010).

Rocha	Classe de alteração	Ângulo entre a foliação e a medida		
		0°	45°	90°
Kinzigito	I	5,8 km/s	5,5 km/s	5,4 km/s
	II	5,8 km/s	4,9 km/s	4,7 km/s
	III	4,7 km/s	4,0 km/s	4,0 km/s
Leptinito	I	3,8 km/s	2,8 km/s	3,7 km/s
	II	2,6 km/s	2,0 km/s	2,4 km/s
	III	2,3 km/s	2,2 km/s	2,3 km/s

Gimenez (2012) realizou testes com equipamento de ultrassom V-Meter Mark III no Granito Cinza Mauá do Monumento às Bandeiras, localizado na cidade de São Paulo. As medidas foram realizadas pelos métodos direto e indireto com transdutores de 54 e 150 kHz. Os resultados médios encontrados para o método direto foram 4,75 km/s com os transdutores de 54 kHz, 4,62 km/s com os transdutores de 150 kHz e no método indireto foram encontrados os valores médios de 5,16 km/s para os transdutores de 150 kHz e 5,20 km/s para os de 54 kHz. Os resultados obtidos *in situ* foram comparados com os obtidos em amostra fresca em laboratório. Os resultados encontrados em laboratório para os métodos direto e indireto com os transdutores de 54 e 150 kHz encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores encontrados no Granito Cinza Mauá em laboratório (modificado de Gimenez, 2012).

Transdutor	Transmissão	Velocidade mínima (km/s)	Velocidade máxima (km/s)
54 kHz	Direta	5,24	5,54
	Indireta	4,62	5,44
150 kHz	Direta	5,39	5,55
	Indireta	4,82	5,23

A Tabela 11 resume as características dos trabalhos citados acima.

Tabela 11 - Resumo das características e velocidades ultrassônicas das rochas ensaiadas em todos os casos citados.

	Rocha	Transdutor	Transmissão	Densidade	Porosidade	Velocidade (P)	Velocidade (S)
Rossi-Maranesi e Tucci (1983)	Arenito	-	Direta	-	15 – 20%	1,5/2,2 km/s	-
Valdeón et al. (1992)	Caen Novo Calcário	-	-	2345 kg/m³	17,6%	3,23 km/s	-
	Caen Antigo Calcário			1908 kg/m³	29,2%	3,06 km/s	
	Portland Novo Calcário			2227 kg/m³	17,5%	4,17 km/s	
	Portland Antigo Calcário			2238 kg/m³	20,8%	4,19 km/s	
Topal e Doyuran (1995)	Tufo Vulcânico	P=64 Hz S=100 kHz	-	-	38,29%	2,08 km/s	1,12 km/s
Köhler et al. (1996)	Calcário (BWS-A)	250 kHz	-	-	-	3,3-3,7 km/s	-
Papida et al. (2000)	Dolomito Mansfield	-	-	2,01 g/cm³	17,1%	2,67 km/s	1,0 km/s
	Calcário Psatas			1,77g/cm³	21,4%	3,12 km/s	1,11 km/s
	Calcário Stavros			1,55 g/cm³	24,3%	2,71 km/s	2,11 km/s
	Calcário (BWS-B)					3,9 km/s	-
	Arenito (ALK)					2,4 -2,8 km/s	
	Arenito (SMK)					2,8–4,4 km/s	
Sheremeti-Kabashi e Snethlage (2000)	Mármore P6	46 kHz	-	-	-	5 -5,49 km/s	-
	Mármore					4 -4,49 km/s	
Dionísio (2005)	Calcário calcítico - Fogo	-	-	-	-	<2,0 km/s	-
	Calcário calcítico					2,55 km/s	
Silva (2005)	Gnaisse	-	Direta			4,0 km/s	-
Alvarez et al. (2008)	Granito	-	-	2582 ± 27 kg/m³	5,47 - 5,54%	1,9 – 2,0 km/s	-
Delgado-Rodrigues e Costa (2008)	Granito	-	-	-	1,2 - 6%	1 km/s	-
	Granito fresco					2,5 – 3,4 km/s	
Myrin e Malaga (2008)	Arenito fresco	60 kHz	Direta e indireta	-	5-30%	2,5 km/s	-
	Arenito alterado				-	1 km/s	-
	Arenito pouco alterado				-	2 km/s	-
	Arenito não alterado				-	3 km/s	-
Continua							

Continuação da Tabela 11 - Resumo das características e velocidades ultrassônicas das rochas ensaiadas em todos os casos citados.							
Marques <i>et al.</i> (2010)	Kinzigito e Leptinito	-	-	-	-	Tabela 9	-
Gimenez (2012)	Granito Cinza Mauá	54 e 150 kHz	Direta e indireta	-	-	Direto: 4,75 e 4,63 km/s Indireto: 5,16 e 5,20 km/s	-

4.1.9. Metodologia utilizada

O aparelho utilizado nesta pesquisa foi o V-Meter Mark III (NDT *James Instruments Inc.*) (Figura 13), equipado com visor digital que mostra o tempo de propagação, a velocidade e a amplitude da onda. Neste equipamento algumas definições podem ser escolhidas manualmente como o ganho e o número de pulsos por segundo. Pode ser inserida a distância, entre os transdutores para que o aparelho calcule a velocidade, ou a mesma pode ser calculada manualmente, usando o valor do tempo de trânsito, que também é fornecido pelo aparelho.

Figura 13 - Imagem do aparelho de ultrassom utilizado.

Antes de iniciar as medidas, é necessário calibrar o aparelho e eliminar o tempo de percurso da onda dentro do transdutor (tempo de inércia), no caso de transdutores exponenciais. O modo de calibragem varia de acordo com o equipamento. O V-Meter Mark

III (equipamento utilizado nesta pesquisa) é calibrado colocando os transdutores em contato e selecionando a opção de calibração no *menu* do aparelho.

Existem três maneiras de posicionar os transdutores:

- transmissão direta (faces opostas – Figura 14);
- transmissão indireta (mesma face – Figura 15);
- transmissão semidireta (faces adjacentes – Figura 16).

A técnica mais exata é a do método direto que, no entanto, apresenta uma limitação em relação à distância, pois o corpo não pode ter mais que determinada espessura, que depende do material constituinte e sua densidade (Grossi, inédito).

A transmissão semidireta fornece medidas menos exatas que a direta, mas mais exatas que a indireta (Naik e Malhotra, 1991), pois só representa uma pequena faixa superficial do corpo, sendo medida a velocidade aparente. A norma ASTM 2845/00 e Yaman *et al.* (2001) discordam desta afirmação e relatam que o método indireto deve ser preterido ao semidireto, conforme será descrito posteriormente. Existe ainda uma relação direta entre os valores obtidos no método direto e no indireto em materiais uniformes (Yaman *et al.*, 2001).

Nos três métodos a distância entre as ondas é adotada como a distância entre os centros dos transdutores.

Figura 14 - Método direto – vista frontal.

Figura 15 - Método indireto- vista frontal.

Figura 16 - Método semidireto – vista lateral.

Para a avaliação dos dados foram utilizadas apenas as ondas P, que são as que mais refletem o estado interno do material. Nas configurações foram escolhidos ganho de 500 e 3 pulsos em 2 segundos.

Os blocos de rocha mais lisos e acessíveis foram escolhidos em todas as quatro faces do monumento. Em geral as superfícies são bastante rugosas, sendo mais acentuada em alguns pontos. Para a realização das medidas foram utilizados os transdutores de 54 kHz, que possui 5 cm de diâmetro e de 150 kHz, que possui 2,5 cm de diâmetro.

Foram utilizados somente os métodos semidireto e indireto. O método direto ficou inviabilizado devido às dimensões métricas do monumento, a distância entre as faces opostas é demasiadamente grande.

As medidas foram repetidas três vezes em cada ponto e utilizado o valor mais constante ou médio. Essas medições foram realizadas a cada 10 cm no método semidireto, considerando o centro do receptor e do emissor de ondas, mantendo a distância de 10 cm da borda do bloco, como mostram as Figuras 17 e 18. No método indireto a distância entre os transdutores foi de 10 cm. As medidas indiretas foram realizadas de duas maneiras: mantendo a distância entre os transdutores e aumentando-a, e mantendo sempre os pontos a cada 10 cm. Com auxílio de paquímetro e régua foram obtidas medidas exatas entre os transdutores. As medidas foram realizadas da esquerda para a direita, considerando que à direita está o corpo do monumento e à esquerda a sua borda. A Figura 19 mostra um exemplo da disposição dos pontos de contato da rocha com os transdutores. Os pontos assinalados foram utilizados tanto na face vertical, quanto na horizontal do bloco. A maior distância entre os transdutores que possibilitou leitura no método indireto foi de 100 cm e de 50 cm para o método semidireto. Houve a tentativa de utilizar os transdutores exponenciais para maior exatidão dos dados na medida da distância, porém não houve sucesso, acredita-se, devido à grande rugosidade da superfície rochosa do monumento (Grossi, inédito).

Figura 17 - Método semidireto.

Figura 18 - Método indireto – mantendo distância.

Figura 19 - Distribuição dos pontos de medida.

4.2. Método esclerométrico

4.2.1. Introdução

Na década de 30 foram realizadas as primeiras tentativas de medir a dureza superficial do concreto e inicialmente foi utilizada a medida do retorno de uma bola de aço que era atirada por uma pistola. O Martelo de Schmidt ou esclerômetro foi desenvolvido pelo engenheiro de mesmo nome no ano de 1948 utilizando o mesmo princípio do ricochete, onde o retorno de uma massa depende da dureza da superfície contra a qual é atirada (Evangelista, 2002). Este método não destrutivo passou a ser utilizado em rochas na década de 60, podendo além de medir sua dureza, estimar o módulo de Young e a força compressiva uniaxial. Diversos autores têm utilizado o esclerômetro em rochas (Poole e Farmer, 1980; Cargill e Shakoore, 1990; Goktan e Ayday, 1993; Kolaiti e Papadopoulos, 1993; Basu e Aydin, 2004; Aydin, 2008). Outra função, conhecida atualmente é determinar a extensão de fissuras (Katz *et al.*, 2000; Aydin e Basu, 2005; Yagiz, 2009). Em outras áreas como design, engenharia e construção, o Martelo de Schmidt pode auxiliar no cálculo de previsão da taxa de penetração de máquinas, descrição física do núcleo das rochas, determinação da qualidade das rochas para construção civil, além da previsão da erodibilidade hidráulica de rochas (ASTM D 5873 – 00). No entanto a confiabilidade dos resultados obtidos depende da experiência do operador e das curvas de correlação utilizadas (Machado, 2005).

Este método avalia e registra de maneira rápida e com baixíssimo custo o valor estimado da dureza da rocha e suas propriedades mecânicas, podendo ser utilizado em laboratório e em campo, neste caso evitando a coleta de amostra e testes de laboratório. O equipamento é leve, de fácil utilização e pode ser usado quando possuímos apenas uma única superfície disponível para ensaios. No entanto são necessárias muitas medidas em campo para que os valores observados reflitam a realidade da rocha. Em patrimônio construído, o esclerômetro avalia a integridade do material rochoso e sua capacidade de resistir ao tempo e intempéries.

De modo geral, podem-se citar dois tipos de esclerômetro, que foram desenvolvidos para gerar diferentes energias de impacto: L= 0,735 e N= 2,207 Nm.

O impacto gerado é compactado uniformemente, não esmagando pequenos grãos, colapsando o esqueleto, realizando rachaduras extensivas, e nem mesmo lascando o material. Martelos L e N possuem boa correlação entre si, porém o L mostra-se mais sensível às rochas heterogêneas, apresentando maior dispersão nos dados. Os dois martelos mostraram-se bastante sensíveis às propriedades físicas das rochas, principalmente à densidade seca, sendo menos sensível às porosidades total e efetiva. O martelo N mostrou melhor desempenho, chegando à conclusão de que a maior energia de impacto ajuda a compreender melhor e de maneira mais confiável o comportamento da rocha, além de produzir maior dispersão dos dados em relação ao L, mostrando ser mais eficiente para determinar o módulo de Young e a força compressiva uniaxial (Aydin e Basu, 2005). O uso do martelo N é preferível em pesquisas de campo, pois é menos sensível às irregularidades da superfície, enquanto o martelo tipo L mostra melhores resultados quando utilizado em rochas mais fracas e porosas. A ISRM (1978) sugere que o martelo L deve ser utilizado em rochas que possuam força compressiva uniaxial entre 20 e 150 MPa e não recomenda o tipo N para ensaios em rochas.

4.2.2. Descrição do método esclerométrico

No momento em que o aparelho é pressionado perpendicularmente a superfície, uma massa é atirada com uma dada energia contra o êmbolo. O aparelho encontra-se descrito na Figura 20. Parte da energia será absorvida pela superfície quando houver boa deformação plástica e parte será transformada em calor e som. A energia absorvida está relacionada com a resistência da superfície da rocha e sua dureza superficial. Quanto mais dura a superfície, menor a deformação e, portanto, maior ricochete. A distância percorrida pela massa depois de ricochetear é chamada de número de ricochete (H_R) ou índice

esclerométrico (**IE**), sendo este adimensional. Este número é considerado um índice de dureza da superfície (Katz *et al.*, 2000; Basu e Aydin, 2004; Aydin e Basu, 2005) e varia em escala linear de 10 a 100. Os resultados apresentados são representativos para uma camada de 30 a 50 mm (Teodoru, 1988 *apud* Evangelista, 2002). Devido a sua maior energia de impacto, o martelo N exibe resultados que representam um maior volume de material por seu impacto penetrar mais profundamente do que o tipo L, sendo esperado então, que haja menor dispersão dos valores de ricochete (Aydin, 2008). Não foram encontrados dados mais atuais sobre a profundidade a que se refere o IE.

Figura 20 - Visão simplificada de um esclerômetro de Schmidt tipo N. (Fonte: notas de aula do Professor Eduardo C. S. Thomaz - <http://aquarius.ime.eb.br/~webde2/prof/ethomaz/>).

O valor de recuperação do martelo refere-se à dureza da superfície e está relacionado com propriedades das rochas, como resistência, elasticidade e dureza. Este coeficiente é dado pela Equação 3 (Buyuksagis e Goktan, 2006).

$$R = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (3)$$

Onde:

h = altura do ressalto;

H = altura da queda.

O valor do ricochete é uma constante e pode ser utilizada para comparar superfícies, contanto que estas sejam homogêneas. A relação entre o valor do ricochete e o módulo de elasticidade não está intrinsecamente relacionado para todos os tipos de rochas (Yagiz, 2009). A alta energia de impacto reduz a dispersão dos valores de ricochete em diferentes pontos de superfícies não homogêneas, contanto que a granulação da rocha seja compatível com o diâmetro do percutor do aparelho (Basu e Aydin, 2004; Aydin e Basu, 2005).

É essencial garantir que o martelo esteja perpendicular à superfície para evitar variações nas medidas, pois quando os valores são adquiridos em direções diferentes da horizontal, estes sofrem a ação da gravidade e precisam ser normalizados, o que ocorre por meio da utilização de curvas de correção que são fornecidas pelo fabricante e estipuladas pela ISRM (1978) e ASTM D5873 (2000). É necessário também que, para ensaios de laboratório, a base onde se encontra a amostra seja tão dura quanto a rocha, caso contrário poderá haver perda de energia. Para garantir que não haja perda de energia, as normas ISRM (1978) e ASTM D5873 (2000) sugerem que a amostra seja presa a uma base de aço de no mínimo 20 kg. Para o esclerômetro tipo N, a base deve ser mais pesada. Esta base deve ter uma valeta para suportar a rocha e evitar a rachadura de flexão, principalmente no modelo N, que possui maior energia de impacto (Evangalista, 2002; Aydin e Basu, 2005).

O martelo pode ser empregado de forma quantitativa e qualitativa, sendo a primeira relacionada à força compressiva simples *in situ*, comparada com valores obtidos em testemunhos e a segunda está relacionada com a comparação entre os dados obtidos *in situ*, unicamente (Silva, 2007). O tipo de rocha é uma consideração importante para a relação empírica entre os números do ricochete e sua relação com os valores de força compressiva (Cargill e Shakoor, 1990).

A boa correlação entre o valor do repique e o Módulo de Young mostra que a rocha é bem cimentada e elástica. Caso a rocha seja fraturada, ou esteja se desintegrando, essa relação não se mostra tão boa. Este tipo de rocha não deve ser testada com o esclerômetro, pois tende a ser danificada.

Uma precaução necessária no uso do aparelho é a distância das bordas do corpo de prova e a distância das fraturas. É necessário que haja uma distância mínima destes locais, pois quando as leituras se aproximam deles, estas tendem a mostrar valores menores do que nos outros pontos da rocha devido a deslocamentos, movimentos e perda de energia. As medidas em blocos soltos ou fraturados são confiáveis caso o mesmo possua, no mínimo, dezenas de quilos (Katz *et al.*, 2000). A repetibilidade das leituras aumenta quanto mais lisa e polida for a superfície (Katz *et al.*, 2000; Yagiz, 2009), pois as imperfeições afetam os valores do repique. Superfícies irregulares fazem com que a ponta do aparelho não consiga atingir por completo a superfície, havendo perda de energia. Blocos grandes são preferíveis, pois há espaço hábil para realizar a quantidade necessária de medidas e deixar a distância mínima entre o ponto de medida e a borda, evitando a perda de energia de impacto.

Outros fatores que podem afetar os testes são a temperatura da rocha (não deve ser menor que 0°), a temperatura do martelo (que deve ser similar à rocha a ser analisada) (Aydin e Basu, 2005), e a presença de líquens, crostas endurecidas, descamação ou superfície umedecida (Sánchez *et al.*, 2008). A influência do operador no manuseio do equipamento foi verificada e foi encontrada muito pouca variação dos valores de ricochete entre os diferentes operadores utilizando o mesmo martelo, mas uma variação significativa foi encontrada entre diferentes martelos usados pelo mesmo operador (Day e Goudie, 1977).

Goktan e Ayday (1993) fizeram uma revisão da norma proposta pela ISRM para a utilização do martelo de Schmidt e não encontraram nenhum documento que justifique o tratamento de dados sugerido pela mesma, na qual dos 20 valores de ricochete coletados, seria calculada a média dos resultados superiores a 50%. Segundo os autores, esta técnica, que aparentemente não possui nenhum embasamento teórico, faz com que os resultados não reflitam a dureza da rocha como um todo, eliminando os valores que se referem às partes menos resistentes do material ensaiado.

4.2.3. Vantagens e desvantagens

Algumas desvantagens do método são a impossibilidade em empregá-lo em rochas que estejam se desintegrando ou não possuam comportamento elástico e a necessidade da existência de uma superfície lisa.

O teste geralmente é não destrutivo para rochas de resistência moderada (>80 MPa), sendo, neste caso, possível utilizar a mesma amostra para a determinação da força

compressiva uniaxial (UCS) e do módulo de Young (E). No entanto, microfraturas de esmagamento de grãos e colapso de poros pode ocorrer em rochas friáveis e porosas, exigindo a utilização de diferentes amostras.

Alta velocidade de execução, baixo custo, ausência de danos significativos, possibilidade de coleta de grande quantidade de dados, dados disponíveis de maneira imediata, sem necessidade da coleta de amostras, são algumas das vantagens do método (Machado, 2005).

Esmagamento de grãos soltos devido ao estado da face ensaiada, movimento do bloco e estado físico do instrumento são alguns motivos que levam a obtenção de resultados baixos em campo. No entanto, nem todos os valores baixos podem ser atribuídos a essas razões, pois as rochas não são perfeitamente homogêneas, o que resulta em algumas variações dos resultados durante o teste. Alguns danos ocorrem na rocha no momento de sua coleta. Estes podem ser evitados se a superfície for cortada com auxílio de um cinzel (Goktan e Ayday, 1993).

Apesar da consistência e reprodutibilidade do método, alguns fatores estão associados com a obtenção dos dados. Dentre estes fatores pode-se citar a calibração e mau funcionamento do instrumento, irregularidades e estado de alteração da superfície da rocha, descontinuidades próximas, teor de umidade da amostra, tamanho da amostra de teste, espaçamento entre os impactos, orientação do martelo, procedimento de ensaio adotado, tipo de martelo disponível e a energia do impacto que este produz.

4.2.4. Normas Técnicas

As normas técnicas são úteis para a normalização da obtenção dos valores do ricochete, dimensões da amostra, suavidade da superfície, intemperismo, conteúdo de água, redução dos dados e procedimentos de análise que afetam a confiabilidade e consistência dos dados apresentados. Como o esclerômetro vem sendo utilizado extensivamente desde sua criação, foram criadas normas (Tabela 12) para unificar os métodos de utilização (RILEM NDT 3, 1984; ABNT NBR 7584, 1995; ASTM D5873, 2000).

O objetivo da criação de normas foi garantir que os dados gerados fossem consistentes, confiáveis e que pudessem ser reproduzidos.

4.2.3.1. RILEM NDT 3 (1984) - *Recommendations for testing concrete by hardness methods*

A norma RILEM NDT 3 (1984) indica que os corpos de prova devem estar secos e possuir dimensões grandes como 150 mm. Para evitar movimentos bruscos que são gerados pelo impacto deve-se apoiar esses corpos em uma prensa sob pressão de 1 MPa ou apoiá-los em base bem rígida.

Devem ser realizadas nove medidas em faces opostas do corpo, sejam eles cúbicos ou cilíndricos.

4.2.3.2. ABNT NBR 7584 (1995) – Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão

Esta norma é relativa a ensaios realizados em concreto. Não existe ainda uma norma brasileira para rochas.

Estabelece que:

- a área de ensaio deve estar uniformemente distribuída pela peça a ser analisada e deve estar preferencialmente em superfícies verticais;
- a superfície deve estar limpa, seca ao ar e deve ser plana;
- estas áreas devem ser previamente preparadas por meio de polimento em prisma ou disco de carborundum;
- distância mínima das bordas de 50 mm;
- área de ensaio entre 90 x 90 mm a 200 x 200 mm;
- a distância mínima entre os pontos deve ser de 30 mm;
- as peças devem possuir dimensões superiores a 100 mm na direção de impacto;
- antes de utilizar deve-se calibrar o equipamento;
- devem ser realizados no mínimo 9 e no máximo 16 impactos;
- excluir todo índice esclerométrico individual que diste mais de 10% do valor médio obtido. Após isso calcular a média aritmética;
- nenhum dos índices esclerométricos individuais deve diferir mais que 10% da média final;
- para obter o índice esclerométrico efetivo deve-se utilizar a Equação 4:

$$IE_{ef} = k \cdot IE \quad (4)$$

Onde:

IE_{ef} = índice esclerométrico efetivo;

K = coeficiente de correção do índice esclerométrico, obtido pela Equação 5;

IE = índice esclerométrico médio.

$$k = n \frac{IE_{nom}}{\sum_{i=0}^n IE_i} \quad (5)$$

Onde:

K = coeficiente de correção do índice esclerométrico;

n = número de impactos na bigorna de aço;

IE_{nom} = índice esclerométrico nominal do aparelho na bigorna de aço, fornecido pelo fabricante;

IE = índice esclerométrico obtido em cada impacto do esclerômetro na bigorna de aço.

4.2.3.3. ASTM D5873 (2000) – Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method

A norma da ASTM é específica para teste realizado em rocha e sugere que seja realizado nas seguintes condições:

- a superfície deve estar limpa e livre de grãos soltos;
- 10 leituras em pontos diferentes, descartando os valores que divergem da média por mais de 7 unidades e calcular novamente a média;
- a distância mínima entre os pontos deve ser de 25 mm e que a amostra seja livre de fraturas até uma profundidade de 6 cm;
- a amostra deve estar apoiada em uma base de aço com no mínimo 20 Kg;
- os blocos de rocha devem ter no mínimo 15 cm de comprimento;
- nos testes de campo, a área ensaiada deve ter no mínimo 15 cm de diâmetro;

- os testes são indicados para rochas que possuam força compressiva uniaxial entre 1 e 100 MPa, não podendo ser aplicado em rochas muito macias nem muito duras;
- cada ponto de medida deve ter uma distância mínima da borda do tamanho do diâmetro da ponta do êmbolo;
- o martelo deve estar às mesmas condições ambientais da rocha ensaiada por pelo menos duas horas;
- realizar somente uma medida em cada ponto.

A norma ASTM D5873 - 00 não recomenda que sejam realizados testes em rocha com força compressiva inferior a 1 MPa. Os impactos que produzirem marcas na rocha devem ser descartados.

Tabela 12 - Comparação entre as normas.

	RILEM NDT 3 – 1984	NBR 7584 - 1995	ASTM D5873 - 2000
Superfície	Seca, limpa e plana.	Seca, limpa e plana.	Evitar superfície rugosa e falhas visíveis, molhar a superfície 24 horas antes do ensaio.
Nº de medições	Mínimo 9	9 a 16	10
Distância mínima entre os pontos	Mínima de 30 mm	Mínima de 30 mm	Mínima de 25 mm
Área de ensaio	De 100 x 100 mm a 200 x 200 mm	De 90 x 90 mm a 200 x 200mm	> 150 mm de diâmetro
Dados	-	Eliminar valores que estejam mais de 10% distante da média. Calcular nova média.	Descartar as que estiverem 7 unidades distantes da média. Se ocorrer com mais de 2, descartar o conjunto de dados.

Buscando melhorar a norma ISRM, Aydin (2008) revisou e sugeriu alterações, pontos em que são necessários mais pesquisas e definiu curvas de correlação para diferentes tipos de rochas. Dentre suas sugestões é possível citar:

- realização de duas leituras padrão antes e depois de cada série de testes;
- núcleos devem ter o tamanho mínimo de 54,7 mm para o martelo L e 84 mm para o martelo N;
- espaço de 2 cm (diâmetro do êmbolo) entre os pontos de impacto;
- coletar valores de 20 impactos individuais;
- o ensaio pode ser abortado caso 10 leituras subsequentes tenham uma diferença de 4 unidades. Quando não houver quantidade de amostras microestruturalmente uniformes e a rocha não for isotrópica, pode-se realizar vários conjuntos de medida em várias faces do bloco ao longo de quaisquer quatro linhas retas com rotação do núcleo em 90°;
- devido à baixa absorção das rochas, o ensaio deve ser realizado em estado seco, devido à dificuldade de alcançar a saturação uniforme;

- nas aplicações em campo, o operador deve registrar as dimensões aproximadas dos blocos testados, sua aparência e rugosidade da superfície original;
- o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) do êmbolo do material e do raio de curvatura da ponta do êmbolo (r) devem ser fornecidos pelos fabricantes;
- em campo deve-se evitar realizar testes em pontos com fissuras e descontinuidades, rochas com possibilidade de deformação vertical e vibração, principalmente as laminadas, foliadas ou intemperizadas, e mesmo naquelas onde a fratura esteja na face oposta ao teste. No campo, esses locais devem ser evitados devido à dificuldade de fixar o corpo de prova a uma base firme.

O relatório de ensaio deve incluir as seguintes informações:

- uma descrição litológica da rocha (de preferência na ordem de força, cor, textura/estrutura, intemperismo/alteração, nome da rocha com tamanho de grão como prefixo);
- localização geográfica e profundidade de amostragem ou localização *in-situ*;
- data da coleta ou da escavação, ensaio e condições de armazenamento ou clima (isto é, a exposição à temperatura extrema, umidade, etc.);
- número da amostra ou da face;
- tipo de amostra (núcleo, frente de escavação ou exposição natural);
- método de produção de escavação ou bloco;
- dimensões dos espécimes ou superfícies de exposição;
- a umidade da amostra durante o teste (teor de água % ou em termos descritivos, como seco/úmido);
- tipo martelo (L, N ou outro tipo);
- uso e natureza de fixação e suporte de base de aço;
- orientação do eixo do martelo (a direção do impacto) com referência à horizontal (em graus, sendo +90° para baixo e -90° para cima);
- orientação do eixo do martelo em relação às características de anisotropia da rocha (por exemplo, laminação, foliação, lineação, xistosidade);
- histograma de 20 leituras de ricochete (normalizados para direção do impacto horizontal e ordenar o valor de maneira decrescente), a média, moda, mediana e séries estatísticas (os valores médios devem ser arredondados);
- fotografias (ou descrição) dos pontos de impacto antes e após a medida.

4.2.5. Revisão bibliográfica sobre esclerometria

As normas técnicas ainda necessitam ser revisadas para definir o número mínimo de impactos que representem adequadamente a dureza da superfície. Neste processo são eliminadas as medidas mais baixas, que são referentes a fraturas internas, sendo calculada a média dos outros valores.

Nos granitos de alta e média resistência, biotita é o mineral que controla a resistência deste tipo de rocha (Marques *et al.*, 2010). Nas rochas muito resistentes, como por exemplo, o granito, a perda de resistência entre a rocha sã e moderadamente alterada, conforme classificação sugerida pela ISRM pode ser de até 80% (Dearman e Irfan, 1978).

Com relação aos dados, os valores de repique obtidos em impactos não horizontais são afetados por forças da gravidade. Para anular estes efeitos os valores de repique são corrigidos tendo como referência a direção horizontal (Aydin e Basu, 2005). Curvas de correção são estipuladas pela ISRM (1978) e pela ASTM D5873 (2000) para fazer essa normalização. As curvas de correção propostas pelos fabricantes são, na maioria das vezes, estipuladas para concreto (Aydin e Basu, 2005). Estas curvas foram testadas em sua aplicabilidade por Basu e Aydin (2004) para uma grande variedade de rochas. Curvas de correção (Figura 21) foram por eles desenvolvidas e servem para medidas obtidas em rocha graníticas em qualquer direção com qualquer tipo de esclerômetro.

Figura 21 - Curvas de correção para os martelos N e L (Basu e Aydin, 2004).

Relações empíricas foram desenvolvidas entre diversos tipos de rochas e seus respectivos valores de ricochete, força compressiva uniaxial, módulo de elasticidade, velocidade de onda P, porosidade efetiva, absorção de água e peso da rocha seca e saturada. A conclusão foi que não é possível ter uma relação aplicável entre rochas distintas, mesmo que as condições experimentais sejam as mesmas (Yagiz, 2009). Há boa correlação quando são comparados dados de esclerômetro e porosidade. Os valores médios do número de ricochete obtidos em diferentes rochas foram multiplicados com os respectivos valores de densidade seca e, em seguida, correlacionados com os valores correspondentes da força compressiva uniaxial. Multiplicando o número do ricochete pela densidade seca, houve melhora na correlação com a força compressiva (Cargill e Shakoor, 1990).

O modo de adquirir os dados ainda é muito diverso. Poole e Farmer (1980) realizaram uma revisão bibliográfica quanto aos métodos de obtenção de dados e encontraram divergências e falta de base estatística na análise dos resultados.

Impactos múltiplos em um mesmo local mostram melhor o grau de intemperismo do que um único impacto, concluindo que o aumento da energia de impacto e o diâmetro da ponta do êmbolo reduzem a dispersão dos dados em rochas alteradas de granulação grossa, colocando o esclerômetro como uma ferramenta confiável na caracterização das rochas. Quando as amostras de teste ou superfícies exibirem graus variáveis de intemperismo, a diminuição do valor de recuperação do primeiro para o segundo impacto no mesmo ponto pode ser tomada como um índice de mecânica de desgaste (Aydin e Basu, 2005). Repetir as medidas em um único ponto por 5 ou 10 vezes gera valores mais consistentes do que as leituras de um único impacto, pois quando é realizada uma única medição por ponto, pode ocorrer um valor de pico que não corresponde a realidade. Realizando testes sobre o número de impactos em um mesmo ponto, foi encontrado que valor médio aumentou com a utilização de três ou quatro impactos. A conclusão foi de que para obter valores de rebote reprodutíveis, o maior rebote de cinco impactos sucessivos no mesmo local deve ser usado (Poole e Farmer, 1980). Aydin e Basu (2005) realizaram a comparação entre o grau de alteração das rochas, o número do repique para os martelos N e L, UCS e E.

Aydin (2008) discorda de Poole e Farmer (1980) e mostra que em termos de procedimentos de levantamento e redução de dados, leituras de impacto único é a única abordagem racional. O procedimento de impactos múltiplos em um único ponto pode alterar a microestrutura original da superfície da rocha testada, resultando na perda de informações valiosas. Existe o perigo de deslizamento por atrito e a remoção de material da ponta do êmbolo por lascamento e uma transferência parcial da energia de/para o martelo. Isso pode ser evitado, mantendo o martelo perpendicular à superfície testada. Aydin e Basu (2005)

acreditam que um pico de leitura pode ser devido à compactação gerada pelo impacto, principalmente em rochas intemperizadas.

O tamanho, a distribuição de grãos e a relativa força da matriz têm uma influência considerável no grau de dispersão dos valores de resistência. Quando uma superfície contém grãos com dimensões comparáveis à ponta do diâmetro do êmbolo, as leituras destes grãos podem desviar-se significativamente da média, dependendo da sua força em relação à matriz ou tamanho do grão dominante. Em tais casos, pontos de impacto devem ser selecionados para obter valores de rebote individuais de grãos grossos e matriz, separadamente (Aydin, 2008).

Rochas poliminerálicas enfrentam problema quando o assunto é mudança microestrutural, pois cada mineral que a compõe possui uma susceptibilidade diferente ao intemperismo. Neste caso é esperada a perda de energia por espalhamento no momento da medição, especialmente em rochas com granulação grossa, onde os minerais possuem tamanho próximo ao diâmetro da ponta do êmbolo (Aydin e Basu, 2005). É importante compreender as variações nas leituras, pois elas são estritamente relacionadas com a heterogeneidade do material e, portanto, todos os valores devem ser levados em consideração (Amaral *et al.*, 1999).

Estudos mostram que, dentre rochas que possuem o mesmo número de repique, as que possuem maior densidade podem também possuir maior força compressiva. Tal fato foi verificado estudando a relação entre força compressiva e número de repique obtido pelo martelo Schmidt, que é melhorada multiplicando o número de rebote pela densidade da rocha (Deere e Miller, 1966 apud Cargill e Shakoor, 1990).

Os valores de ricochete decrescem não linearmente quanto maior a quantidade de água contida na rocha (Sumner e Nel, 2002). Os valores do IE podem ser até 20% menores em rochas saturadas, se comparadas com as secas (Tam *et al.*, 1991 apud Evangelista, 2002). O teor de umidade da rocha dentro da zona de influência do impacto pode afetar consideravelmente os valores de rebote dependendo do seu caráter microestrutural. Umidade facilita deslizamento intergranular e conduz ao amolecimento dos grãos, facilitando o processo de intemperismo. Estes mecanismos são mais eficazes em rochas intemperizadas, porosas, frouxamente cimentadas e/ou com presença de argilominerais alterados, mas podem também ser significativos em rochas cristalinas frescas com microfissuras abundantes entre os grãos (Aydin, 2008).

Planos de anisotropia nas rochas xistosas e laminadas como ardósia e filito controlam a resposta ao impacto e à carga. Os valores de ricochete são fortemente reduzidos quando a direção do impacto é normal a um dado plano, pois eles absorvem a energia do impacto enquanto os valores da UCS (força compressiva uniaxial) e E (módulo de elasticidade) diminuem acentuadamente em ângulos oblíquos à anisotropia. Portanto, a

utilização de Martelo de Schmidt em tais rochas não é recomendada a menos que existam placas intactas com espessura maior do que 10 cm (Aydin, 2008).

Como os valores UCS e E de um material são fortemente influenciados pela densidade de distribuição e conectividade dos elementos microestruturais frágeis, leituras de ricochete baixas e altas são igualmente necessárias para refletir a natureza da heterogeneidade e das propriedades mecânicas. Portanto, nenhuma leitura deve ser descartada, e a média (aritmética), a mediana (valor médio), a moda (maior valor de repetição) e a série das leituras devem ser apresentadas para expressar plenamente as variações na dureza de superfície (Aydin, 2008).

A maioria das classificações de grau de alteração em rochas utiliza critérios subjetivos, que insere grande incerteza quanto à precisão desta classificação, pois depende do julgamento do observador. Os métodos quantitativos, como o martelo de Schmidt, eliminam a incerteza inerente ao qualitativo e mostram de maneira mais prática, objetiva e consistente as características de certo material. O esclerômetro é capaz de mostrar uma leve degradação na rocha com redução sensível no número do ricochete (Aydin e Basu, 2005).

Granitos do estado de São Paulo foram classificados de acordo com seu grau de intemperismo (Basu *et al.*, 2009):

- Grau I: não há descoloração, grãos apresentam brilho vítreo e textura equigranular com contornos de grãos intactos;
- Grau II: descoloração leve a moderada, grãos com brilho vítreo a subvítreo e contornos de grãos intactos;
- Grau II - III: grãos apresentam brilho subvítreo, minerais argilosos são comuns, o contorno dos grãos permanece intacto e não é facilmente quebrado por martelo geológico;
- Grau III: moderadamente decomposto, quantidade abundante de minerais argilosos, pode ser arranhada pela unha, grãos com contornos intactos e facilmente quebrada por martelo;
- Grau IV: altamente decomposto (feldspatos em pó), grão soltos em seus contornos, grandes peças podem ser quebradas a mão e alta absorção de água.

A classificação utilizando métodos baseados em critérios quantitativos é obviamente mais vantajosa do que a classificação proposta acima, pois esta última baseia-se em critérios subjetivos (qualitativos). No entanto a classificação subjetiva pode servir de base para a determinação de critérios objetivos em cada tipo de rocha.

O índice esclerométrico mostrou relação direta com os graus de intemperismo de grau III e III-IV, tendo como objeto de estudo a diminuição do valor entre os dois primeiros impactos em um mesmo ponto. Esta abordagem precisa ser adaptada para rochas não graníticas. Nesta abordagem direta, deve-se ter cuidado com rochas semelhantes que

apresentem granulometria distinta (Aydin e Basu, 2005). Os graus de alteração V e VI não podem ser classificados de acordo com seu índice esclerométrico. Nos outros graus foram estabelecidos índices esclerométricos de referência usando o martelo tipo L (Basu *et al.*, 2009).

Os valores de índice esclerométrico para outras rochas também foram estabelecidos, como mostra a Tabela 13 (Tugrul e Zarif, 1999).

Tabela 13 - Índices esclerométricos para rochas graníticas provenientes de diferentes localizações geográficas na Turquia (Tugrul e Zarif, 1999).

Sigla	Rochas	Máximo	Mínimo	Média
Gr1	Quartzo monzonito	70	68	69
Gr2	Quartzo monzodiorito	68	61	64
Gr3	Quartzo monzonito	69	63	68
Gr4	Quartzo sienito	67	62	67
Gr5	Quartzo diorito	66	61	65
Gr6	Quartzo monzodiorito	68	63	66
Gr7	Granito	67	63	67
Gr8	Granito	72	69	72
Gr9	Monzogranito	70	68	69
Gr10	Granito monzogranito	71	69	70
Gr11	Granito	71	68	69
Gr12	Quartzo monzonito	71	67	70
Gr13	Quartzo monzonito	65	62	65
Gr14	Granodiorito	71	65	67
Gr15	Granito	71	70	71
Gr16	Tonalito	69	65	68
Gr17	Granodiorito	65	63	65
Gr18	Granodiorito	72	71	72
Gr19	Granodiorito	72	70	71

4.2.6. Exemplos da aplicação do esclerômetro em rochas

Poole e Farmer (1980) compararam procedimentos com intuito de verificar qual é o mais adequado para gravar valores e propiciar a repetibilidade dos dados. Eles utilizaram martelo tipo N em dois grupos. No primeiro as medidas foram realizadas em uma coluna de calcário de 20 cm utilizando uma malha de 4 x 4 cm. Foram realizadas 3 séries de impactos, sendo que na primeira e segunda séries a superfície foi submetida a 10 impactos em cada ponto e 15 impactos em cada ponto na terceira série. Todos os valores foram registrados, porém os inferiores a 30 foram omitidos para análise. No segundo grupo as medidas foram

realizadas em um túnel de calcarenito a cada 1 m, por uma distância de 280 m, sendo realizados pelo menos 10 impactos em cada ponto. Todos os valores foram considerados. Para todos os dados foram calculados desvio padrão, média e coeficiente de variação. Os valores mostraram pequeno aumento após o décimo impacto. Os autores observaram que mesmo em uma pequena área aparentemente homogênea, há variações entre os pontos testados. Eles sugerem que o maior de 5 impactos em um mesmo ponto seja registrado, pois os valores tendem a variar e subir nos primeiros 3 ou 4 impactos.

Em seu experimento, Cargill e Shakoore (1990) utilizaram dez núcleos de cada tipo de rocha aplicando as técnicas de compressão uniaxial, índice de resistência puntiforme e testes com esclerômetro. Os resultados indicam que fortes correlações lineares existem entre estes testes, sendo que a correlação para o martelo Schmidt é dependente do tipo de rocha. Os valores médios do número de ricochete obtidos em diferentes rochas foram multiplicados com os respectivos valores de densidade seca e, em seguida, correlacionados com os valores correspondentes da força compressiva uniaxial.

Buyuksagis e Goktan (2006) realizaram testes em laboratório com martelos L e N, em 27 rochas diferentes, dentre elas granitos (amostras 1-6), mármore (7-13 e 20), serpentinito (14) e calcários travertinos (21-27). Todos os testes foram realizados com o equipamento na posição vertical para baixo e horizontal.

Os resultados encontrados encontram-se descritos na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de ricochete para as rochas testadas (adaptado de Buyuksagis e Goktan, 2006).

Amostra	Martelo L					Martelo N				
	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5	RN1	RN2	RN3	RN4	RN5
1	63,1	61,1	66,7	70,2	61,1	81,6	79,6	82,7	83,2	79,6
2	57,9	55,9	60,2	59,3	55,9	71,2	70,0	73,0	73,6	70,2
3	56,5	54,5	58,7	59,0	54,5	68,1	66,1	68,5	69,5	66,1
4	51,6	49,8	57,5	60,5	49,8	60,7	57,7	64,5	66,0	57,7
5	50,9	48,7	53,7	56,5	47,8	67,0	64,2	70,2	71,0	64,2
6	58,2	56,2	60,5	63,5	56,2	66,5	63,6	70,7	71,5	63,6
7	50,9	48,9	51,2	52,3	48,9	58,5	56,7	58,2	59,0	56,7
8	47,5	45,5	46,2	48,5	45,5	52,5	50,5	56,2	56,7	50,8
9	33,3	30,4	32,5	35,5	29,9	40,1	37,4	45,0	45,5	37,1
10	45,7	43,6	48,2	52,5	43,6	54,1	52,0	55,7	57,0	52,0
11	52,7	49,7	51,2	54,5	49,7	59,0	56,9	61,2	62,0	56,9
12	38,6	36,5	42,5	43,0	36,5	48,5	46,6	53,2	55,0	46,6
13	36,7	33,7	38,7	39,2	33,7	44,7	42,6	50,7	53,2	43,0
14	41,4	38,8	42,7	43,0	38,4	47,5	45,4	48,5	49,5	45,4
15	43,3	40,6	45,5	46,0	40,3	51,2	48,5	52,0	52,5	48,2
16	45,2	42,5	48,5	49,0	42,1	51,6	49,0	52,5	52,0	48,6
17	47,2	45,6	52,2	54,5	45,6	55,3	53,5	56,0	56,2	54,1
18	43,6	40,5	46,0	46,5	40,4	50,6	48,8	51,0	51,5	49,2
19	39,7	37,2	40,2	41,0	36,7	45,3	42,2	47,5	48,0	42,1
20	42,2	39,6	42,5	43,0	39,2	49,5	47,6	50,2	49,5	47,9
21	45,7	41,8	48,2	49,0	40,7	55,8	52,8	57,0	57,5	52,8
22	34,5	32,2	36,2	37,0	29,2	42,2	40,3	42,5	43,0	40,3
23	45,6	42,6	49,2	48,7	42,6	55,6	53,6	56,2	55,5	53,6
24	41,9	40,7	44,7	47,5	41,0	50,4	48,2	52,0	53,5	48,2
25	40,2	37,9	45,5	46,5	36,1	52,7	50,4	54,2	54,5	50,4
26	43,3	41,3	46,7	47,0	41,3	53,2	50,7	54,2	56,5	50,3
27	30,3	27,9	32,5	33,0	27,9	40,1	37,4	40,7	41,5	36,8

Analisando os resultados, os autores concluem que o martelo N é mais eficaz para rochas com UCS entre 20 e 290 MPa. Tal fato se deve a maior energia de impacto produzida por este martelo, que ajuda a caracterizar a rocha mais profundamente do que o martelo L. Em seus dados observaram melhores resultados quando foram realizados vários impactos em um mesmo ponto, em detrimento a impactos únicos, assim como observado por Hucka (1965) e Poole e Farmer (1980).

Vellone e Merguerian (2007) usaram o martelo tipo L para verificar as propriedades mecânicas em 15 núcleos de rochas de várias localidades da cidade de Nova Iorque. Seguiram a metodologia da ASTM-D5873. Eles agruparam as amostras de acordo com suas características litológicas e compararam os resultados com os de um estudo anterior.

Os resultados encontrados encontram-se descritos na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores encontrados por Vellone e Merguerian (2007) com a utilização do esclerômetro.

Tipo de rocha	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão
Rochas xistosas Hartland	25,3	35,0	12,0	5,5
Anfibolitos Hartland	30,1	39,0	23,0	3,8
Mármore Inwood	33,3	42,0	23,0	4,5
Xisto Manhattan	34,0	45,0	21,5	4,1
Entrecamadas de xisto e rochas calciossilicáticas Walloomsac	43,1	54,4	29,0	4,6
Gnaiss Fordham	44,3	56,5	28,5	3,2

Na tentativa de correlacionar os valores de rebote (H_R) com propriedades de geologia de engenharia de diferentes tipos de rochas, alguns autores desenvolveram equações de correlação (Tabela 16) que foram utilizadas para determinar as propriedades mecânicas das rochas.

Tabela 16 - Equações desenvolvidas para correlacionar a força compressiva uniaxial e o índice de repique (Vellone e Merguerian, 2007).

Autor	Tipo de rocha	Coefficiente de regressão	Equação simplificada
Singh <i>et al.</i> (1983)	30 unidades sedimentares	0,72	$UCS=2H_R$
Shorey <i>et al.</i> (1984)	20 unidades litológicas	0,94	$UCS=0,4 H_R - 3,6$
Haramy; DeMarco (1985)	10 unidades litológicas	0,70	$UCS=0,994H_R - 0,383$
O'Rourke (1989)	arenito, siltito, calcário, anidrito	0,77	$UCS=702H_R - 11040$ (psi)
Sachpazis (1990)	31 unidades litológicas	0,91	$UCS=(H_R - 15,7244)/0,2329$
Aggistalis (1996)	basalto e gabro	0,55	$UCS=1,31 H_R - 2,52$
Katz <i>et al.</i> (2000)	7 tipos de rochas	0,96	$UCS=0,792 + 0,067H_R \pm 0,231$

Sánchez *et al.* (2008) trataram do aumento da porosidade devido a processos de decaimento em um tipo de granito utilizado em construções na cidade de A Coruña, o Leucogranito São Pedro. Para obter o índice esclerométrico, eles utilizaram martelo tipo N, o número de medidas variou e os locais foram escolhidos randomicamente.

Duas categorias de rochas foram diagnosticadas devido ao diferente grau de intemperismo:

- CSP1: menos alterado, mais claro – parte nordeste da pedreira;
- CSP2: mais amarelada, alterada e fraturada – canto sudoeste da pedreira.

Foram realizados testes de absorção de água e o resultado foi de 1.114% (± 0.004) para CSP1 e 4.065% (± 0.119) para CSP2. Os valores de ricochete encontrados foram 55.91 ± 2.73 para CSP1 e 40.04 ± 2.99 para CSP2.

Os testes mostraram boa correlação entre os valores de ricochete e a porosidade das rochas. Este método pode ser utilizado como um sistema simples para avaliar rochas de cantaria intemperizadas a serem tratadas por consolidantes.

Basu *et al.* (2009) caracterizaram granitos do estado de São Paulo por estudo petrográfico e determinaram o grau de alteração por densidade, ondas ultrassônicas e martelo de Schmidt. Aqui serão exibidos os resultados encontrados com o martelo. Eles consideraram que os resultados obtidos a partir de múltiplos impactos são mais efetivos para determinar o grau de alteração do que impactos únicos, densidade e até mesmo velocidades de ondas P. No presente estudo, um conjunto de cinco fatores de reconhecimento (descoloração e/ou coloração, brilho do grão, limites do grão, força relativa e desintegração) foi identificado e usado para descrever mudanças graduais dos materiais graníticos causadas por intempéries.

Para os testes com esclerômetro, foram utilizados os equipamentos N e L, 5 pontos de teste escolhidos randomicamente e em cada ponto foi realizado um único impacto. Os resultados encontrados foram:

Grau I: $R_L \rightarrow 51,60 - 55,38$, $R_N \rightarrow 62,09, 64,74$;

Grau II: $R_L \rightarrow 46,69 - 51,98$, $R_N \rightarrow 56,61, 60,01$;

Grau II - III: $R_L \rightarrow 41,76 - 48,01$, $R_N \rightarrow 47,71, 57,75$;

Grau III: $R_L \rightarrow 36,24 - 42,71$, $R_N \rightarrow 43,16 - 48,09$;

Grau IV: $R_L \rightarrow 20,64$, $R_N \rightarrow 24,21$.

R_L e R_N referem-se à média geral das 5 medidas randômicas realizadas em 5 amostras.

Na etapa seguinte, 4 leituras foram feitas no mesmo ponto. Neste caso o valor mais alto foi encontrado no segundo impacto e a leitura parou de diminuir entre o terceiro e quarto impactos. O martelo N mostrou melhor desempenho para caracterizar os graus de alteração. A velocidade das ondas ultrassônicas foi medida a cada golpe para verificar se a velocidade acompanharia a compactação causada pelo martelo e surpreendentemente não houve aumento e sim diminuição significativa da velocidade, mostrando que a compactação ocorre apenas superficialmente. Pode-se ainda inferir, devido à diminuição da velocidade, que os impactos múltiplos podem causar fraturas internas.

4.2.7. Metodologia utilizada

O esclerômetro com o qual foram realizadas as medidas é o *Digital Rebound Hammer*, modelo W-D 1500, do fabricante NDT *James Instruments Inc.* (Figura 22). Este é

um esclerômetro tipo L, que possui menor energia de impacto. Nas configurações foi escolhido o modo “R”, que exibe na tela o valor do repique. O equipamento possui a possibilidade de estimar diretamente a força compressiva. No entanto, o martelo faz os cálculos para concreto, não sendo ideal para rochas. No menu do aparelho há a opção de colocar a direção do impacto que será realizado o ensaio (vertical para cima, -90° ; vertical para baixo, $+90^\circ$ ou horizontal, 0°).

Foram realizados 20 impactos na direção $+90^\circ$, sendo 10 em cada face e mais 20 impactos na direção 0° , totalizando 40 impactos. Todos estes testes foram realizados em amostra fresca no laboratório, pois o monumento possui acabamento apicoado e o martelo deixaria marcas, impossibilitando a realização de testes *in situ*.

A norma utilizada para a realização do teste e cálculo da média foi a ASTM D 5873 - 00. A correção dos valores obtidos em relação ao ângulo do ensaio já é realizada pelo próprio aparelho.

Figura 22 - Esclerômetro utilizado.

4.3. Tubo de *Karsten*

4.3.1. Introdução

A degradação é controlada por três fatores principais: características da rocha (porosidade, tamanho dos grãos, mineralogia e estrutura), fatores ambientais (temperatura, poluição e pluviosidade) e solubilidade (acidez, presença de íons ou moléculas e ligação iônica), que levam a alteração de outros elementos. A porosidade tanto controla, como afeta

o processo de intemperismo, levando a alterações no padrão, tamanho e distribuição dos poros (Ballesteros *et al.*, 2011).

As pedras de revestimento perdem sua competência principalmente devido à ação da água (Apps, 2011). Quando os poros possuem dimensões de Å a nm, muitas das moléculas de água não são estáveis e os íons OH^- aparecem livres, iniciando o processo de degradação, que ao ligarem-se aos minerais das rochas, dissolvem-nos, alteram-nos e/ou os transformam em fração argila. Quando os poros possuem dimensões de nm a μm , as moléculas de água são estáveis e aderem às paredes e praticamente não se movimentam, degradando a rocha por difusão, gerando microambientes com características particulares como nódulos. Quando os poros possuem dimensões de μm a cm, o fluxo da água começa a ser importante e se houver boa drenagem, ocorre a lixiviação de solutos (Brady, 1989).

Permeabilidade é uma medida que mostra a facilidade com que um fluido se move através da rocha. De modo geral, rochas frescas possuem baixa permeabilidade. No entanto, quando as rochas possuem fraturas, os fluidos podem percolá-las mais facilmente. Muitas vezes a permeabilidade é representada por um número, que independe da direção do fluxo (Hudson e Harrison, 1997).

4.3.2. Método do tubo de Karsten

O tubo de Karsten (Figura 23) foi desenvolvido na Alemanha em 1958-1960. O método é não destrutivo e fácil de usar *in-situ*, sendo, muitas vezes, utilizado por conservadores-restauradores. O tubo é feito de um corpo vidro cilíndrico graduado e aberto, que é fixado a uma superfície, a qual se quer analisar, que pode ser horizontal ou vertical, existindo um tubo específico para cada uma dessas orientações. Para realizar o ensaio, o tubo é preenchido com água destilada. A absorção de água é determinada de acordo com o tempo pela leitura do abaixamento do nível da água. A absorção de água corresponde à estrutura dos poros do material e dá a informação sobre a sua condição de conservação.

Os ensaios de permeabilidade podem ser realizados por infiltração, capilaridade, por pressão ou por vapor de água (Galvão, 2009). A permeabilidade à água sob baixa pressão é a propriedade do material de ser atravessado por água sob um determinado gradiente de pressão. Podem ser utilizados para prever a vulnerabilidade potencial à deterioração pela água de superfícies sãs e sem tratamento. A permeabilidade de um material à água é alterada quando sua superfície é modificada pela presença de sujidade atmosférica ou pelo crescimento biológico, ou quando há sais higroscópicos no interior. A formação de uma

crosta de alteração devido a mudanças mineralógicas ocorridas na superfície exposta (intemperizada) pode afetar substancialmente as medições de absorção de água.

O ensaio com o tubo de *Karsten*, que também é conhecido como cachimbo, mede a absorção à água líquida sob baixa pressão em zona não fissurada, por meio do coeficiente de absorção em determinado período de tempo. Esta técnica possibilita a diferenciação entre uma amostra com e sem tratamento com hidrófugo e serve como complementar em estudos de capilaridade para saber se há degradação em profundidade. O ensaio com cachimbo pode ainda determinar o grau de proteção que é conferido a uma superfície que recebeu a aplicação de hidrófugo, além de poder acompanhar com o passar do tempo, a perda da ação deste tratamento, possibilitando que nova intervenção seja realizada em tempo ideal, evitando que a rocha tenha maior degradação pelo aumento do contato com a água. Pode ainda ser usado como um indicador de outros tratamentos como, por exemplo, consolidantes e para monitorar intervenções como processos de limpeza. Informações sobre absorção e o ângulo de contato entre a rocha e a água são utilizadas para verificar a eficácia de tratamentos para repelir água (Delgado Rodrigues *et al.*, 1994).

Um tratamento eficaz deveria reduzir substancialmente a permeabilidade da rocha ou alvenaria à água. Para uma avaliação mais aprofundada e embasada, é interessante que os resultados obtidos *in situ*, com a utilização do cachimbo, que caracterizam a rocha quantitativamente, sejam combinados com ensaios em laboratório e aliados a outras técnicas não destrutivas para que seja possível determinar o grau de degradação da superfície ensaiada.

O ensaio de absorção utilizando o método do cachimbo é realizado em materiais como reboco, concretos, tijolos e argamassas. Para realização dos ensaios, a norma RILEM (1980) prevê o uso de massa de vidraceiro para fixação dos tubos.

Soares (2010) tentou fixar os tubos com *durepox®* e com massa de modelar, porém ambos se mostraram ineficazes, pois houve vazamento entre 25 a 30 minutos de ensaio. O produto de fixação que se mostrou bastante eficiente foi o silicone que, porém exige certo tempo de secagem entre a aplicação e o preenchimento do tubo com água.

Apps (2011) testou alguns materiais para fixação do tubo e concluiu que dentre o silicone, a massinha de modelar e a massa antivibratória, o silicone é o melhor vedante e a massinha de modelar é o pior. A massa antivibratória é mais prática que o silicone, pois não exige tempo de secagem. A massa de modelar e a massa antivibratória provocam maior redução na área de contato entre a água e a superfície testada, reduzindo a área de absorção. O autor, de acordo com os resultados de seus testes, não indica a utilização da massinha de modelar.

Após tentativas com vários materiais de fixação, Rodrigues (2012) optou pelo alginato na fixação do cachimbo.

LNEC (2002) caracterizou o procedimento de absorção sob baixa pressão utilizando tubo de Karsten (LNEC FE Pa 39.1) em substituição às normas RILEM (1980). Sugere que se fixe o cachimbo com silicone, ou outro material apropriado; elimine excessos deste material evitando que a área de contato entre água e superfície sofra redução; seque o material de fixação durante pelo menos 2 minutos à temperatura ambiente; complete o tubo com água até à graduação 0 cm; registre a primeira leitura 5 minutos após ter enchido o tubo com água; faça as leituras seguintes em 10, 15, 30 e 60 minutos. Caso o material seja muito ou pouco poroso, os tempos de leitura podem ser alterados.

Figura 23 - Desenho esquemático dos cachimbos vertical e horizontal (Apps, 2011).

Com os dados obtidos nos ensaios, são realizados gráficos do volume de água absorvida em função do tempo. O coeficiente de absorção de água é dado pela inclinação da reta obtida e a unidade é kg/m^2 (Scartezini *et al.*, 2002). Caso a fachada ensaiada sofra ação da chuva, o ensaio não está perdido e de acordo com Künzeli *et al.* (2004) a absorção pode ser calculada através da Equação 6.

$$A_{\text{fachada}} = C_{\text{absorção}} \sqrt{T_{\text{chuva}}} \quad (6)$$

Onde:

A_{fachada} = absorção de água (kg/m^2);

$C_{\text{absorção}}$ = coeficiente de absorção de água da camada superficial ($\text{kg}/[\text{m.vh}]$) - inclinação da curva do gráfico com a absorção de água nas ordenadas e a raiz quadrada do tempo nas abscissas;

T_{chuva} = tempo do ensaio (h).

A PROCEQ (2001 apud Gonçalves, 2010) sugere uma Equação 7 para calcular o coeficiente de absorção de água a baixa pressão.

$$C_{\text{absorção}} = \frac{X * 10^{-3}}{d^2 * (\frac{\pi}{4} * 10^{-6} * \sqrt{t})} \quad (7)$$

Onde:

$C_{\text{absorção}}$ = coeficiente de absorção de água da camada superficial (kg/[m.vh]);

X = quantidade de água absorvida (em ml);

d = diâmetro da superfície em que é feita a penetração de água (mm);

t = duração da leitura (h).

Apps (2011) observou que existe reprodutibilidade dos resultados desde que seja respeitada a altura do ensaio, pois os resultados variaram quando o tubo foi fixado em alturas diferentes. Nos testes realizados *in situ* a reprodutibilidade não é tão visível se comparado com os resultados encontrados em laboratório ou em muros experimentais, devido às condições de aplicação dos revestimentos.

O Conselho de Patrimônio Nacional da Suíça durante alguns anos monitorou e avaliou tratamentos de conservação em pedra. O objetivo principal era que essas avaliações possibilitassem saber quando a pedra necessitava ser tratada novamente. Foi realizada intensa pesquisa bibliográfica sobre métodos não destrutivos que eram utilizados em rocha, na Suíça. Os métodos encontrados foram muitos. Dentre eles estão métodos para avaliação de resistência e propriedades mecânicas, para avaliação do conteúdo de água dentro das rochas, avaliação de alteração cromática, métodos de absorção de água, medições do conteúdo de sais solúveis, dentre outros. Durante o processo, muitos cientistas europeus foram consultados. No que se refere ao uso do tubo de Karsten, ele foi considerado um bom indicador da durabilidade do tratamento. Diversos testes foram realizados para chegar a esta conclusão. Para guiar estes ensaios, foi utilizada a norma EN 13755:2008 - *Natural Stone Test Methods - Determination of water absorption at atmospheric pressure* do Comitê Europeu de Normalização - CEN (Svahn, 2006).

4.3.3. Descrição do método do tubo de *Karsten*

Tubos de Karsten para superfícies verticais são equipamentos de vidro em forma de cachimbo graduados de 0 a 4 ml com marcas intermediárias de 0,1 ml, permitindo leituras de 0,05 ml. Possui a parte inferior em formato cilíndrico e com o fundo fechado. Na parte que fica em contato com a superfície existe uma borda na qual geralmente é passado o material para fixação na superfície ensaiada. As leituras do abaixamento da coluna de água

são tratadas em cm^3/h . O tubo é preenchido com água até a marcação de 4 ml. Segundo LNEC (2002) a altura do tubo é de 9,8 cm, o que corresponde a 961,38 Pa ou a uma pressão dinâmica do vento de 142,6 Km/h.

O aparelho concebido para aplicação em superfícies horizontais (Figura 24) é formado da mesma maneira que o tubo vertical. A altura total da coluna de água aplicada na superfície, medida a partir da borda plana, circular para a gradação de nível superior, é de 13,4 cm. Isto corresponde a uma pressão de 1314,5 Pa (aproximadamente 0,19 psi), ou, uma pressão dinâmica do vento de 166,8 km/h (aproximadamente 103,7 mph) (RILEM, 1980).

Figura 24 - Tubos de karsten para superfícies horizontal e vertical.

A absorção de água é calculada pelo volume absorvido, sendo que este é diretamente proporcional à porosidade do material ensaiado.

4.3.4. Fatores que influenciam os resultados do ensaio

Os resultados podem variar de acordo com a pressão que a água exerce na superfície de teste, que depende da altura da água dentro do cachimbo, sendo que quanto maior a pressão, maior a absorção. Pode-se citar ainda o material de fixação, pois dependendo do produto utilizado, este poderá influenciar os valores observados,

absorvendo água do cachimbo ou diminuindo a superfície de contato. Outros fatores são a umidade relativa do ar, temperatura, chuva e saturação da superfície.

Medidas de laboratório em rochas poliminerálicas e com baixa porosidade como os granitos apresentam algumas dificuldades como preparação da amostra e heterogeneidade local, que muitas vezes se deve ao tamanho dos grãos (Delgado Rodrigues *et al.*, 1994).

4.3.5. Vantagens e desvantagens

As vantagens deste procedimento são aplicação simples, facilidade, baixo custo de utilização e aquisição, sem necessidade de coleta de amostras e nem de energia elétrica, pode ser realizado quando apenas uma das superfícies está disponível.

Porém é um método que não pode ser aplicado em rochas com alta porosidade, depende das condições atmosféricas e os materiais indicados para vedação podem deixar resíduos.

4.3.6. Normas técnicas

4.3.6.1. RILEM (1980) – *Water absorption tube test*

Mede a quantidade de água absorvida pela superfície de alvenaria em determinado período de tempo. É uma metodologia simples para medir a movimentação vertical ou horizontal da água dentro de materiais porosos como a alvenaria, que pode ser realizada em campo ou em laboratório.

No procedimento proposto pela RILEM (1980) o tubo de 5 ml ou 60 ml é fixado pela interposição de uma fita de massa de vidraceiro entre a borda plana e circular do tubo e a superfície do material de alvenaria. Para assegurar a adesão, a pressão manual é exercida sobre o cilindro. A água é adicionada através da borda superior do tubo, até que a coluna atinja o "0" da marca de gradação. A quantidade de água absorvida pelo material durante um período especificado de tempo é lida diretamente a partir do tubo graduado. O período de tempo apropriado para o ensaio depende da porosidade do material sobre o qual a medição é feita, em geral, 5, 10, 15, 20, 30 e 60 minutos de intervalo fornecem os dados

mais úteis. Em muitos casos, pode ser importante medir a absorção de água através da junta de argamassa. Os resultados podem ser usados para determinar o grau de proteção alcançado por tratamentos repelentes de água ou caracterizar qualitativamente, por meio de comparações, o estado em que se encontra a superfície, sendo possível estimar o grau de degradação atual do corpo ensaiado.

4.3.7. Exemplos da aplicação do tubo de Karsten em patrimônio histórico

Delgado Rodrigues *et al.* (1994) realizaram testes de hidrofugação em um granito de granulação média. A rocha estava moderadamente alterada e possuía minerais secundários, argilominerais parcialmente transformados. Quatro repelentes de água foram utilizados: polisiloxano (1), resina acrílica estirenada (2), alkilsilano (3) e resina de polifluorcarbono (4). Em uma segunda fase foram incluídos um copolímero silicônico e acrílico e uma resina metilfenilsilicônica, que são consolidantes. As amostras foram imersas no produto por 30 segundos e ficaram escorrendo por 10 segundos. A eficácia do repelente foi testada por meio do ângulo de contato entre água e rocha, tempo de absorção de microgotas e por meio da absorção de água por capilaridade por baixa pressão (cachimbo). Foi utilizada a norma RILEM (1980) para os testes de microgotas, capilaridade e cachimbo. Para saber em que profundidade o hidrofugante penetrou, o granito tratado foi cortado em finas camadas. O que penetrou em maior profundidade foi o produto 3, porém o produto 1, que foi o segundo que mais profundamente penetrou, mostrou menor absorção de água do que os outros.

Magalhães *et al.* (2003) estudaram o uso de técnicas não destrutivas em dois fortes construídos em alvenaria no século XVII em Lisboa. Aqui serão mostrados apenas os resultados obtidos com o tubo de Karsten. A metodologia utilizada foi a sugerida pela norma RILEM (1980). De modo geral os dois fortes apresentam-se em bom estado de conservação. Os testes foram realizados no reboco de três zonas dos edifícios. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 17.

Tabela 17 - Água absorvida (cm³) nos rebocos ensaiados (Magalhães *et al.*, 2003).

Tempo (min.)	Forte 1			Forte 2		
	Zona A	Zona B	Zona C	Zona A	Zona B	Zona C
5	0,97	1,97	>2,37	0,03	0	0
30	>3,67	>4	>3	0,27	0	0
60	>4	-	>3,27	0,77	0	0

Utilizando os dados mostrados acima, juntamente com os dos outros métodos utilizados pelos autores, eles concluíram que o revestimento utilizado no Forte 1 não é adequado, recomendando a remoção total ou parcial das argamassas existentes e substituição por material mais adequado. No Forte 2, os revestimentos apresentam-se com boa coesão e capacidade de proteção à água. No entanto também é sugerida a remoção devido às características do reboco atual.

Tavares e Veiga (2007) avaliaram o aumento da resistência mecânica e da capacidade de proteção à água de argamassas após o tratamento de consolidação. Foram ensaiados três tipos de consolidantes para aumentar a resistência mecânica através de depósitos de carbonato de cálcio na superfície do revestimento. A absorção de água foi medida com tubos de *Karsten* antes e depois da aplicação do consolidante para verificar o impacto das alterações sofridas. A norma utilizada para balizar os testes foi a RILEM - Teste II. 4 (1980). Os resultados mostraram que o reboco antes da consolidação é altamente permeável, que permanece alta mesmo após a consolidação, tanto *in situ*, quanto nas amostras de laboratório. O tratamento com bactérias foi o único consolidante que apresentou diminuição da absorção após sua aplicação. O consolidante menos eficaz foi a água de cal pura.

Soares (2010) realizou testes na Igreja de Santa Rita, localizada na cidade de Paraty, Rio de Janeiro. Encontrou a ocorrência de 3 granitos diferentes nos blocos de rocha de cantaria: granito maciço (Granito Parati), granito foliado com textura inequigranular seriada (Granito Parati) e leucogranito (Granito Mambucaba). Observou que os granitos foliados em geral estão mais alterados e erodidos e, devido a seu estado de degradação, a infiltração ocorre muito mais rápido que nos granitos que não estão afetados pela erosão (Figura 25). Este fato mostra que o intemperismo aumenta a absorção de água em granitos. Em relação aos dados obtidos com testes de absorção utilizando tubo de *Karsten*, o autor conclui que os blocos mais intemperizados apresentaram maior absorção e atribui este fato aos processos de desagregação que modificam o *fabric* e aumentam os espaços vazios.

Figura 25 - Valores de absorção encontrados nos granitos da Igreja de Santa Rita (Soares, 2010).

Apps (2011) realizou testes em argamassas e revestimentos de ladrilho cerâmico, *in situ* e em laboratório buscando verificar a viabilidade técnica do ensaio, a reprodutibilidade dos testes e a quantidade mínima necessária de ensaios. Estudou a influência de parâmetros como diferentes condições climáticas, altura de fixação dos tubos e materiais para fixação distintos. Ensaçou 141 tubos em muretes preparados especificamente para testes e 4 conjuntos de medidas em laboratório. A água foi repostada a cada leitura. O autor chegou à conclusão de que os tubos que foram fixados com massa de modelar apresentaram maior absorção (0,93 ml) do que os que os vedados com silicone (0,80 ml). Deduziu que essa diferença foi devido à maior absorção da massinha de modelar, que se apresentou úmida ao final do ensaio. Os ensaios de laboratório apresentaram menor dispersão dos dados devido às condições mais controladas. Locais mais degradados apresentaram maior dispersão dos dados. É necessário colocar no mínimo 10 tubos para uma área de 10 m², excluindo os 2 ou 3 resultados discordantes. Tubos colocados em alturas diferentes mostraram resultados distintos, o que foi explicado pelo aumento da pressão na superfície da água quanto maior a altura. Para os ensaios realizados, uma diferença percentual de 12,7% na pressão traduziu-se numa diferença percentual média de volume de água absorvida de 28,9%.

4.3.8. Metodologia utilizada

Os cachimbos aqui utilizados para ambas as superfícies são da marca Solotest. Os tubos foram fixados na rocha e preenchidos com água deionizada. A absorção foi auferida nos intervalos de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60 minutos. Foram utilizados os tubos para superfície vertical (Figura 26) e horizontal. Um tubo foi fixado sobre uma superfície de vidro para medir a perda de água para o ar.

Nos ensaios realizados neste trabalho, foram utilizados alguns materiais para fixação como a massinha de modelar, argila e argilinha, que é uma argila industrializada. A massa de modelar deixou marcas de gordura nas rochas e apresentou alguma absorção de água. A argila não fixou bem devido à presença de grãos de tamanhos distintos, impedindo que o cachimbo fosse bem pressionado contra a superfície, vazando depois de 15 minutos. A argila industrializada possui grãos com granulometria fina e regular e não deixou resíduos. Os resultados encontrados com a argilinha foram os considerados.

Figura 26 - Tubo utilizado para ensaio de absorção em superfícies verticais.

O tubo vertical utilizado possui uma graduação inversa, ou seja, quando está totalmente preenchido corresponde à graduação 0 (zero) (Figura 27). Este número vai aumentando com o incremento da absorção. A leitura máxima é de 3,5 ml e exibe graduação intermediária de 0,05 ml, possibilitando a leitura de 0,025 ml. A circunferência do pescoço do cachimbo reto é um pouco menor do que a do tubo curvado.

Figura 27 - Detalhe da graduação do tubo para superfícies horizontais.

4.4. Espectrofotômetro

4.4.1. Introdução

Registros históricos sobre cor mostram que em 1666 ela começou ser estudada por Newton, discutida por filósofos como Plínio e Aristóteles. Por volta de 1860 passou a ser utilizada pelos químicos para determinar a concentração de determinado elemento químico em um líquido. Newton, diferente dos outros cientistas da época que acreditavam que a luz realizava um movimento ondulatório o qual não se conhecia suas causas e efeitos, acreditava que a luz era composta por partículas. Maxwell, no final do século XIX enunciou as quatro leis de Maxwell e comprovou que a luz é uma onda eletromagnética, sendo ao mesmo tempo onda e partícula. As ondas eletromagnéticas são caracterizadas por sua intensidade e frequência ou comprimento de onda.

A luz visível aos olhos humanos compreende uma pequena parte da radiação eletromagnética que possui comprimento de onda entre 380 e 740 nm, dentre os quais existem comprimentos de onda característicos que correspondem às sete cores básicas, que em ordem decrescente, apresentam-se: vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta. As ondas eletromagnéticas (Figura 28) são classificadas (Tabela 18) quanto ao seu comprimento de onda.

Figura 28 – Ondas eletromagnéticas. (Fonte: <http://aulasdefisicafelipe.blogspot.com.br/2008/09/5-transies-segundo-o-modelo-de-bohr.html>).

Tabela 18 – Classificação da onda eletromagnética de acordo com seu comprimento de onda.

Tipo	Comprimento de onda (nm)
Raios cósmicos	0,001
Raios gama	0,01
Raios X	1
UV distante	100
Ultravioleta	200
Luz visível	400-700
Infravermelho	3.000
IV distante	30.000
TV/rádio	300.000

Reflexão, absorção e refração são os três fenômenos que podem ocorrer quando a luz incide sobre um objeto. A luz só será transmitida quando o objeto possuir transparência. A refração ocorre em objetos transparentes que possuam índice de refração diferente do ar, como, por exemplo, a água e o vidro. Porém o fenômeno que aqui nos interessa é a reflexão, que ocorre em objetos opacos e, em parte, em objetos translúcidos. Sendo assim, a cor que visualizamos em um objeto é o comprimento de onda que ele reflete, sendo os outros, absorvidos.

O olho humano percebe todas as cores a partir da composição de três cores principais: vermelho, azul e verde. A percepção da cor ocorre pela combinação da fonte de luz, do observador e da cor do objeto avaliado.

Tonalidade, luminosidade e saturação são três parâmetros necessários para caracterizar um objeto. O comprimento de onda predominante corresponde à tonalidade, enquanto a saturação depende da proporção que este comprimento de onda ocupa e a luminosidade se refere à intensidade da energia eletromagnética (Melchiades e Boschi, 1999).

A luz que é percebida pelo olho humano pode, para uma mesma cor, ser interpretada como diferente devido à incidência de fontes luminosas distintas, características fisiológicas de cada observador, efeitos de contraste que ocorrem quando uma cor é colocada ao lado de outra, mudança do ângulo de observação bem como ilusões causadas por mudanças do tamanho da superfície observada. No ser humano, a cor de um objeto é fruto de uma sensação e depende de aspectos fisiológicos e psicológicos. A cor do objeto entra pela retina e após uma densa gama de operações realizadas pelo corpo humano, o cérebro a interpreta e só então é possível dizer que aquele objeto possui uma dada coloração.

A cor é um dos padrões de qualidade exigidos de um produto pelo mercado consumidor. A qualidade estética de um produto lhe agrega valor, pois é uma das primeiras coisas que o consumidor observa quando conhece um novo objeto. Só depois deste primeiro contato é que os outros sentidos como tato, olfato e paladar poderão agir.

Construções em pedra quando expostas às intempéries estão sujeitas ao aparecimento de sujidade, modificando suas cores, o que é intensificado quando este ambiente é o das grandes cidades e zonas industriais, com contaminação atmosférica, poluentes e chuvas ácidas. Esta última ocorre em zonas urbanas, tendo como um de seus componentes a deposição de dióxido de enxofre (SO_2), que é proveniente da queima de combustíveis fósseis. Este é rapidamente oxidado (SO_3 , que causa amarelamento), e livre na atmosfera, reage com o vapor d'água gerando o ácido sulfúrico (H_2SO_4). Outros gases também podem depositar na superfície das rochas, como o NO_x . Na presença de umidade, o NO_x pode reagir com SO_2 e favorecer a sua oxidação. A presença de sais mantém a umidade dentro da rocha, favorecendo a absorção, oxidação e reação do SO_2 com a rocha (Lipfer, 1989 *apud* Grossi *et al.*, 1998). Outro problema causado pelo SO_2 é a sua deposição como partícula sólida, que gera o escurecimento da superfície, conhecido como *soiling*. O escurecimento também se deve à deposição de partículas de carbono, que são expelidas pelos escapamentos dos meios de transporte movidos a combustíveis fósseis. Em rochas, esta deposição é crítica devido à porosidade e rugosidade de sua superfície (Grossi *et al.*, 2007).

A alteração da cor em monumentos que estão expostos a intempéries também pode ocorrer devido ao crescimento de micro-organismos, excrementos de animais, fogueiras, aparecimento de eflorescências, dentre outros.

A manutenção da cor original durante processos de restauro é um problema, pois esta pode ser alterada devido à utilização de argamassas, consolidantes, hidrofugantes e biocidas. Quando há a necessidade da substituição de pedaços de rochas a homogeneidade cromática é um fator que deve ser devidamente considerado.

4.4.2. Método espectrofotométrico

Devido à subjetividade no momento de auferir a cor de um objeto, em 1905, Munsell classificou a cor em três parâmetros: tonalidade (cores: amarelo, azul, vermelho...), saturação (pureza: cores vivas, cores sujas) e luminosidade (clara, escura). Desta classificação foi criado o Sistema de Notação de Munsell, que é utilizado até hoje em classificação de solos, por exemplo.

No entanto, esse sistema, apesar de melhorar a classificação, não resolveu o problema. Ainda era necessário estabelecer uma linguagem precisa para comunicar os dados colorimétricos. Foram então desenvolvidos equipamentos que permitem transformar um aspecto qualitativo em quantitativo, ou seja, transformando a cor em números, facilitando comparações e definições.

Em 1931, o CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*) estabeleceu o diagrama cromático Xxy (Figura 29a) que era baseado na percepção de cores pelo olho humano (tristímuli – baseada no sistema RGB). Neste diagrama, os pontos plotados eram calculados matematicamente de acordo com a intensidade nos comprimentos de onda vermelho (x), verde (y) e azul (z). A tonalidade é representada pela linha mais externa do diagrama e a saturação aumenta do centro para as bordas da figura. No entanto este diagrama criava subjetividade quando alguns pontos eram plotados em áreas nas quais era difícil visualizar a diferença de cores, como, por exemplo, em alguns tons de verde.

Para solucionar este problema foi desenvolvido em 1976 pela CIE o sistema CIELab, sendo um dos métodos mais utilizados atualmente para quantificar numericamente a cor. Este sistema, que é formado por um espaço tridimensional, divide a luz em parâmetros colorimétricos: luminosidade, que é representada pela letra L^* e o valor 100 identifica o branco e 0 o preto, a^* representa as cores verde (valores negativos) e vermelho (valores positivos) e b^* representa azul (valores negativos) e amarelo (valores positivos) (Figura 29b), e C representa a saturação. O parâmetro h indica o ângulo da tonalidade métrica, que é semelhante ao da tonalidade cromática. O matiz é intensificado nos ângulos do sentido horário de um círculo cromático. É possível citar alguns ângulos como $0/360^\circ$ que identifica o magenta, 90° o amarelo, 180° o azul-verde e 270° o azul.

Figura 29a – Diagrama cromático (Fonte: <http://tecsoled.com>).

Figura 29b – Diagrama CIELab 1976 (Fonte: <http://sellerink.com.br/blog/tag/modelo-cielab/>).

No espaço CIELab, a distância entre quaisquer dois pontos de cor representa a variação de cor (E^*), sendo calculado a partir das variações dos seus componentes L^* , a^* , e b^* . O cálculo da variação colorimétrica foi originalmente concebido para pequenas diferenças: $E < 10$, (Franceschi *et al.*, 2006), sendo calculada pela Equação 8.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (8)$$

Onde:

L^* = variação na luminosidade;

a^* = variação entre as cores verde e vermelho;

b^* = variação entre as cores azul e amarelo.

Variações do parâmetro E maiores que 1 podem ser detectadas pelo olho humano (Tozzi, 1992 *apud* Melchiades e Boschi, 1999).

Alguns autores (Yocom e Kavecki, 1986 *apud* Grossi *et al.*, 1998) correlacionam a variação na luminosidade com a quantidade de partículas em suspensão na atmosfera e o tempo de exposição da rocha, como mostrado pela Equação 9.

$$Y = A + (tsp)^{1/2}tB \quad (9)$$

Onde:

Y = refletância (L_x) em um dado momento (%);

B = declive da curva (coeficiente de enegrecimento);

tsp = média da concentração total de partículas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$);

t = tempo de exposição;

A = refletância inicial (L_0).

Existem os colorímetros e os espectrofotômetros, que são dois equipamentos utilizados para mensurar a cor de objetos. No primeiro, a luz refletida é filtrada e as frações vermelho, verde e azul são separadas. No espectrofotômetro a luz refletida é subdividida em grande número de comprimentos de onda e todos esses dados são considerados e não somente das três cores utilizadas pelo colorímetro (Melchiades e Boschi, 1999).

O espectrofotômetro é um equipamento que mede a luz refletida (no comprimento de onda visível) por uma superfície em cada comprimento de onda e produz o espectro de

refletância independentemente da luz do ambiente no qual está sendo realizada a medida. Este equipamento ainda produz o gráfico de refletância espectral da cor (Del Lama, inédito).

No modo SCI (*Specular Component Included*), o espectrofotômetro realiza a medição sem armadilha de luz e inclui a refletância especular, ou seja, inclui a luz que reflete no mesmo ângulo da incidida, porém, em direção oposta. Este modo é ideal para pesquisas e desenvolvimento de cores. O SCE (*Specular Component Excluded*) utiliza a armadilha de luz para que a refletância especular não seja medida. Franceschi *et al.* (2006) concluíram que as medidas com componente especular excluído (SCE) parecem apresentar resultados mais apropriados para superfícies metálicas. O SCE é ideal para comparação em salas de inspeção ou em linhas de produção. A diferença entre o valor de cor SCE e SCI pode ser facilmente usada como um parâmetro para quantificar a opacidade dos revestimentos de brilho, o que é um fator relevante para a escolha de um tratamento esteticamente aceitável de proteção de monumentos de bronze em ambientes externos.

Quanto às fontes de luz, as opções mais comuns são: **D65**, que corresponde à luz do dia; **A**, que simula a luz incandescente e **F₂** a fluorescente.

O método espectrofotométrico determina a homogeneidade cromática de materiais heterogêneos como as rochas, podendo ser utilizado para acompanhar alterações na cor devido a processos de alteração física e/ou química (naturais ou acelerados), controlar a qualidade estética de rochas ornamentais e acompanhar a aplicação de produtos químicos como consolidantes, impermeabilizantes ou mesmo produtos para limpeza (Souza *et al.*, 2008).

Devido às pequenas dimensões e peso do aparelho, a espectrofotometria se torna uma técnica atraente para ser aplicada *in situ* no patrimônio cultural, como método não destrutivo de análise. Permite um exame amplo de um objeto para análise de seus dados estatísticos (Franceschi *et al.*, 2006).

A utilização em objetos metálicos tem sido pequena, no entanto o seu uso em peças de bronze com pátina vem aumentando (Franceschi *et al.*, 2006). Alguns autores têm realizado pesquisa em madeira (Gonzalez *et al.*, 2001; Atayde *et al.*, 2011).

Esta técnica também serve para determinar o grau de sujeira em edifícios e monumentos urbanos, que estão sempre expostos à poluição, como também para determinar a eficácia de técnicas de limpeza. Para isso, os parâmetros **L**, **a***, **b*** são medidos antes e depois do tratamento. Também é interessante comparar estes dados com a cor original da rocha (Fort *et al.*, 2000).

Quando o padrão observado é a cor, é necessário saber que mudanças de cor das rochas podem ser atribuídas ao grau de oxidação do cromóforo, que é o elemento responsável pela cor. Um dos cromóforos mais poderosos é o ferro (Fe). Quando o ferro é

oxidado produz cor vermelha-marrom na rocha, enquanto na sua redução produz cor azul-preta. Quando estas rochas são expostas à atmosfera, ocorrerão reações de oxidação que, geralmente, são mais resistentes ao intemperismo. O amarelamento pode ocorrer por diferentes processos como deposição ou oxidação de matéria orgânica ou mesmo Fe e sulfatação (Grossi *et al.*, 2007).

Grossi *et al.* (1998) mostram que a degradação rochosa depende da combinação de fatores ambientais e constituintes da rocha. As rochas carbonáticas, devido a sua constituição, reagem facilmente com a água e com o SO₂ da atmosfera.

4.4.3. Vantagens e Desvantagens

Este é um método que possui muitas vantagens e quase nenhuma desvantagem.

O equipamento possui custo médio de aquisição, é muito leve, fácil de utilizar em campo, não há necessidade de coleta de amostras para realização do teste; sendo totalmente não destrutivo. Não precisa da aplicação de nenhum produto para realizar o procedimento.

Quanto às desvantagens poderia ser citada a dificuldade em conseguir produzir na amostra de laboratório uma superfície idêntica à observada *in situ*, podendo observar diferenças na comparação dos resultados que são relativas a superfície e não exatamente a coloração da rocha.

4.4.4. Normas técnicas

Não foram encontradas normas técnicas para este método

4.4.5. Exemplos da aplicação do espectrofotômetro em patrimônio histórico

Boutin e Leroux (2000) objetivaram verificar o impacto dos poluentes atmosféricos em vários tipos de calcário e arenitos, tratados com repelentes de água. As amostras de 7 x

7 x 7 cm e 7 x 7 x 2 cm ficaram expostas às intempéries por 4 anos e foram coletadas de catedrais francesas após 10 anos de medições. A mudança de coloração e a perda de peso foram acompanhadas nesses 4 anos em rochas com e sem tratamento. Especialmente nos locais onde há poluição atmosférica, o escurecimento foi facilmente observado. Nos locais em que as amostras estavam expostas à chuva, houve perda de peso devido ao fenômeno de dissolução.

A eficácia de 5 produtos de tratamento foi testada em 1, 3, 5 e 10 anos. Foram comparados os dados de coloração, massa, rugosidade, dureza superficial, taxa de secagem, velocidade de absorção de microgotas e taxa de sulfatação. Observando apenas os resultados sobre a variação total da cor (E), nenhum dos produtos testados se mostrou melhor que outro. Na amostra que ficou exposta ao tempo, foi observado que a umidade influenciou fortemente na mudança da coloração.

O trabalho de Fort *et al.* (2000) foi realizado na fachada da Cathedral Nueva, em Valladolid (Espanha). Esta fachada, que é construída em calcário, estava em bom estado de preservação, porém apresentava alto grau de sujidade, intercalado com faixas claras lavadas pela chuva e partes com crosta negra. Foi utilizado o espaço CIELab para caracterizar a cor. Os valores encontrados antes e depois da limpeza estão descritos na Tabela 19. Os autores concluíram que o estudo comparativo entre os parâmetros cromáticos originais e após tratamento de limpeza é um método objetivo para a definição de boas condições de limpeza e pode ser utilizado como um critério para controle de qualidade. Eles ainda salientam que o aumento da cor amarela, devido à patina de envelhecimento natural da pedra, pode ser removida caso produtos químicos como ácidos sejam usados. Entretanto, estes produtos devem ser usados com cautela.

Feliu *et al.* (2005) trabalharam na fachada de um prédio histórico que hoje é sede da Disputación Provincial de Cádiz para determinar as camadas encontradas nas amostras, definir as várias intervenções sofridas ao longo do tempo e realizar um estudo sobre a cor das diferentes fachadas que o edifício teve, para escolher materiais e cores para a restauração. Para tal, utilizaram as técnicas de espectroscopia visível, espectroscopia de infravermelho transformado de Fourier (FTIR), microscopia eletrônica de varredura (SEM) e espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS).

Amostras cilíndricas de 3,5 cm de diâmetro foram coletadas. O sistema CIELab foi utilizado para definição da cor. Foram encontrados 5 períodos de reformas e a variação na coloração de vários elementos como a fachada do primeiro piso, a fachada do segundo piso, parapeitos e elementos decorativos foram identificados, conforme mostra a Figura 30.

Tabela 19 – Parâmetros cromáticos da rocha antes e depois da limpeza (adaptado de Fort *et al.*, 2000).

T (°C)	P (Bar)		L*	a*	b*
Antes da limpeza			32,5	1,5	5,3
30	60	Média	39,2	2,1	6,9
		Desvio padrão	3,4	0,7	1,6
Antes da limpeza			30,8	1,2	4,2
30	90	Média	41,6	3,5	9,5
		Desvio padrão	7,4	1,2	2,6
Antes da limpeza			31,0	1,3	4,0
30	120	Média	34,3	3,2	8,5
		Desvio padrão	6,8	1,0	3,2
Antes da limpeza			41,0	2,0	7,4
30	120	Média	45,8	2,9	10
		Desvio padrão	7,1	1,2	2,8
Antes da limpeza			37,8	2,3	7,2
90	90	Média	36,4	3,5	9,7
		Desvio padrão	7,2	1,1	2,9
Antes da limpeza			29,9	1,2	4,0
90	120	Média	51,7	2,3	8,8
		Desvio padrão	15,1	0,5	2,7
Antes da limpeza			33,1	0,8	3,5
90	60 ^a	Média	62,8	2,2	9,4
		Desvio padrão	16,2	2,2	9,4
Antes da limpeza			33,3	1,7	6,0
90	120 ^b	Média	57,5	2,4	11
		Desvio padrão	7,5	0,5	1,7

^a Hidrofluoreto de amônio, ^b Hidróxido de sódio.

Figura 30 – Coloração encontrada nas camadas a) 1778–1862, (b) 1862–1940, (c) 1940–1950, (d) 1950–1964, e (e) 1964–atual (Feliu *et al.*, 2005).

Franceschi *et al.* (2006) aplicaram a técnica de espectrofotometria em placas de bronze com pátina, expostas às intempéries, bem como seu comportamento e sua durabilidade. Foram analisadas amostras com e sem revestimento de pátina, avaliando a mudança de cor devido à aplicação de materiais de proteção e também devido ao intemperismo natural. Medidas foram realizadas na estátua de bronze do Monumento ai Mille, localizada em Gênova (Itália), em uma área marítima. Neste monumento, foram limpas algumas áreas para fim de comparação. Outras técnicas foram utilizadas para caracterizar as amostras e o monumento (difração de raios X, taxa de corrosão e espectroscopia de impedância eletroquímica).

Para a aquisição de dados colorimétricos, foram realizadas de quatro a nove medidas. Em cada ponto eram obtidas 3 leituras e o próprio aparelho, um Minolta CM 2600D, calculava a média. As configurações foram iluminante D65, observador a 10°, componente especular incluso (SCI) e excluído (SCE) e abertura de 8 mm. Os resultados encontrados no monumento mostram claramente que o processo de limpeza reduziu a diferença de cor entre as áreas selecionadas (Tabela 20). Nas placas, foi observada a tendência geral de aumento no valor de E devido à ação do intemperismo. Placas revestidas com cera apresentaram diminuição acentuada na luminosidade nos 3 primeiros meses. Nas placas revestidas com dupla camada de polímero e cera, a variação nas cores foi mais suave, mas a diminuição na luminosidade também foi observada.

Tabela 20 – Dados obtidos pelo modo SCE na estátua do Monumento ai Mille (modificado de Franceschi *et al.*, 2006).

Área	Zona	L*	a*	b*
I	Pátina original	46,2	-15	7,3
I	Limpa 1	44	-10	3,4
I	Limpa 2	43	-8,4	2,8
II	Pátina original	41	-0,9	2,9
II	Limpa	38	0,2	3,4
III	Pátina original	60	-7,4	9
III	Limpa 1	44	2	3,9
III	Limpa 2	39	-0,3	2,6
IV	Pátina original	36,3	2,4	5,4
V	Pátina original	41,3	-1,8	3,6
V	Limpa	38,9	-0,8	3,2
VI	Pátina original	39	-10,1	9,2
VI	Limpa	40,1	-4,8	8,0

Durán-Benito *et al.* (2007) estudaram a lagoa do palácio *Reales Alcazares*, localizado em Sevilha (Espanha). Neste local, durante escavações arqueológicas, foram encontradas camadas sobrepostas de elementos arquitetônicos. Vinte amostras de argamassa foram coletadas. A caracterização cromática foi realizada pelo sistema CIELab. Outras técnicas como difração de raios X, microfotografia, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por infravermelho também foram utilizadas. Com essas técnicas, todas as camadas e alterações decorativas ao longo do tempo puderam ser identificadas.

4.4.6. Metodologia utilizada

Foram realizadas 60 medidas em cada face do monumento devido ao seu tamanho. O valor foi estabelecido de acordo com a bibliografia consultada, que sugere que 14 medidas em uma área de 36 cm² são suficientes para que os dados sejam confiáveis (Prieto *et al.*, 2010) e de 25 a 30 medidas para ter um valor médio estável (Souza *et al.*, 2008).

Considerou-se para este trabalho que seria mais adequado realizar 15 medidas no lado esquerdo, 15 no lado direito e 30 no centro de cada face, totalizando 60 medidas. As medidas foram realizadas na parte rochosa do monumento, sendo escolhidas as partes mais limpas, excluindo as áreas com sujeira ou colonização biológica. Foram evitados também os enclaves de biotita. Os parâmetros escolhidos no espectrofotômetro Konica Minolta CM 2500d (Figura 31) foram iluminante D65 (utiliza a luz do dia para seus cálculos, incluindo o ultravioleta), componente especular incluso (SCI) e excluído (SCE), observador a um ângulo de 10° e a abertura de 8 mm. Em superfícies rugosas, como é o caso da rocha medida, a luz especular é muito fraca.

Para a análise dos dados foi utilizado o *software* On Color versão 5.4.5.1.

Figura 31 – Equipamento utilizado nos testes de espectrofotometria.

5. RESULTADOS

A amostra fresca utilizada nos testes é um bloco com dimensões aproximadas de 42 x 19 x 18 cm. Este bloco não possui faces exatamente paralelas, pois, devido ao seu tamanho houve grande dificuldade de encontrar algum local que possuísse maquinário apropriado para cortá-lo. Nas marmorarias, o maquinário existente é ideal para corte de chapas de espessura média de 2 cm.

5.1. Resultados ultrassom

Os dados foram analisados quanto ao seu valor e sua estabilidade em relação aos outros dados coletados.

Primeiro serão mostrados os valores individuais de cada teste, em diferentes modos de posicionamento dos transdutores para obtenção do valor da velocidade das ondas ultrassônicas em todas as faces do monumento. Após esta etapa, serão mostrados os dados unidos para uma compreensão global. Em anexo são encontradas tabelas com os valores individuais de cada um dos testes realizados.

A localização das faces no monumento pode ser visualizada na Figura 32.

Figura 32 – Localização das faces do monumento.

5.1.1. Face 1 – 54 kHz

A Figura 33 mostra a localização dos testes na Face 1.

Na Figura 34 é possível observar que os valores nos três locais de testes com método semidireto são bem próximos e 4 deles chegam a se sobrepor nos testes 10 e 16, mostrando que há grande homogeneidade entre os diferentes blocos ensaiados desta face. De forma geral os valores variam entre 4,09 e 5,40 km/s.

No método indireto horizontal (aumentando a distância), os resultados obtidos nos diferentes testes são bem distintos, variando entre 1,80 a 5,40 km/s (Figura 35). O bloco no qual foi realizado o teste 17 mostra os maiores valores, dentre os quais foi possível observar a atenuação da onda com o aumento da distância. No teste 10, os valores do ensaio se mostraram muito baixos, 1,86 a 2,29 km/s. O teste foi repetido (teste 24) e os valores se mantiveram, mostrando que há algo como uma descontinuidade, ou fratura no interior da rocha, que não se apresenta em sua superfície, o que resulta na diminuição da velocidade ultrassônica.

Bastante altos e irregulares, de 4,24 a 5,62 km/s, mostraram-se os valores do teste 17 do método indireto horizontal mantendo a distância (Figura 36). No entanto, os valores observados para os testes 16 e 24 mostraram-se bem homogêneos, apesar de mais baixos, variando entre 3,00 a 3,28 km/s no teste 16 e entre 1,81 a 2,05 km/s no teste 24.

Na Figura 37 é possível observar que há uma tendência à queda dos valores devido à atenuação da onda pelo aumento da distância, variando entre 2,14 a 5,00 km/s. Estes valores, em sua maioria, apresentam-se relativamente baixos. Os resultados dos testes 10 e 16, que foram realizados em blocos distintos (Figura 33) da mesma face, sobrepõem-se, mostrando a confiabilidade do teste, apesar de estarem baixos e possivelmente demonstrarem a presença de descontinuidades internas.

Utilizando o método indireto vertical mantendo a distância (Figura 38), no local do teste 17 os valores mostraram-se mais homogêneos do que os realizados no bloco do teste 16. No teste 17 os valores observados estão acima de 5 km/s, variando entre 5,00 e 5,49 km/s e no 16 variaram entre 3,83 e 4,93.

Figura 33 - Localização dos testes na Face 1.

Figura 34 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com uso de transdutores de 54 kHz na Face 1.

Figura 35 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, aumentando a distância, com uso de transdutores de 54 kHz, na Face 1.

Figura 36 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, mantendo a distância, na Face 1.

Figura 37 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, aumentando a distância, na Face 1.

Figura 38 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, mantendo a distância, na Face 1.

5.1.2. Face 2 – 54 kHz

Na Face 2 (Figura 39), de modo geral os resultados se mostraram bastante homogêneos, o que pode ser observado nos resultados plotados na Figura 40, que foram obtidos pelo método semidireto com transdutores de 54 kHz. O ensaio foi repetido posteriormente (teste 20) para verificar os dados obtidos e os resultados apresentados foram muito próximos do teste 18, mostrando que estes refletem a realidade do bloco. A velocidade variou de 4,22 a 4,72 km/s.

No método indireto horizontal, aumentando a distância (Figura 41), é possível observar a atenuação da onda, variando entre 2,15 a 4,37 km/s. Os valores, apesar de baixos, estão bem homogêneos. Os baixos valores podem indicar que há alguma descontinuidade interna no bloco.

A Figura 42 mostra que os resultados obtidos pelo método indireto horizontal (mantendo a distância) não foram muito regulares, variando entre 3,34 a 4,55 km/s, mas mostram-se dentro do intervalo de valores obtidos com os outros métodos.

A Figura 43 mostra que os resultados obtidos no teste 18 ficaram baixos, homogêneos e mantiveram a tendência geral de decrescimento dos valores, observada em outros testes, quando a distância entre os transdutores é aumentada, variando de 1,98 a 3,61 km/s.

No ensaio apresentado na Figura 44 houve uma tendência de aumento da velocidade, variando entre 3,32 a 4,83 km/s. Os valores mínimos estão dentro das velocidades encontradas nos outros métodos de teste neste mesmo local. O valor máximo ficou próximo dos valores obtidos pelo método semidireto.

Figura 39 - Localização dos testes na Face 2.

Figura 40 - Resultados obtidos pelo método semidireto na Face 2.

Figura 41 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, utilizando transdutores de 54 kHz, aumentando a distância, na Face 2.

Figura 42 - Resultados obtidos na Face 2 pelo método indireto horizontal, com transdutores de 54 kHz, mantendo a distância.

Figura 43 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, com transdutores de 54 kHz, aumentando a distância, na Face 2.

Figura 44 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, mantendo a distância, na Face 2.

5.1.3. Face 3 - 54 kHz

A Figura 45 mostra a localização dos ensaios na Face 3 do monumento e nas Figuras 46 a 50 são apresentados os resultados obtidos.

Os resultados do método semidireto (Figura 46) mostraram pouquíssima variação, de 4,91 a 5,11 km/s. Devido a este fato, foi realizado apenas 1 teste.

No método indireto horizontal aumentando a distância (Figura 47) houve grande dispersão dos dados, variando entre 1,76 a 3,92 km/s. Cada um dos testes apresentados foi obtido em um bloco distinto. O teste 12 foi eliminado, devido à inconstância dos dados. Apesar da grande dispersão dos dados, os testes 25 e 27, individualmente, apresentam pequena variação nos resultados. Os valores encontrados no teste 25 apresentam-se muito baixos, podendo sugerir que existem descontinuidades no interior do bloco ensaiado. Os valores encontrados no teste 14 apresentam acentuada diminuição de velocidade.

Na Figura 48 é possível observar que o teste 14 (4,09 a 4,35 km/s) é mais homogêneo que o teste 12 (1,27 a 2,21 km/s), que por sua vez, mostra valores bastante baixos, confirmando os valores encontrados no teste 25 da Figura 47.

A atenuação das ondas é facilmente observável (Figura 49) pela diminuição da velocidade com o aumento da distância entre os transdutores. Apesar dos valores dos testes serem visivelmente diferentes, variando entre 2,01 a 5,46 km/s, é observável entre os dados a mesma tendência à diminuição.

No método indireto vertical mantendo a distância (Figura 50), o teste 12 apresenta valores baixos e homogêneos (1,88 a 2,22 km/s), o teste 27 valores altos e homogêneos (4,95 a 5,62 km/s) e o teste 22 valores heterogêneos (3,41 a 5,49 km/s). De modo geral, poder-se-ia dizer que o bloco onde foram realizados os testes 12 e 25 encontra-se mais degradado, já que apresenta valores de velocidades menores.

Figura 45 - Localização dos testes na Face 3.

Figura 46 - Resultados obtidos pelo método semidireto na Face 3.

Figura 47 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, aumentando a distância, na Face 3.

Figura 48 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, mantendo a distância, na Face 3.

Figura 49 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, aumentando a distância, na Face 3.

Figura 50 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, mantendo a distância, na Face 3.

5.1.4. Bloco Cinza Mauá – Face 3 – 54 kHz

Os resultados do método semidireto no bloco de Granito Cinza Mauá, de modo geral, mostraram-se com boa regularidade e pouca variação entre os valores encontrados, variando de 4,52 a 5,23 km/s (Figura 51).

Os valores encontrados no método indireto vertical aumentando a distância (Figura 52) e indireto vertical mantendo a distância (Figura 53) variaram entre 2,35 a 3,40 km/s e 2,06 e 2,48 km/s, respectivamente. Estes testes pelo método indireto mostraram-se, como nos blocos de Granito Itaquera, mais baixos que os obtidos pelo método semidireto.

Figura 51 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com transdutores de 54 kHz, no bloco de Granito Cinza Mauá localizado na Face 3.

Figura 52 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (aumentando distância), com transdutores de 54 kHz, no bloco de granito Cinza Mauá localizado na Face 3.

Figura 53 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (mantendo distância), com transdutores de 54 kHz, no bloco de Granito Cinza Mauá localizado na Face 3.

5.1.5. Face 4 – 54 kHz

Na Face 4 (Figura 54), os resultados obtidos a partir de utilização dos transdutores de 54 kHz pelo método semidireto, estão com pouca variação (3,90 a 4,97 km/s) e bastante próximos, chegando, alguns deles a se sobrepor (Figura 55). Os valores encontrados estão dentro do esperado em um granito com a aparência encontrada no monumento estudado. O teste 28 substituiu o teste 15, pois este apresentou problemas.

Na Figura 56, o teste 23 apresenta tendência à atenuação do sinal com o aumento da distância medida, variando de 2,60 a 3,63 km/s. O teste 15 variou de 1,84 a 2,56 km/s. No entanto, os resultados 5 a 7 do teste 15 apresentam valores bastante similares aos do teste 23. Vale salientar que os dois testes foram realizados em blocos diferentes, como mostra a Figura 54.

No método indireto horizontal mantendo a distância (Figura 57), os testes 15 e 28 apresentam alguma similaridade e chegam a mostrar 2 valores praticamente iguais (próximo a 4 km/s). Os dois foram realizados no mesmo local, sendo o teste 28 o mais razoável. De maneira geral, os valores variaram entre 1,97 e 4,55 km/s.

O teste 15 (Figura 58) mostra acentuada diminuição da velocidade, porém esta estabiliza do ponto 5 para frente. Provavelmente do ponto 5 em diante há uma descontinuidade. O teste 11 exibe a atenuação da onda característica deste tipo de teste. Os valores desta Face variaram entre 2,02 e 5,46 km/s.

Os testes 11 e 15 (Figura 59) foram realizados em blocos diferentes da mesma Face. Isso mostra que o bloco no qual foi realizado o teste 15 está mais bem conservado, com velocidades variando de 3,79 a 4,82 km/s, do que o bloco relativo ao teste 11, que mostrou velocidade mais baixa, com média de 2,00 km/s.

Figura 54 - Localização dos testes na Face 4.

Figura 55 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com transdutores de 54 kHz, na Face 4.

Figura 56 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, aumentando a distância, com transdutores de 54 kHz, na Face 4.

Figura 57 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, mantendo a distância, com transdutores de 54 kHz, na Face 4.

Figura 58 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, aumentando a distância, com transdutores de 54 kHz, na Face 4.

Figura 59 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, mantendo a distância, com transdutores de 54 kHz, na Face 4.

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos mesmos locais dos mostrados acima, porém com a utilização de transdutores de 150 kHz.

5.1.6. Face 1 – 150 kHz

Os testes apresentados na Figura 60 referem-se a blocos diferentes da mesma Face. Com exceção ao primeiro valor do teste 16, os testes 10 e 16 são muito semelhantes e com pouca variação nos valores apresentados (média de 4,51 km/s). Os valores são altos, o que condiz com a aparência dos blocos ensaiados. O teste 17 apresentou valores iniciais que coincidem com os testes 10 e 16, porém à partir do quinto ponto de medida, os valores diminuiram muito e se mantiveram em torno de 2,70 km/s, o que pode ser atribuído a uma descontinuidade interna.

No método indireto horizontal aumentando a distância é possível observar a queda nos valores, como é característico deste método, variando de 2,37 a 4,35 km/s (Figura 61). Todos os testes apresentam valores muito semelhantes e, cada um deles foi realizado em um bloco distinto, como mostra a Figura 33.

Apesar da variação apresentada, de 2,38 a 4,47 km/s (Figura 62), no método indireto horizontal mantendo a distância, o valor médio (3,45 km/s) gira em torno dos resultados apresentados no teste 16, o qual mostrou variação mínima da velocidade ultrassônica.

No método indireto vertical aumentando a distância, todos os testes apresentaram valores bastante semelhantes entre si, variando de 2,22 a 3,33 km/s (Figura 63).

O método indireto vertical com a mesma distância apresentou relativa heterogeneidade dos valores observados, que variaram de 2,51 a 3,74 km/s (Figura 64).

Figura 60 - Resultados obtidos pelo método semidireto com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 1.

Figura 61 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, aumentando a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 1.

Figura 62 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, mantendo a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 1.

Figura 63 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, aumentando a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 1.

Figura 64 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, mantendo a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 1.

5.1.7. Face 2 – 150 kHz

No método semidireto, o teste 18 mostrou resultados muito irregulares, foi repetido e substituído pelo teste 20 (Figura 65), que apresentou valores bastante regulares (média de 4,40 km/s) e compatíveis com os encontrados utilizando o mesmo método com transdutores de 54 kHz (Figura 40).

No método indireto horizontal aumentando a distância (Figura 66), os valores obtidos com o teste 18 foram bastante homogêneos e compatíveis com os valores mais constantes encontrados na Figura 41, realizados com transdutores de 54 kHz. Houve pequena atenuação da onda, como já era esperado, devido ao aumento da distância entre os transdutores, variando de 2,35 a 2,91 km/s.

Os valores observados no teste 18 (Figura 67) com a utilização de transdutores de 150 kHz no método indireto horizontal (mantendo a distância) apresentam pouca variação (2,74 a 3,58 km/s), havendo uma pequena queda no valor da velocidade nos pontos 6, 7, 8 e 9.

Os valores apresentados na Figura 68 são um pouco mais baixos (1,91 a 2,52 km/s) do que os observados na Figura 43, que utiliza o mesmo método, no mesmo local, só que com transdutores de 54 kHz.

A Figura 69 exhibe os resultados encontrados na Face 2 do monumento por meio da utilização de transdutores de 150 kHz pelo método indireto vertical mantendo a distância. Quando comparamos com os valores obtidos pelo mesmo método e com transdutores de 54 kHz (Figura 44), o mesmo pico de velocidade é encontrado no ponto 6 mas com valor inferior. Os resultados variaram entre 2,19 a 3,18 km/s.

Figura 65 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 2.

Figura 66 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, aumentando a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 2.

Figura 67 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal, mantendo a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 2.

Figura 68 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, aumentando a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 2.

Figura 69 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical, mantendo a distância, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 2.

5.1.8. Face 3 – 150 kHz

Os valores de velocidade encontrados pelo método semidireto, nos dois blocos ensaiados (Testes 12 e 14) são relativamente homogêneos e próximos, variando de 3,43 a 4,59 km/s (Figura 70). O teste 12 mostra valores mais baixos, mostrando que este bloco pode possuir algumas descontinuidades internas.

Os valores encontrados com transdutor de 150 kHz pelo método indireto horizontal aumentando a distância (Figura 71) são mais homogêneos do que os observados com o de 54 kHz para o mesmo método, variando dentro de valores médios bastante similares (2,09 a 3,34 km/s).

Os resultados apresentados pelo método indireto horizontal, com a mesma distância e transdutores de 150 kHz (Figura 72) mostraram-se muito menos dispersos (2,21 a 3,61 km/s) que os valores encontrados pelo mesmo método com transdutores de 54 kHz (Figura 48).

Os testes 27 e 12 (Figura 73) apresentaram valores quase iguais (2,27 a 3,50 km/s). Estes, ainda são semelhantes ao teste 25 do mesmo método e transdutores de 54 kHz (Figura 49). Vale salientar que os testes 12 e 25 foram realizados no mesmo local (Figura 45).

Os resultados obtidos com uso de transdutores de 150 kHz pelo método indireto vertical mantendo a distância na Face 3 (Figura 74), apresentaram variação entre os valores de 1,81 a 4,20 km/s.

Figura 70 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Figura 71 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Figura 72 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (mantendo a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Figura 73 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (aumentando a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Figura 74 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (mantendo a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

5.1.9. Bloco de Cinza Mauá – Face 3 – 150 kHz

Os valores obtidos com transdutores de 150 kHz no método semidireto (Figura 75) mostram-se bem mais baixos (2,98 a 3,63 km/s) do que os obtidos com transdutores de 54 kHz (Figura 51), porém com menor variação.

Os valores aqui auferidos pelo método indireto vertical aumentando a distância (Figura 76) são bastante semelhantes aos observados no mesmo local, com os transdutores de 54 kHz, porém estão mais homogêneos (2,59 a 2,81 km/s). Aqui não é observada a atenuação da onda com o aumento da distância.

Figura 75 - Resultados obtidos no bloco de Granito Cinza Mauá presente na Face 3, pelo método semidireto, com uso dos transdutores de 150 kHz.

Figura 76 - Resultados obtidos no bloco de granito Cinza Mauá, presente na Face 3, pelo método indireto vertical (aumentando a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz.

5.1.10. Face 4 – 150 kHz

No método semidireto com transdutores de 150 kHz na Face 4 (Figura 77) os dados de cada teste, individualmente, mostram-se bastante homogêneos. O teste 29 mostrou valores mais baixos (2,75 a 3,42 km/s) do que os testes 28 e 30 (4,36 a 4,69 km/s e 4,35 a 5,08 km/s, respectivamente), que, por sua vez, mostraram-se bastante próximos dos valores obtidos com transdutores de 54 kHz.

O teste 23 realizado pelo método indireto horizontal aumentando a distância (Figura 78) apresenta acentuada queda na velocidade com o aumento da distância, variando de 2,31 a 4,41 km/s. Tal fato é atribuído à atenuação do sinal. O teste 11 mostra-se bastante estável, com velocidade média de 2,54 km/s.

O gráfico apresentado na Figura 79, que é referente aos valores encontrados pela utilização de transdutores de 150 kHz pelo método indireto horizontal com a mesma distância, mostra certa homogeneidade nos valores de velocidade de ondas ultrassônicas, apesar de alguns destes estarem fora da média (2,55 a 4,44 km/s). Tal fato pode ser atribuído a problemas na acoplagem dos transdutores devido à rugosidade da superfície ensaiada.

Na Figura 80, os resultados dos dois testes apresentam-se quase que em sobreposição (2,23 a 3,04 km/s). Estes, apesar de mais baixos que os observados no método semidireto, estão mais estáveis dos que os resultados encontrados com transdutores de 54 kHz (Figura 59). Vale salientar que os dois testes (11 e 23) foram realizados em blocos distintos da mesma face, como mostra a Figura 54.

Os valores encontrados pelo método indireto vertical com mesma distância (Figura 81) apresentam-se dispersos, variando de 1,78 a 3,14 km/s. No entanto, os testes individualmente apresentam pequena variação entre os dados coletados. Vale ressaltar que os três testes referem-se a blocos distintos da mesma face, como pode ser observado na Figura 54.

Figura 77 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

Figura 78 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

Figura 79 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (mantendo a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

Figura 80 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (aumentando a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

Figura 81 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (mantendo a distância), com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

5.1.11. Repetição de ensaios

Em alguns locais, os resultados observados estavam fora dos padrões médios, seja com números muito baixos ou com resultados muito diferentes. Estes testes foram repetidos e os resultados encontram-se nas Figuras 82 a 96.

Na Face 3, utilizando transdutores de 54 kHz com o método semidireto (Figura 82), os resultados apresentaram-se bastante homogêneos (teste 12), porém mais baixos do que os exibidos nas outras Faces. Foi decidido então repetir o ensaio e os resultados encontrados (teste 27) mostraram-se homogêneos, porém mais altos do que o teste anterior, sendo mais próximo do esperado. Portanto, os valores do teste 12 foram desconsiderados, por ter havido algum problema operacional no momento do ensaio.

O teste 10 (Figura 83) foi repetido devido aos valores apresentados estarem muito baixos. O teste 24 foi realizado no mesmo local do teste 10 e os valores foram praticamente os mesmos. Este fato leva a conclusão de que o bloco possui alguma descontinuidade interna, devido aos baixos valores encontrados.

Figura 82 - Resultados obtidos pelo método semidireto com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 3.

Figura 83 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando distância) com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 1.

O teste 10 mostrou valores bastante discordantes (Figura 84) e foi repetido. O teste 24 mostra os valores corretos e comprovando que houve algum problema operacional no momento do ensaio.

No teste 12 (Figura 85) o sinal foi perdido após 20 cm. Devido a este fato ter sido incomum no monumento, o teste foi realizado novamente. O teste 25 mostra os valores

corretos referentes a este bloco de rocha. Mais uma vez se acredita que a causa do problema foi operacional, como, por exemplo, insuficiência de gel acoplante no transdutor.

Figura 84 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando distância) com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 1.

Figura 85 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando distância) com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 3.

Os resultados obtidos no teste 12 (Figura 86), apesar de homogêneos, foram considerados baixos. O teste foi repetido (teste 25) e apresentou valores mais altos, porém mais dispersos. O teste 25 foi, portanto, eliminado.

O teste 12 ainda no método indireto, desta vez aumentando a distância (Figura 87), apresentou perda de sinal precocemente, devido a este fato, foi repetido. O teste 25 se mostrou bastante homogêneo e foi incluído nos dados da Face 3, enquanto o teste 12 foi desconsiderado.

Figura 86 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (mantendo a distância) com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 3.

Figura 87 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (aumentando distância) com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 3.

Mais uma vez o teste 12 mostrou-se problemático (Figura 88) devido aos baixos valores apresentados. O teste 25 foi realizado no mesmo local e apresentou valores homogêneos e mais altos. Portanto, o teste 12 foi eliminado e o 25 adicionado aos dados da Face 3.

O teste 12 foi realizado novamente, com o método indireto horizontal aumentando a distância. O teste 25 apresentou melhor desempenho (Figura 89) e substituiu o teste 12.

Figura 88 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (mantendo a distância) com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 3.

Figura 89 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando distância) com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Na Figura 90 é possível observar que o teste 12 apresentou irregularidades nos valores. Devido a este fato, ele foi realizado novamente. No entanto, o teste 26 apresentou valores muito baixos e foi desconsiderado.

O teste 26 que foi realizado no mesmo local do teste 12 com o método indireto horizontal aumentando a distância, perdeu o sinal precocemente (Figura 91) e foi, portanto, eliminado. É possível notar que os valores apresentados no teste 26 são mais baixos que os do teste 12.

Método indireto vertical - mesma distância

Figura 90 - Resultados obtidos pelo método indireto vertical (mesma distância) com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Método indireto horizontal - aumentando distância

Figura 91 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (aumentando distância) com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

O teste 26 buscou verificar os valores apresentados no teste 12 (Figura 92). No entanto o teste 26 apresentou valores mais baixos e foi eliminado.

A Figura 93 mostra que o teste 15 apresentou valores muito baixos, apesar de homogêneos. O teste foi repetido e, como o teste 28 apresentou valores mais altos e homogêneos, foi pressuposto que houve algum problema de acoplamento no teste 15, o qual foi eliminado.

Método indireto horizontal - mesma distância

Figura 92 - Resultados obtidos pelo método indireto horizontal (mantendo a distância) com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 3.

Método semidireto

Figura 93 - Resultados obtidos pelo método semidireto com uso dos transdutores de 54 kHz na Face 4.

O teste 23 do método semidireto na Face 4 apresentou valores muito variados e foi repetido. Ele foi substituído pelo teste 29, que apresentou valores bastante homogêneos (Figura 94).

Ainda na Face 4, o teste 13 apresentou valores bastante heterogêneos (Figura 95) e foi repetido. Em sua substituição foi colocado o teste 30, que apresentou valores mais altos e homogêneos.

Figura 94 - Resultados obtidos pelo método semidireto, com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

Figura 95 - Método semidireto utilizando transdutores de 150 kHz na Face 4.

Na Figura 96, é evidente a alta dispersão dos dados do teste 15. Ele foi realizado novamente e substituído pelo teste 28, que apresentou valores bastante homogêneos.

Figura 96 - Resultados obtidos pelo método semidireto com uso dos transdutores de 150 kHz na Face 4.

5.1.12. Granito Itaquera fresco

Na parte que se segue serão apresentados os resultados obtidos em ensaios com o Granito Itaquera fresco, utilizando transdutores de 54 kHz em laboratório.

O método direto mostrou valores altos, bastante homogêneos e regulares, havendo pouquíssima variação entre eles, com média de 4,42 km/s (Figura 97).

No método semidireto a distância entre os pontos foi calculada individualmente com utilização de paquímetro e trena, pois o bloco ensaiado possui medidas irregulares. Com exceção dos dois pontos iniciais, os valores permaneceram estáveis e não passaram de 5 km/s (Figura 98). Os valores aqui mostrados são, em geral, um pouco mais altos do que os mostrados no método direto. Tal fato é interpretado como sendo uma decorrência das faces do bloco ensaiado, que não são totalmente paralelas.

Nos testes com o método indireto, a distância variou de ponto a ponto devido à irregularidade do bloco utilizado, com valores de 4,34 a 5,29 km/s. Observa-se pequena variação entre este conjunto de dados e a tendência destes ficarem bastante próximos ao valor médio (Figura 99).

Comparando os resultados dos três métodos no bloco de granito fresco, nota-se que todos os valores ficaram acima de 4 km/s, não alcançaram os 5,5 km/s e houve pequena variação entre os valores obtidos com um mesmo método (Figura 100).

Figura 97 - Resultados obtidos pelo método direto no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 54 KHz.

Figura 98 - Resultados obtidos pelo método semidireto no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 54 KHz.

Figura 99 - Resultados obtidos pelo método indireto no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 54 kHz.

Figura 100 - Comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 54 kHz em laboratório.

As figuras que se seguem mostram os resultados obtidos em ensaios de laboratório com granito fresco, utilizando transdutores de 150 kHz.

Os resultados expostos na Figura 101 são bastante estáveis, altos, variando de 3,99 a 4,56 km/s e condizentes com os resultados obtidos no mesmo teste com transdutores de 54 kHz pelo método direto (Figura 97).

Os valores expostos na Figura 102, com o método semidireto, são um pouco mais baixos do que os auferidos com transdutores de 54 kHz (Figura 98), porém são mais estáveis (4,19 a 5,00 km/s).

O método indireto apresentou valores bastante irregulares (Figura 103), instáveis e mais baixos dos observados no mesmo método com transdutores de 54 kHz (Figura 99), variando de 3,49 a 4,32 km/s.

A homogeneidade dos dados obtidos nos métodos direto e semidireto é observável na Figura 104, bem como a falta de homogeneidade dos valores exibidos pelo método indireto. Os dados do método direto estão mais baixos que o método semidireto, tanto com transdutores de 54 kHz quanto com os de 150 kHz. Tal fato reforça a hipótese do problema da angulação entre as faces opostas da rocha ensaiada. Outra hipótese é a anisotropia que a rocha apresenta. Medidas paralelas ou perpendiculares à anisotropia podem alterar os valores das velocidades.

Figura 101 - Resultados obtidos pelo método direto no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 150 kHz.

Figura 102 - Resultados obtidos pelo método semidireto no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 150 kHz.

Figura 103 - Resultados obtidos pelo método indireto no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 150 kHz.

Figura 104 - Comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos no Granito Itaquera fresco, com uso dos transdutores de 150 kHz em laboratório.

Realizando um comparativo geral entre as quatro faces, incluindo os três métodos de obtenção de dados utilizados, é possível observar que o transdutor de 150 kHz apresenta menor variação do que o de 54 kHz (Figuras 105 e 106). No entanto, as médias do transdutor de 54 kHz são mais altas do que o de 150. De modo geral, pode-se dizer que em campo o transdutor de 54 kHz mostrou melhor comportamento. Tal fato é atribuído à menor frequência de onda emitida por este transdutor. No entanto, o transdutor de 150 kHz também mostrou bom comportamento.

Figura 105 - Comparação entre os resultados obtidos nas quatro faces do monumento com transdutores de 54 kHz.

Figura 106 - Comparação entre os resultados obtidos nas quatro faces do monumento com transdutores de 150 kHz.

Comparando os resultados obtidos em todas as faces do monumento com os da amostra fresca em laboratório (Figura 107) pelo método semidireto, pode-se observar que os transdutores de 54 kHz comportaram-se muito bem em campo e em laboratório. Pode-se ainda observar que os valores obtidos em campo são muito próximos aos de laboratório, mostrando que a rocha do monumento encontra-se em ótimas condições de conservação.

Quando se observa os dados da Figura 108, que são um comparativo entre os ensaios *in situ* em todas as faces do monumento e os de laboratório pelo método semidireto com transdutores de 150 kHz, nota-se que os resultados obtidos *in situ* são bem mais baixos do que os de laboratório. Mas a média apresenta valores próximos.

Figura 107 - Comparação entre os resultados obtidos nas quatro faces com transdutores de 54 kHz e a amostra fresca pelo método semidireto.

Figura 108 - Comparação entre os resultados obtidos nas quatro faces com transdutores de 150 kHz e a amostra fresca pelo método semidireto.

Todos os valores de velocidade obtidos encontram-se em anexo.

5.2. Resultados esclerômetro

Os valores auferidos encontram-se descritos na Tabela 21. Foi calculada a média e nenhum dos 10 valores coletados precisou ser eliminado, segundo as normas da ASTM D5873-00. Portanto a média e a média corrigida são as mesmas. Para a melhor compreensão dos dados durante sua discussão, os resultados foram separados em 1, 2, 3 e 4, pois referem-se aos respectivos testes compreendendo 10 impactos cada, sendo realizados dois testes na superfície vertical e dois na horizontal, totalizando quatro superfícies disponíveis para teste.

Tabela 21 - Índices esclerométricos (H_R) obtidos em granito fresco de acordo com a norma ASTM D5873-00.

Material	Índices esclerométricos	Média	Ângulo	Superfície
Granito fresco (1)	54, 51, 49, 52, 53, 53, 51, 49, 53, 53	51,8	Plano horizontal (+90°)	Sem polimento
Granito fresco (2)	48, 51, 47, 47, 49, 47, 50, 47, 50, 49	48,5	Plano horizontal (+90°)	Sem polimento
Granito fresco (3)	49, 47, 49, 50, 51, 49, 53, 50, 52, 49	49,9	Plano vertical (0°)	Sem polimento
Granito fresco (4)	46, 51, 52, 49, 50, 54, 49, 54, 53, 49	50,8	Plano vertical (0°)	Sem polimento

Na Figura 109 é mostrada de forma gráfica a variação dos resultados encontrados, bem como o valor médio. É possível observar que a variação entre os resultados encontrados nas diferentes posições é muito pequena.

Figura 109 - Gráfico com os valores máximo, médio e mínimo dos índices esclerométricos encontrados no bloco de Granito Itaquera fresco.

Relacionando os índices esclerométricos médios obtidos e os parâmetros esclerométricos fornecidos por Aydin e Basu (2005), conclui-se que a rocha testada possui alteração de grau II, o que corresponderia à descoloração leve a moderada, grãos com brilho vítreo a subvítreo e contornos de grãos intactos, o que não condiz com o observado e nem com os resultados obtidos com os métodos do tubo de *Karsten* e com a utilização de equipamento de ondas ultrassônicas e, principalmente, por ser uma rocha fresca.

Relacionando os dados obtidos com os resultados de outros monzogranitos ensaiados por Tugrul e Zarif (1999), os índices esclerométricos aqui encontrados mostram-se mais baixos.

Para correlacionar o número de rebote (H_R) com a força compressiva uniaxial foram utilizadas duas curvas desenvolvidas por Aydin e Basu (2005) e Katz *et al.* (2000), pois ambos trabalharam com granitos.

A curva desenvolvida por Aydin e Basu (2005) para fazer esta correlação para esclerômetro tipo L possui variância de $R^2 = 0,92$, e baseia-se na Equação 10.

$$y = 1,4459e^{0,0706x} \quad (10)$$

Onde:

x = número de rebote.

A Figura 110 mostra a correlação dos valores de ricochete do Granito Itaquera e a força compressiva uniaxial.

Figura 110 - Correlação entre os dados obtidos no ensaio esclerométrico e a Força Compressiva Uniaxial (UCS) (modificado de Aydin e Basu, 2005).

Utilizando a Equação 10, chega-se aos resultados mostrados na Tabela 22.

Tabela 22 - Força compressiva uniaxial utilizando a Equação 10.

Número do teste	UCS (MPa)
1	57,06
2	53,42
3	54,96
4	55,95
Média	55,35

A curva obtida por Katz *et al.* (2000) apresenta a Equação 11 e variância de $R^2 = 0,937$.

$$y = 2,208e^{0,067x} \quad (11)$$

onde:

x = número de ricochete.

A correlação entre a UCS, utilizando a curva proposta por Katz *et al.* (2000), e o número de ricochete dos quatro testes, resultou na Figura 111.

Figura 111 - Correlação entre a UCS e o número de ricochete obtido em rocha fresca (modificado de Katz *et al.*, 2000).

Utilizando a Equação 11, chega-se a resultados bastante próximos aos obtidos utilizando a Equação 10, porém um pouco mais altos (Tabela 23).

Tabela 23 - Força compressiva uniaxial utilizando a Equação 11.

Número do teste	UCS (MPa)
1	58,41
2	54,69
3	56,27
4	57,28
Média	56,66

Assim, os valores esclerométricos obtidos para o Granito Itaquera variam de 46 a 54, e correlacionando-os com a força compressiva uniaxial a partir de curvas experimentais, obteve-se valores de 54,96 a 57,06 MPa para a curva proposta por Aydin e Basu (2005) e de 54,69 a 58,41 MPa para a curva proposta por Katz *et al.* (2000).

5.3. Resultados tubo de Karsten

Comparando os resultados obtidos no monumento (Figura 112) e em laboratório (Figura 113), nota-se que a absorção foi maior no monumento, o que era esperado devido aos anos de exposição da rocha às intempéries e aos poluentes. No entanto esta diferença é muito pequena, mostrando que a rocha do monumento encontra-se em boas condições de conservação, sendo pouquíssimo permeável a água.

Figura 112 - Resultados obtidos *in situ* com uso do tubo de Karsten.

Figura 113 - Absorção observada em rocha fresca no laboratório.

Comparando todos os resultados obtidos na superfície vertical do monumento e em laboratório (Figura 114), é possível verificar que o monumento apresentou maior absorção máxima e média. Já na superfície horizontal (Figura 115) a absorção no monumento foi menor que a da superfície vertical, a média se manteve e a média na amostra fresca aumentou.

Figura 114 - Comparação entre a absorção (ml) registrada no monumento e no granito fresco, ambas em superfície vertical.

Figura 115 - Valores mínimo, médio e máximo (ml) encontrados na superfície vertical do monumento e em rocha fresca.

5.4. Resultados Espectrofotômetro

Nesta parte serão mostrados os resultados obtidos com a utilização do espectrofotômetro. Mais uma vez foi utilizada a divisão do monumento em Faces (Figura 32) para facilitar a compreensão dos dados e correlacioná-los com a incidência solar. A localização dos ensaios está apontada nas figuras encontradas no anexo.

Observando os valores máximo, mínimo e médio (Figura 116) encontrados para o parâmetro L, a Face 3 mostrou-se a mais clara e com maior valor médio e a Face 1 a mais escura, com a menor média. Os desvios padrão encontrados são: Face 1 = 3,94; Face 2 = 3,79; Face 3 = 3,45; Face 4 = 2,81, sendo, portanto a Face 4 a que possui menor variação desse parâmetro.

Analisando os valores máximo, mínimo e médio do parâmetro a^* (Figura 117), é possível verificar que as Faces 2 e 4 apresentaram valores médios e mínimos mais baixos. Os valores negativos encontrados mostram que há presença da coloração verde, mais proeminente nas Faces 2 e 4, enquanto os positivos referem-se à cor vermelha, que mostram-se mais elevados, principalmente na Face 1. Os desvios padrão encontrados são: Face 1 = 0,54; Face 2 = 0,34; Face 3 = 0,51; Face 4 = 0,28. Estes se apresentaram bastante próximos, porém a Face 1 apresentou maior variação de valores.

Em relação ao parâmetro b^* , a Face 3 mostrou o maior valor médio e os valores mais altos foram observados nas Faces 1 e 3 (Figura 118). Os valores mais baixos foram apresentados pelas Faces 1 e 2. Todos os valores encontrados são positivos, mostrando que há predominância da cor amarela em detrimento da cor azul. Os desvios padrão encontrados são: Face 1 = 2,70; Face 2 = 1,43; Face 3 = 1,58; Face 4 = 1,19, sendo a Face 1 a que apresentou maior amplitude de valores, seguida pelas Faces 3 e 2, respectivamente.

Na Figura 119, que mostra a variação total da cor (E), que indica a variação geral nos três parâmetros (L, a^* , b^*), pode-se observar que a Face 1, seguida pela Face 3, apresentou maior variação; e a Face 4 foi a que apresentou menor variação. Os desvios padrão encontrados são: Face 1 = 2,23; Face 2 = 2,31; Face 3 = 1,83; Face 4 = 1,31. A Face 2 apresentou a maior variação nos valores e a Face 4 apresentou menor média e valores mais homogêneos.

Comparando os valores médios do parâmetro E obtidos nesta pesquisa, na pesquisa de iniciação científica desenvolvida pela mesma autora e os valores obtidos por Del Lama (inédito), foi construída a Figura 120. É possível visualizar que o E diminuiu entre 15/05/2010 e 26/01/2011 e voltou a aumentar em 13/09/2012.

As Figuras 121 a 124 mostram a absorção no comprimento de onda do violeta (400 nm) e emissão no vermelho (700 nm) nas quatro faces do monumento.

Figura 116 – Valores máximo, mínimo e médio do parâmetro L nas quatro faces do monumento.

Figura 117 – Valores máximo, mínimo e médio do parâmetro a* nas quatro faces do monumento.

Figura 118 – Valores máximo, mínimo e médio do parâmetro b* nas quatro faces do monumento.

Figura 119 – Variação total da cor (E) média nas quatro faces do monumento.

Figura 120 – Variação total da cor (E)
média nas quatro faces do monumento.

Figura 121 – Espectro da Face 1.

Figura 122 – Espectro da Face 2.

Figura 123 – Espectro da Face 3.

Figura 124 – Espectro da Face 4.

Visualmente o monumento apresenta-se mais manchado do que nos testes desenvolvidos anteriormente, na pesquisa de iniciação científica. Foi difícil escolher locais mais limpos para realizar as medições. O monumento era constantemente limpo, porém esta prática não tem sido mais observada. A prefeitura não possui informações sobre a última data em que foi realizado este tipo de manutenção no monumento. Tal fato pode ter levado ao aumento do parâmetro E observado entre os anos de 2011 e 2012.

De maneira geral, as Faces 1 e 3 apresentam maior variação total da cor. Tal fato pode ser devido a estas faces possuírem escadas e serem acessadas por transeuntes. A Face 1 apresentou maior amplitude nos valores coletados e a Face 4 a menor amplitude. Poder-se-ia então dizer que quanto maior a incidência solar, maior a variação de coloração.

6. CONCLUSÕES

Na série de ensaios realizada no Monumento a Ramos de Azevedo, há variação nos resultados obtidos com equipamento de ultrassom observados em uma mesma Face, quando são ensaiados blocos diferentes. Esta observação é devido a características físicas do bloco, condições de extração e transporte, tendo em vista que este monumento foi transportado duas vezes após sua inauguração na Av. Tiradentes. Devido à movimentação dos blocos, a montagem original foi provavelmente perdida, inviabilizando a possibilidade de relacionar o estado de degradação das rochas, em relação à velocidade de ondas ultrassônicas, com a insolação que estes recebem.

A média da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas com transdutor de 54 kHz pelo método semidireto no monumento é de 4,62 km/s e com transdutor de 150 kHz é de 3,95 km/s.

Alguns resultados encontrados são muito baixos e não condizem com o estado de conservação da superfície ensaiada. Este fato foi atribuído à possível presença de descontinuidades internas.

Para a amostra fresca, a média dos valores obtidos com transdutor de 54 kHz pelo método semidireto é de 4,68 km/s e com transdutor de 150 kHz é de 4,40 km/s. Já pelo método direto, os valores são 4,29 km/s e 4,25 km/s, respectivamente. O menor valor encontrado no método direto é algo incomum e foi atribuído à angulação existente entre as faces, que não são exatamente paralelas.

Relacionando os dados obtidos com esclerômetro em amostra fresca no Granito Itaquera, com os resultados de outros monzogranitos ensaiados pelos autores Tugrul e Zarif (1999), os índices esclerométricos encontrados mostram-se mais baixos. Adicionalmente, relacionando os resultados obtidos com os propostos por Aydin e Basu (2005), os H_R obtidos caracterizariam uma rocha com grau de alteração II. No entanto, estes resultados não estão de acordo com os resultados obtidos com os outros métodos. Talvez tal fato seja devido à impossibilidade de fazer um corpo de prova como o proposto pelas normas e pelo mesmo não ter sido fixado a uma base pesada. Pode ser que mesmo com todos os cuidados tomado no momento dos testes, a rocha tenha se movimentado, mesmo que imperceptivelmente e o resultado auferido tenha sido menor. No entanto, os valores apresentaram variação muito pequena, o que desmerece esta hipótese. Tal fato pode ainda ser atribuído ao uso de equipamentos de fabricantes diferentes. A média dos valores de ricochete encontrados foi de 50,25.

As curvas dos dois autores que relacionam UCS e H_R mostram boa correlação entre si, mas não parecem representar a real força compressiva uniaxial.

Os resultados obtidos no ensaio com o tubo de *Karsten* mostram que a absorção de água foi um pouco maior no monumento. No entanto, a superfície do monumento é apicoada, deixando uma maior área de contato entre a água e a superfície da rocha. A baixa absorção era esperada já que é normal para um granito pouco alterado, como é o caso deste objeto de estudo.

No ensaio de espectrofotometria, o parâmetro E aumentou em relação aos valores coletados nas campanhas de 2010 e 2011. Uma das hipóteses para este fato é que não é mais feita a limpeza rotineira que era realizada no monumento. Os locais em que esta variação foi maior deram-se nas Faces 1 e 3, sendo a Face 1 com a maior dispersão de dados. Vale ressaltar que estas faces estão voltadas para sudeste e noroeste, respectivamente. Neste caso, poder-se-ia dizer que a maior incidência solar leva a maior variação dos parâmetros colorimétricos. A Face 4 apresentou dados mais homogêneos e menor variação em relação a média.

A maior absorção é observada na frequência de onda do violeta e a maior emissão é observada no comprimento de onda do vermelho.

As dificuldades encontradas foram relativas ao corte da amostra fresca, devido a suas dimensões e dureza. Outra barreira que foi transposta foi encontrar material adequado para acoplamento dos tubos de *Karsten*, pois os materiais utilizados na literatura consultada deixam resíduos, não sendo indicados. O material acoplante que mostrou o melhor desempenho foi a argilinha, que não deixa resíduos e possui grãos de mesmo tamanho. Nos testes de ultrassom foi testada a pasta de dentes como acoplante. Porém esta se mostrou mais difícil de ser retirada do que o gel para ultrassom utilizado em procedimentos em humanos.

Observando os resultados obtidos por meio dos métodos esclerométrico, ondas ultrassônicas, espectrofotométrico e do tubo de *Karsten* conclui-se que estes métodos não destrutivos são adequados para caracterizar rochas utilizadas no patrimônio cultural, evitando assim que sejam retiradas amostras para estudo, e permitindo a caracterização do material empregado nos monumentos sem danificá-los.

7. REFERÊNCIAS

- Alvarez A. R., Redondo F. M., Menéndez L. V. 2008. Consolidation of granite building Stones used in continental climates: San Juan de los Reyes Church in Toledo, Spain. *In: Proceedings of the International Symposium – Stone consolidation in cultural heritage: research and practice*, p. 213–222.
- Alves, A. 2009. Petrogênese de Plútons Graníticos do Leste Paulista: Geocronologia, Geoquímica Elemental e Isotópica. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 194p.
- Amaral P. M., Rosa L. G., Fernandes J. C. 1999. Determination of Schmidt rebound hardness consistency in granite. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **36**: 833–837.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), D 2845-00, 2000, Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, Estados Unidos.
- American Society for Testing and Materials (ASTM), D5873. 2000. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method, Philadelphia.
- Andreucci R. 2002. *Ensaio por ultra-som, aspectos básicos*. Associação brasileira de ensaios não destrutivos, 3 ed., 78 p.
- Apps C. A. C. P. 2011. Avaliação da variabilidade de técnica de ensaio do tubo de *Karsten* na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 156 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 7584. 1995. Concreto endurecido – Avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 8802. 1994. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica, Rio de Janeiro.

- Atayde C. M., Gonzalez J. C., Camargos J. A. 2011. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de muirapiranga (*Brosimum sp.*). *Cerne*, **17(2)**: 231-235.
- Augusto W.C.B. 2009. Caracterização geológica dos monumentos da cidade de São Paulo. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 41 p.
- Aydin A. 2008. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **46(3)**: 627-634.
- Aydin A., Basu A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, **81**: 1-14.
- Ballesteros E. M., García Talegón J., Iñigo A. C., González Sánchez M., Herrero Fernández H. 2011. Importance of porosity and transfer of matter in the rock weathering processes: two examples in central Spain. *Environment Earth Sciences*, **64(7)**: 1741-1754.
- Basu A., Aydin A. 2004. A method for normalization of Schmidt hammer rebound values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **41**: 1211-1214.
- Basu A., Celestino T. B., Bortolucci A. A. 2009. Evaluation of rock mechanical behaviors under uniaxial compression with reference to assessed weathering grades. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **42**: 73-93.
- Brady N. C. 1989. *Natureza e propriedade dos solos*. Freitas Bastos, Rio de Janeiro, 878 pp.
- Boutin F., Leroux L. 2000. Color and weight evolution of limestones protected by water repellents after a three-year ageing period in urban conditions. In: 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 2, p. 197–205.
- Buyuksagis I. S., Goktan R. M. 2006. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **44**: 299-307.
- Cargill J. S., Shakoor A. 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **27**: 495–503.

- Carta de Veneza. 1964. Carta Internacional sobre a Conservação e o Restauro de Monumentos e Sítios. ICOMOS. Disponível em: http://www.icomos.org.br/cartas/Carta_de_Veneza_1964.pdf. Acessado em 22 de fevereiro de 2011.
- Chung H. W., Law K. S. 1983 Diagnosing in situ concrete by ultrasonic pulse technique. *Concrete International*, Outubro, 42–49.
- Comissão de Patrimônio Cultural. 1997. *Obras Escultóricas em Espaços Externos da USP*. Edusp, São Paulo, 159 pp.
- Day M. J., Goudie A. S. 1977. Field assessment of rock hardness using the Schmidt test hammer. *British Geomorphological Research Group Technical, Bulletin* **18**: 19-29.
- Dearman W. R., Irfan T. Y. 1978. Classification and index properties of weathered coarse-grained granites from south-west England. *In: Proceedings of 3rd International Congress. IAEG*, Madrid, 2, p. 119–130.
- Del Lama E. A. Inédito. A mineralogia aplicada ao estudo da herança cultural. Relatório Parcial n. 1, Projeto FAPESP (proc. nº 2009/02519-8). 32 p.
- Del Lama E. A., Szabó G. A. J., Dehira L. K., Kihara Y. 2008. Impacto do Intemperismo no Arenito de Revestimento do Teatro Municipal de São Paulo. *Geologia USP, Série Científica*, **8**:75-86. Disponível em <http://geologiausp.igc.usp.br/geologiausp/sc1/art.php?artigo=703>. Acessado em 18 de outubro de 2011.
- Del Lama E. A., Dehira L. K., Reys A.C. 2009. Visão Geológica dos Monumentos da Cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, **39(3)**: 409-419. Disponível em http://www.sbgeo.org.br/pub_sbg/rbg/vol39_down/3903/11163.pdf. Acessado em 03 de janeiro de 2013.
- Delgado Rodrigues J., Costa D. 1996. Assessment of the harmfulness of consolidants in granites. *In: Conservation of granitic rocks*, LNEC, p. 71-78.
- Delgado Rodrigues J., Costa D. 2008. The conservation of granite in Évora Cathedral. From laboratory to practice *In: Proceedings of the International Symposium, Stone consolidation in cultural heritage: research and practice*, p. 101–110.

Delgado Rodrigues J., Costa D., Ferreira Pinto A. P. 1994. Use of water absorption characteristics for the study of stone treatments. *In: Workshop on Degradation and Conservation of Granitic Rocks in Monuments*, Santiago de Compostela, Spain, p. 21-28.

Diário Popular de 17 de dezembro de 1975. Monumento à Ramos de Azevedo retorna à USP.

Diário Popular de 18 de maio de 1997. Ramos de Azevedo.

Dionísio A. 2005. Stone decay induced by fire on historic buildings: the case of the cloister of Lisbon Cathedral (Portugal). *In: Building stone decay: from diagnosis to conservation*, Geological Society of London, p. 87-98.

Durán-Benito A., Herrera-Quintero L. K., Robador-González M. D., Pérez-Rodríguez J. L. 2007. Color study of Mudejar Paintings of the poud found in the palace of “Reales Alcazares” in Seville. *Color Research and Application*, **32 (6)**: 489–495.

Emendabili, G. 1929. “*Maquette*” do Monumento a Ramos de Azevedo. 29 pp.

Evangelista A. C. J. 2002. Avaliação da Resistência do Concreto Usando Diferentes Ensaio Não Destrutivos. Tese de Doutorado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 239 p.

Fabris, A. 1997. *Monumento a Ramos de Azevedo: do concurso ao exílio*. Mercado de Letras, Campinas, 144 pp.

Feliu M. J., Edreira M. C., Martín J., Calleja S., Ortega P. 2005. Study of various interventions in the façades of a historical building – Methodology proposal, chromatic and material analysis. *Color Research and Application*, **30 (5)**: 382–390.

Flores-Colen I. dos S., Brito J. de, Freitas V. P. de. 2009. Ensaio in-situ e em laboratório para caracterização do desempenho em serviço de rebocos pré-doseados aplicados em fachadas de edifícios correntes. *In: 3º Congresso Português de argamassas de construção*, 11 p.

Folha de São Paulo de 10 de outubro de 1972. Monumento a Ramos de Azevedo.

Folha de São Paulo de 12 de agosto de 1972. Monumento será restaurado até abril do próximo ano.

Fort R., Mingarro F., López de Azcona M. C., Rodriguez Blanco J. 2000. Chromatic parameters as indicators for stone cleaning techniques. *Color Research and Application*, **25 (6)**: 442–446.

Franceschi E., Letardi P., Luciano G. 2006. Color measurements on patinas and coating system for outdoor bronze monuments. *Journal of Cultural Heritage*, **7**: 166–170.

Frascá M. H. B. O. 2003. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 264 p.

Galvão J. 2009. Técnicas de ensaio *in-situ* para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas: esclerómetro e ultra-sons. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 125 p.

Gimenez A. M. S. 2012. Avaliação do comportamento de ondas ultrassônicas no Monumento às Bandeiras. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 73 p.

Goktan R. M., Ayday C. 1993. A suggested improvement the Schmidt rebound hardness ISRM suggested method with particular reference to rock machineability. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **30(3)**: 321–322.

González J. C., Janin G., Santoro A. C. S., Costa A. F. da, Valle A. T. do. 2001. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. *Brasil Florestal*, **72**: 47–58.

Gonçalves A. E. N. 2010. Estudo da influência nos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio *in-situ*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 197 p.

Gordinho, M. C. 2000. *O Liceu de artes e ofícios de São Paulo*. São Paulo: Marca D'água, 118 pp.

Grossi C. M., Esbert R. M., Suárez Del Río L. M., Montoto M., Laurenzi-Tabasso M. 1996. Acoustic emission monitoring to study sodium sulphate crystallization in monumental porous carbonate stones. *Studies in Conservation*, **42**:115-125

- Grossi C. M., Esbert R. M., Díaz-Pache F. 1998. Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos. *Materiales de Construcción*, **252 (48)**: 5–25.
- 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.
- Grossi D. Inédito. Estudo do Estado de Conservação do Monumento a Ramos de Azevedo. Relatório FAPESP (proc. nº 2011/03728-0) de Iniciação Científica. XX p.
- Grossi D., Del Lama E. A. 2012. Mapeamento das formas de intemperismo do Monumento a Ramos de Azevedo. *Revista CPC*, **14**:169-187.
- Hobsbawn, E. 1984. *A invenção das tradições*. Rio de Janeiro, Paz e terra, 316 pp.
- Hucka V. A. 1965. A rapid method for determining the strength of rocks in situ. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Abstract. **2**: 127–134.
- Hudson J. A., Harrison J. P. 1997. *Engineering rock mechanics: an introduction to the principles*. Elsevier Science, Londres, 444 pp.
- ISRM – International Society for Rock Mechanics. 1978. Suggested methods for determining hardness and abrasiveness of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Abstract, **15**:89–98.
- Jornal da Tarde de 14 de abril de 1997. História de um monumento: exposição recupera a trajetória da estátua em homenagem a Ramos de Azevedo.
- Kahraman S. 2002. The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Engineering Geology*, **63**: 347–350.
- 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.
- King M. S. 1983. Static and dynamic elastic proprieties of rocks from the Canadian shield. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **20 (5)**: 237–241.

- Köhler W. 1988. Preservation Problems of Carrara-Marble Sculptures in Potsdam-Sanssouci. Proceedings. *In*: VIth Intern. Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torún, **12**: 653–662.
- Köhler W., Rohatsch A., Weber J. 1996. The stone material of the westportal of St. Stephen's Cathedral in Viena: petrological and ultrasonic investigations. *In*: 8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 2, p. 759-767.
- Kolaiti E., Papadopoulos Z. 1993. Evaluation of Schmidt rebound hammer testing: a critical approach. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, **48**: 69–76.
- Künzel H. M., Künzel H., Holm A. 2004. Rain protection of stucco façades. *In*: IX International Conference, Clearwater, Flórida, Estados Unidos, p. 1-7. Disponível em: www.ibp.fraunhofer.de/Images/KB_eng_6_tcm45-30972.pdf. Acessado em 04 de setembro de 2012.
- LNEC - *Laboratório Nacional de Engenharia Civil*. 2002. Revestimento de paredes. Ensaio de absorção de água sob baixa pressão. LNEC, Lisboa.
- Machado. M. D. 2005. Curvas de Correlação para caracterizar concretos usados no Rio de Janeiro por meio de ensaios não destrutivos. Dissertação de Mestrado, Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 294 p.
- Magalhães A. C., Costa D., Veiga, M. R. 2003. Diagnóstico de anomalias de revestimentos de paredes com técnicas de ensaio in situ. Avaliação da resistência mecânica. *In*: 3º ENCORE - Encontro sobre conservação e reabilitação de edifícios, Lisboa: LNEC, 11 p.
- Marques E. A. G., Barroso E. V., Menezes Filho A. P., Vargas Jr. E. do A. 2010. Weathering zones on metamorphic rocks from Rio de Janeiro – Physical, mineralogical and geomechanical characterization. *Engineering Geology*, **111**: 1–18.
- Martins A. M. M. 2008. Estudo da influência da dosagem de cimento no desempenho da argamassa de reboco. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 165 p.
- Martins J. de S. 2006 A negritude póstuma de Ramos de Azevedo. O ESTADO DE S. PAULO [Caderno "Metrópole"], sábado, 16 de dezembro de 2006, São Paulo, SP, C8 - C8 p.

- Melchiades F. G., Boschi A. O. 1999. Cores e tonalidades em revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, **4(1-6)**: 11–18.
- Myrin M., Malaga K. 2008. Evaluation of consolidation treatment of sandstone by use of ultrasound pulse velocity. *In: 11th Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, **1**: 441-448.
- Naik T. R., Malhotra V. M. 1991. The Ultrasonic Pulse Velocity Method. *In: Malhotra V. M., Carino N. J. (eds), CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, Boston, USA, CRC Pres, 72 p.
- Papida S., Murphy W., May E. 2000. The use of sound velocity determination for the non-destructive estimation of physical and microbial weathering of limestones and dolomites. *In: 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Veneza, p. 609-617.
- Pelizan T. R. 2004. Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto citrodora utilizando a técnica de ultra- som. Dissertação de Mestrado, Institutos de Engenharia, Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 71 p.
- Philipp R. P., Di Benedetti V. 2007. Análise e avaliação da deterioração do revestimento de mármore da cúpula da catedral Metropolitana de Porto Alegre. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**: 650-659.
- Poole R. W., Farmer I. W. 1980. Consistency and repeatability of Schmidt hammer rebound data during field testing. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **17**: 167–171.
- 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.
- Rèunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (RILEM) NDT 1, 1972, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Paris.
- Rèunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (RILEM), II.4. 1980. Water Absorption tube test, Paris.
- Rèunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux (RILEM), NDT 3. 1984. Recommendations for testing concrete by hardness methods, Paris.

- Reys A. C., Del Lama E. A., Dehira L. K. 2007. Monumentos da cidade de São Paulo: formas de alteração e conservação. *Revista CPC (Centro de Preservação Cultural da USP)*, **5**: 93-122. Disponível em: http://www.usp.br/cpc/v1/php/wf07_revista_interna.php?id_revista=9&id_conteudo=22&tipo=7. Acessado em 01 de julho de 2010.
- Ribeiro R. C. C., Correia J., César G., Caranassios A., Moraes J. M. 2007. Caracterização tecnológica e alterabilidade de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo. *In*: III Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais, Anais, VI Simpósio e Rochas Ornamentais do Nordeste. p. 77–87.
- Rodrigues N. M. 2012. Ensaio não destrutivo em monumentos pétreos paulistanos. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 47 p.
- Rossi-Manaresi R., Tucci A. 1983. Ultrasonic test for the evaluation of the effectiveness of sandstone consolidation. *In*: 1ª Conferenza Internazionale, Le Prove Non Distruttive Nella Conservazione Delle Opere D'arte, p. 11.1-11.17.
- Sánchez J. S., Alves C. A. S., Romaní J. R. V., Mosquera D. F. 2008. A porosity study of granite ashlar to apply consolidation treatments in an historic building in the city of A Coruña (NW Spain). *In*: Proceedings of the International Symposium, Stone consolidation in cultural heritage: research and practice, p. 329-337.
- Scartezini L. M. B., Juca T. R., Teixeira F., Antonelli G., Cascudo O., Carshek H. 2002. Influência do preparo da base na aderência e na permeabilidade à água dos revestimentos de argamassa. *Revista Ambiente Construído*, **2**: 85-92.
- Sheremeti- Kabashi F., Snethlage R. 2000. Determination of structural anisotropy of carrara marble with ultrasonic measurements. *In*: 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Istituto Veneto per i Beni Culturali, p. 247-253.
- Silva L. C. T. 2005. Avaliação da degradação de rochas em fachadas de prédios históricos: os exemplos do teatro municipal e do paço imperial, cidade do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 109 p.
- Silva M. E. da, Roesser H. M. P. 2003. Mapeamento de deteriorações em monumentos históricos de pedra-sabão em Ouro Preto. *Revista Brasileira de Geociências*, **33(4)**: 331-338.

- Silva V. S. 2007. Alteração de Rochas e a Conservação do Patrimônio Arquitetônico: Estudo de caso do Pórtico da Igreja do Outeiro da Glória- RJ. Tese de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 184 p.
- Soares A. de A. 2010. Formas de alteração e avaliação da degradação dos granitos da cantaria de Igreja de Santa Rita, Paraty-RJ. Trabalho de conclusão de curso, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 64 p.
- Souza J. C., Rolim Filho J. L., Barros M. L. S. C., Lira B. B., Silva S. A., Rieck F. E. 2008. Análise colorimétrica de rochas ornamentais. *Estudos Geológicos*, **18(1)**: 55-64.
- Souza R. D. B. de 2008. Previsão da vida útil dos revestimentos cerâmicos aderentes em fachada. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 155 p.
- Sumner P., Nel W. 2002. The effect of rock moisture on Schmidt hammer rebound: tests on rock samples from Marion Island and South Africa. *Earth Surface Processes Landforms*. **27**: 1137–1142.
- Svahn H. 2006. *Non-destructive field tests in stone conservation*. Final Report for the research and development project. Riksantikvarieämbetet, Suíça, 63 pp.
- Tavares M. L., Veiga R. 2007. A conservação de rebocos antigos - restituir a coesão perdida através da consolidação com materiais tradicionais e sustentáveis. *In: VII Seminário brasileiro de tecnologia das argamassas*, Recife, Rio de Janeiro, p. 1–11.
- Topal T., Doyuran V. 1995. Ultrasonic test of artificially weathered Cappadocian tuff. *In: Preservation and restoration of cultural heritage*, École Polytechnique, p. 205-211.
- Tugrul A., Zarif I. H. 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **51**: 303–317.
- Valdeón L., King M. S., Freitas M. H. 1992. Ultrasonic methods for quantifying the degradation of building stones. *In: 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 2, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, p. 697-704.

- Vellone A. D., Merguerian C. 2007. Measuring engineering properties of NYC rocks using a Schmidt Rebound Hammer – Preliminary Results. *In.*: Program for the Fourteenth Conference on Geology of Long Island and Metropolitan New York. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1951/48048>>. Acessado em 01 de agosto de 2012.
- Yagiz, S. 2009. Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **68**: 55-63.
- Yaman I. O., Gokhan I., Yesiller N., Aktan H. N. 2001. Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission. *ACI Materials Journal*, **98(6)**: 450-457.
- Zimmermann, S. B. 2000. A obra Escultórica de Galileo Emendabili: uma contribuição para o meio artístico paulistano. Dissertação de Mestrado, Departamento de Artes Plásticas da Escola de Comunicação e Artes da Universidade de São Paulo, 216 p.

A N E X O

Tabela A.1 – Valores encontrados em bloco de rocha fresca em laboratório

Método	Direto	Semidireto	Indireto
--------	--------	------------	----------

Testes *in situ*

Tabela A.4 - Valores individuais encontrados na Face 2 com transdutores de 54 kHz.

Método	Semidireto		Indireto horizontal – aumenta distância	Indireto horizontal – mesma distância	Indireto vertical – aumenta distância	Indireto vertical – mesma distância
Teste n°	18	20	18	18	18	18
Velocidade (km/s)	4,33	4,45	4,37	4,55	3,61	3,44
	4,44	4,55	3,31	3,34	2,97	3,77
	4,47	4,29	2,75	3,55	2,21	3,66
	4,42	4,41	2,66	3,89	1,98	3,32
	4,42	4,55	2,63	4,33	2,06	3,68
	4,44	4,27	2,55	3,48	2,14	4,48
	4,60	4,22	2,58	4,25	2,20	3,70
	4,67	4,34	2,15	4,10	2,18	4,03
	4,43	4,42	2,48	3,64	2,23	4,83
	4,72	4,48	-	-	-	-

Tabela A.5 - Valores individuais encontrados na Face 2 com transdutores de 150 kHz.

Método		Indireto horizontal – aumenta distância	Indireto horizontal – mesma distância	Indireto vertical – aumenta distância	Indireto vertical – mesma distância
Teste n°	20	18	18	18	18
Velocidade (km/s)	4,45	2,90	3,58	2,61	2,73
	4,55	2,77	3,47	2,32	2,25
	4,29	2,72	3,53	2,22	2,25
	4,41	2,66	3,36	1,91	2,52
	4,55	2,64	3,39	-	2,77
	4,27	2,35	2,84	-	3,18
	4,22	-	2,74	-	2,34
	4,34	-	2,79	-	2,19
	4,42	-	2,99	-	-
	4,48	-	2,74	-	-

Tabela A.8 - Valores individuais encontrados no bloco de granito Cinza Mauá, na Face 3.

Frequência	150 kHz		54 kHz		
Método	Semidireto	Indireto vertical – aumenta distância	Semidireto	Indireto vertical – aumenta distância	Indireto vertical – mesma distância
Teste n°	21	12	19	19	19
Velocidade (km/s)	2,98	2,65	4,66	2,35	2,33
	3,01	2,77	4,70	3,39	2,23
	3,63	2,69	4,52	3,21	2,06
	2,96	2,66	4,55	2,74	2,25
	3,02	2,59	5,18	2,78	2,20
	3,04	2,76	4,68	2,89	2,48
	2,88	2,68	4,75	2,86	2,25
	2,96	2,81	5,23	2,88	2,19
	-	2,80	5,16	2,89	2,14
	-	-	5,02	-	-

Tabela A.9 - Valores individuais encontrados na Face 4 com transdutores de 54 kHz.

Método	Semidireto			Indireto horizontal – aumenta distância		Indireto horizontal – mesma distância		Indireto vertical – aumenta distância		Indireto vertical – mesma distância	
Teste n°	13	23	28	15	23	15	28	11	15	11	15
Velocidade (km/s)	4,05	4,62	4,04	1,84	5,05	1,97	4,04	3,22	5,46	2,02	4,00
	4,50	4,63	4,14	2,09	3,31	3,98	4,14	2,79	4,61	1,94	4,45
	4,75	4,63	4,23	2,56	3,63	4,44	4,23	2,31	4,41	2,05	4,59
	4,61	4,71	4,09	2,14	3,24	2,91	4,09	2,43	3,66	2,17	4,82
	4,14	4,87	4,12	2,22	3,09	3,30	4,12	2,02	2,70	1,79	4,67
	4,25	4,76	4,40	2,21	2,60	3,62	4,40	-	2,65	1,98	4,21
	4,01	4,89	4,55	2,13	2,61	3,25	4,55	-	2,28	2,07	4,10
	4,06	4,82	4,26	-	2,61	2,92	4,26	-	2,28	-	3,79
	3,90	4,97	4,25	-	-	3,31	4,25	-	2,33	-	4,32
	-	-	3,94	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela A.10 - Valores individuais encontrados na Face 4 com transdutores de 150 kHz.

[illegible]

Fotos da localização dos testes de ultrassom

Figura A.1 – Localização do teste 10 (Face 1).

Figura A. 2 – Teste 10 em detalhe.

Figura A. 3 – Teste 18 em detalhe (Face 2).

Figura A. 4 – Localização do teste 16 (Face 3).

Figura A. 5 – Teste 16 em detalhe.

Figura A. 6 – Localização do teste 13 (Face 4).

Figura A. 7 – Teste 13 em detalhe.

Figura A. 8 - Localização do teste 21 (Face 3) – Granito Cinza Mauá.

Figura A. 9 – Teste 21 em detalhe.

Fotos da localização dos testes de espectrofotometria

Figura A. 10 – Localização dos testes de cor nas Faces 1 e 3.

Figura A. 11 – Localização dos testes de cor nas Faces 2 e 4.