UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Suscetibilidade experimental de rochas do patrimônio
histórico aos agentes do intemperismo**

ALEXANDER MARTIN SILVEIRA GIMENEZ

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

Coorientador: Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso

Tese de Doutorado

Nº 580

COMISSÃO JULGADORA

Dr^a. Eliane Aparecida Del Lama

Dr^a. Maria Heloisa Barros de Oliveira Frascá

Dr. Antônio Gilberto Costa

Dr. Eleno de Paula Rodrigues

Dr. Fábio Ramos Dias de Andrade

SÃO PAULO
2018

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.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP. Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Gimenez, Alexander Martin Silveira

Suscetibilidade experimental de rochas do patrimônio histórico aos agentes do intemperismo / Alexander Martin Silveira Gimenez; orientadora Eliane Aparecida Del Lama; coorientador Emílio Velloso Barroso. -- São Paulo, 2018.

295 p.: il.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2018.

1. Intemperismo Artificial. 2. Métodos não destrutivos. 3. Patrimônio Histórico 4. Alteração Cromática. 5. Choque térmico. I. Del Lama, Eliane Aparecida, orient. II. Barroso, Emílio Velloso, coorient. III. Título.

*À minha esposa Vanessa, e à pequena
Anandi que logo alegrará nossas vidas
com sua luz.*

Agradecimentos

Expresso meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma tornaram possível a elaboração desta pesquisa:

À minha esposa, Vanessa dos Reis Lara, por todo o apoio e dedicação recebidos durante todo o tempo.

À minha família por me acomodar tão distante de casa.

À minha orientadora Profa. Dra. Eliane A. Del Lama pela paciência, encorajamento e confiança.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso pelo apoio e tempo investidos neste trabalho.

À FAPESP (proc. N. 2015/10.858-8) pelos recursos disponibilizados para a aquisição de equipamentos e insumos.

Ao CNPq pela bolsa de estudos (proc. N. 14309/2013-3).

Ao CEFET-MG pela bolsa de incentivo à capacitação e ao Departamento de Minas e Construção Civil pela liberação concedida para conclusão de curso de doutorado.

À ABCP, em especial ao Prof. Yushiro Kihara, e ao IPT, na figura do geólogo Eduardo Brandau Quitete, por permitirem a preparação de amostras em seus laboratórios.

Ao Professor José Delgado Rodrigues por contribuir com seu conhecimento e experiência no debate sobre os dados obtidos.

Ao Geólogo Lauro K. Dehira pelas diversas formas de contribuições prestadas durante toda a pesquisa.

À Profa. Kátia Leite Mansur e à colega Amanda Ricardo pelo apoio nas coletas do Gnaiss Facoidal do Rio de Janeiro.

Ao colega Leonardo Martinez de Paschoal pela ajuda e tempo prestado na análise petrográfica.

À Coordenação do Parque do Catalão da Ilha do Fundão pela permissão de retirada de amostras.

Aos funcionários do laboratório de química do Instituto de Geociências da USP, Sandra, Vinicius, Audrey, Marinês e Manoel por todo o apoio.

E a todos os amigos e colegas, da USP, CEFET, UFRJ, ABCP por sua dedicação e apoio.

Resumo

GIMENEZ, Alexander Martin Silveira. **Suscetibilidade experimental de rochas do patrimônio histórico aos agentes do intemperismo**. 2018. 262 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

Esta pesquisa teve por objetivo avaliar a suscetibilidade a ensaios de intemperismo acelerado de cinco rochas usadas no patrimônio histórico e cultural das cidades do Rio de Janeiro e São Paulo, para determinar suas resistências frente a: ambientes quimicamente agressivos por meio de exposições em câmaras saturadas de SO_2 e NaCl ; imersão parcial em soluções ácidas e alcalina (H_2SO_4 , HCl , HNO_3 e NaOH); e ciclagens de choque térmico. As rochas abordadas no estudo foram: Granito Itaquera, Granito Cinza Mauá e Monzonito Preto Piracaia, de São Paulo; Gnaisse Facoidal do Rio de Janeiro e um mármore branco do Espírito Santo. Com exceção do mármore, incluído no estudo devido aos diversos monumentos históricos feitos em mármore dos mais variados, todas as rochas tiveram larga utilização na construção de edifícios e monumentos das duas cidades. Nas rochas submetidas às alterações foram feitas determinações, previamente e posteriormente aos ensaios, de suas características físicas: densidade, porosidade, absorção de água, absorção de água por capilaridade, absorção de água por tubo de Karsten, índice de resistência ao carregamento pontual, velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, resistência superficial por martelo de rebote (martelo de Schmidt) e cor por espectrofotometria. Foram efetuadas também análises petrográficas das rochas e difratometria de raios X em sais gerados nos corpos parcialmente imersos em soluções. A caracterização das rochas sãs foi catalogada com o intuito de contribuir com estudos de conservação-restauração futuros, considerando que o acesso a pedreiras e disponibilidade das mesmas tendem a diminuir, devido à urbanização e exaustão de pedreiras. Dentre as alterações impostas, a que mais impactou as rochas foi a do choque térmico. As alterações de caráter químico foram mais agressivas sobre o mármore, gerando alterações mais sutis nos outros litotipos, conforme era esperado. Os métodos de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e a resistência superficial por martelo de rebote permitiram inferir que as alterações ocorridas foram predominantemente superficiais, uma vez que ocorreu maior perda de resistência superficial do que redução de velocidade. A rocha que apresenta maior perda de resistência superficial é o Monzonito Preto Piracaia, que em contrapartida apresenta baixa alteração de velocidade ultrassônica. A alteração de cor foi expressiva em todas as rochas, sendo o procedimento de imersão parcial em soluções ácidas o mais agressivo.

Palavras-chave: Intemperismo artificial. Métodos não destrutivos. Patrimônio histórico. Alteração cromática. Choque térmico.

Abstract

GIMENEZ, Alexander Martin Silveira. **Experimental susceptibility of rocks used in historic heritage to weathering agents**. 2018. 262 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

The purpose of this research was to evaluate the susceptibility to accelerated weathering tests of five rocks used in the historical and cultural patrimony of the cities of Rio de Janeiro and São Paulo in order to determine their resistance to: chemically aggressive environments through exposure to SO_2 and NaCl in saturated chambers; partial immersion in acidic and alkaline solutions (H_2SO_4 , HCl, HNO_3 and NaOH); and thermal shock cycling. The rocks covered in the study were: Itaquera Granite, Gray Mauá Granite and Black Piracaia Monzonite, from São Paulo; Augen Gneiss from Rio de Janeiro and a white marble from Espírito Santo. All the rocks have been widely used in the construction of buildings and monuments of the two cities, except for the marble, which was included in the study due to its use in various historical monuments. To the rocks subjected to the artificial weathering, determinations of their physical characteristics were made, before and after the tests: density, porosity, water absorption, water absorption by capillarity, water absorption by Karsten tube, point load strength index, ultrasound pulse velocity, surface resistance by rebound hammer (Schmidt's hammer) and color by spectrophotometry. Also, petrographic analyses of the rocks and X - ray diffraction in salts generated in the bodies partially immersed in solutions were carried out. The characterization of unaltered rocks was cataloged with the intention of contributing to future studies of conservation and restoration, considering that the access to quarries and their availability tend to decrease due to the urbanization and exhaustion of quarries. Among the alterations imposed, thermal shock was the one that most affected the rocks. While chemical alterations were more aggressive on the marble, more subtle alterations were observed in the other lithotypes, as expected. The ultrasonic wave propagation velocity methods and the surface resistance by rebound hammer allowed to infer that the alterations occurred were predominantly superficial, since there was a greater loss of surface resistance than reduction of velocity. The rock that presented the greatest loss of surface resistance is the Black Piracaia Monzonite, which in turn has a low ultrasonic velocity change. The color change was significant in all rocks, with the partial immersions in acidic solutions being the most forceful procedure for this characteristic.

Keywords: Artificial Weathering. Non-destructive methods. Historic Heritage. Chromatic alteration. Thermal shock.

Sumário

Dedicatória.....	III
Agradecimentos.....	V
Resumo	VII
Abstract.....	IX
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos	4
2 Referencial teórico	5
2.1 Processos de alteração das rochas	5
2.2 Estudos de intemperismo artificial	11
2.3 Ensaio de Controle	16
3 Rochas abordadas no estudo.....	27
3.1 Granito Itaquera.....	27
3.2 Granito Cinza Mauá.....	28
3.3 Monzonito Piracaia	30
3.4 Gnaiss Facoidal.....	31
3.5 Mármore	32
3.6 Locais de Coleta e Ocorrência.....	34
4 Métodos.....	39
4.1 Preparação das Amostras	39
4.2 Ensaio de Intemperismo Artificial	41
4.2.1 Exposição à Névoa Salina	41
4.2.2 Resistência ao Envelhecimento por ação de SO ₂	44
4.2.3 Alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalina	45
4.2.4 Resistência ao Envelhecimento por Choque Térmico.....	48
4.3 Ensaio de controle	51
4.3.1 Dessalinização dos corpos de prova	51
4.3.2 Determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água	52
4.3.3 Absorção de Água por Capilaridade	54
4.3.4 Índice de resistência ao carregamento pontual.....	56
4.3.5 Ensaio de caracterização petrográfica e composicional	59

4.3.6	Absorção de Água por Tubo de Karsten	59
4.3.7	Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas	61
4.3.8	Determinação da resistência superficial pelo método do martelo de rebote	64
4.3.9	Determinação da Alteração de Cor por Espectrofotometria	65
5	Apresentação dos resultados	69
5.1	Granito Itaquera.....	69
5.1.1	Alterações constatadas durante os ensaios.....	69
5.1.2	Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico	72
5.1.3	Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água	74
5.1.4	Absorção de água por capilaridade.....	76
5.1.5	Índice de resistência ao carregamento pontual (<i>Point load test</i>)	81
5.1.6	Absorção de água por tubo de Karsten.....	82
5.1.7	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	85
5.1.8	Resistência superficial por esclerometria	91
5.1.9	Determinação da cor por espectrofotometria	94
5.2	Granito Cinza Mauá.....	102
5.2.1	Alterações constatadas durante os ensaios.....	102
5.2.2	Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico	104
5.2.3	Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água	105
5.2.4	Absorção de água por capilaridade.....	108
5.2.5	Índice de resistência ao carregamento pontual (<i>Point load test</i>)	112
5.2.6	Absorção de água por tubo de Karsten.....	113
5.2.7	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	116
5.2.8	Resistência superficial por esclerometria	121
5.2.9	Determinação da cor por espectrofotometria	125
5.3	Monzonito Preto Piracaia.....	132
5.3.1	Alterações e reações constatadas durante os ensaios	132
5.3.2	Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico	136
5.3.3	Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água	137
5.3.4	Absorção de água por capilaridade.....	139
5.3.5	Índice de resistência ao carregamento pontual (<i>Point load test</i>)	144
5.3.6	Absorção de água por tubo de Karsten.....	145
5.3.7	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	148
5.3.8	Resistência superficial por esclerometria	154
5.3.9	Determinação da cor por espectrofotometria	158
5.4	Gnaiss Facoidal.....	165

5.4.1	Alterações constatadas durante os ensaios.....	165
5.4.2	Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico	167
5.4.3	Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água.....	169
5.4.4	Absorção de água por capilaridade	171
5.4.5	Índice de resistência ao carregamento pontual (<i>Point load test</i>)	175
5.4.6	Absorção de água por tubo de Karsten.....	176
5.4.7	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	179
5.4.8	Resistência superficial por esclerometria.....	185
5.4.9	Determinação da cor por espectrofotometria	191
5.5	Mármore	202
5.5.1	Alterações constatadas durante os ensaios.....	202
5.5.2	Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico	204
5.5.3	Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água.....	205
5.5.4	Absorção de água por capilaridade	208
5.5.5	Índice de resistência ao carregamento pontual (<i>Point load test</i>)	212
5.5.6	Absorção de água por tubo de Karsten.....	213
5.5.7	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	216
5.5.8	Resistência superficial por esclerometria.....	222
5.5.9	Determinação da cor por espectrofotometria	224
6	Discussão dos resultados.....	229
6.1	Absorção de água.....	229
6.2	Densidade, perda de massa e porosidade.....	233
6.3	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	236
6.4	Resistência superficial e índice de resistência por carregamento pontual.....	239
6.4.1	Resistência superficial	240
6.4.2	Índice de resistência por carregamento pontual.....	243
6.5	Cor	243
6.6	Contribuição dos métodos analíticos	247
6.7	Catálogo da caracterização e suscetibilidade a alterações das rochas abordadas no estudo	249
7	Conclusões	251
8	Referências	255
	Apêndice I – Planilhas de cálculo de perda de massa	263
	Apêndice II – Catálogo de caracterização e suscetibilidade a alterações	271
	Anexo I – Relatório de Ensaio nº1046 701-203 (IPT).....	283

1 Introdução

O uso de rochas na construção de edificações é uma prática milenar e está presente no registro de civilizações antigas, representando atualmente a memória de povos de diferentes localidades e culturas já perdidas. Dentro desse contexto podem ser citadas as construções egípcias, persas, romanas, juntamente com as pré-colombianas, Maias e Incas.

A preservação do patrimônio histórico contempla grande acervo de edificações construídas total ou parcialmente em rocha, onde as ações intempéricas físicas e químicas ocorrem por processos naturais ou associadas a fatores antrópicos que degradam essas obras.

Mundialmente, o crescimento populacional dos últimos séculos associado à industrialização acelerada, acarretou o surgimento de ambientes poluídos e consequentemente agressivos ao patrimônio histórico (Viles, 1997).

No Brasil esse cenário não se apresenta de forma distinta, onde emissões atmosféricas ácidas se combinam com a precipitação natural ou com a umidade marinha, agredindo assim o patrimônio.

A ação do intemperismo sobre as rochas varia de acordo com o seu tipo, em função de diferenças em suas gêneses e composições químicas, e também por possuírem comportamento tecnológico determinado por características intrínsecas e específicas para cada tipo rochoso (Meyer *et al.*, 2003).

Os materiais rochosos tendem a se modificar e deteriorar naturalmente com o tempo, processo esse que pode ser acelerado em condições agressivas, como ambientes poluídos, ou pela utilização de procedimentos construtivos inadequados, bem como por meio da ação de substâncias industriais usadas durante a instalação e/ou manutenção, podendo apresentar perda de brilho, alterações de cor original e redução da resistência mecânica (Frasca, 2003; Frasca & Yamamoto, 2004; Becerra & Costa, 2007).

Fatores antrópicos, como depredação e pichação, são os principais fatores que afetam o patrimônio (Grossi & Del Lama, 2012).

A investigação dos agentes de deterioração e reações desencadeadas em rochas que constituem o patrimônio construído é uma prática crescente mundialmente, ocorrendo de forma ainda pouco expressiva no território brasileiro.

Essa crescente preocupação entre os pesquisadores de distintos países vem gerando frutos, a exemplo do Glossário Ilustrado das Formas de Deterioração da Pedra, elaborado pelo ICOMOS (International Council on Monuments and Sites) editado em 2008 em inglês/francês, e recentemente traduzido para a versão em inglês/português. Esse glossário busca sanar problemas de comunicação referentes a confusões terminológicas entre

cientistas, conservadores-restauradores e outros profissionais, auxiliando na descrição das formas de degradação e na elaboração de mapas de sua ocorrência.

O mapeamento de formas de intemperismo/deterioração de monumentos e obras em pedra é o método mais difundido de análise de alterações desencadeadas em materiais pétreos, geralmente sendo requisitado em restaurações na fase de projeto, consistindo em importante etapa para os trabalhos de restauro.

No entanto, o mapeamento é realizado por meio de análise visual, fator que lhe confere caráter qualitativo do estado de conservação do objeto em questão, enquanto que dados quantitativos do estado de conservação requerem a utilização de ensaios analíticos preferencialmente não destrutivos e/ou coleta de amostras para análises em laboratório.

A impossibilidade da aquisição de amostras representativas do objeto para avaliação por métodos tradicionais, comumente destrutivos, requer que no caso de obras históricas, sua investigação seja feita utilizando-se de métodos não destrutivos.

A eficiência da investigação não destrutiva tem por base a realização de análises comparativas, onde o estado de conservação das rochas é determinado pelas variações entre resultados analíticos, usando de um dos métodos a seguir de acordo com as possibilidades e/ou necessidades de cada estudo:

- Comparativo entre áreas e/ou blocos distintos de uma mesma obra ou objeto. Essa metodologia é utilizada para averiguação de regiões ou partes mais degradadas, e usam como valor de referência uma área ou bloco que apresentam melhores condições de conservação.
- Acompanhamento da evolução no tempo. Metodologia comparativa que toma por base a evolução do estado de conservação de uma obra efetuando avaliações não destrutivas com o passar dos anos, acompanhando assim a degradação ocorrida. Esta metodologia é muito utilizada na avaliação da eficiência de consolidantes e/ou outras ações corretivas empregadas em restauros.
- Comparativo com a rocha fresca. Essa metodologia requer acesso a amostras de rocha correlatas às empregadas nas obras em estudo, geralmente extraídas de suas pedreiras originais, ou obtendo acesso a dados da rocha sã, obtidos pelo mesmo método não destrutivo a ser utilizado na avaliação do objeto em análise, assim permitindo comparar os resultados, obtendo-se assim seu estado de conservação.

Dentre os três métodos, o comparativo com rochas frescas é o que mais pode ocasionar dificuldades, pois muitas vezes as pedreiras originais estão situadas em regiões

altamente urbanizadas, de difícil acesso ou completamente aterradas, sem afloramentos remanescentes que permitam coleta de amostras.

Nesse contexto, esta tese estuda cinco rochas, das quais quatro estão presentes em obras do patrimônio histórico das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro, e a quinta é um mármore ornamental nacional, incluído na pesquisa devido à larga utilização de mármore importados em monumentos nas referidas cidades.

Estas rochas foram caracterizadas por ensaios tradicionais de caracterização de rochas ornamentais em laboratório por ensaios não destrutivos passíveis de aplicação em obras do patrimônio.

Os litotipos foram também submetidos a distintos métodos laboratoriais de intemperismo artificial, sendo as reações acompanhadas pelos mesmos ensaios utilizados para sua caracterização, divididos entre ensaios de caracterização tradicionais e ensaios não destrutivos.

As rochas abordadas nesta pesquisa foram o Granito Itaquera, o Granito Cinza Mauá e o Monzonito Preto Piracaia, utilizadas largamente em obras históricas, monumentos, e jazigos dos cemitérios da cidade de São Paulo, sendo oriundas da região e cidades próximas. O Gnaiss Facoidal foi o representante da cidade do Rio de Janeiro, sendo utilizado desde o período colonial devido a sua disponibilidade e durabilidade. E do Espírito Santo foi utilizado um mármore oriundo da região de Itaoca, no município de Cachoeiro do Itapemirim.

As rochas foram ensaiadas pelos métodos de intemperismo artificial de exposições à névoa salina e câmara saturada de SO_2 , imersão parcial em soluções ácidas e alcalina e choque térmico.

Os ensaios de caracterização e controle nos quais avaliaram-se as rochas foram: de caráter destrutivo e executáveis exclusivamente em laboratório - a determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água; absorção de água por capilaridade; índice da resistência ao carregamento pontual; análise petrográfica; de caráter não destrutivo - a absorção de água por tubo de Karsten, a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, determinação da resistência superficial pelo método do martelo de rebote (esclerometria) e a determinação da alteração de cor por espectrofotometria.

1.1 Objetivos

O principal objetivo dessa pesquisa foi determinar a suscetibilidade das rochas selecionadas aos ensaios de intemperismo artificial, visando caracterizar sua resistência ao intemperismo natural ou antrópico em ambientes urbanos.

Como objetivos secundários foram realizadas: a) análise da eficiência dos métodos de ensaio de caracterização e controle no processo de determinação das alterações; e b) catalogação da caracterização das rochas nos ensaios de laboratório e não destrutivos, no intuito de servir como base de consulta para trabalhos de conservação-restauro.

2 Referencial teórico

2.1 Processos de alteração das rochas

A durabilidade pode ser definida com a capacidade de um material pétreo de resistir à ação dos agentes intempéricos de acordo com fatores intrínsecos e extrínsecos. Os intrínsecos dependem dos materiais e correspondem às características petrográficas e físicas dos mesmos, e os extrínsecos dependem do ambiente (Grossi *et al.*, 1998).

O intemperismo dos materiais rochosos se inicia assim que entram em contato com as condições atmosféricas da superfície terrestre (Frascá & Yamamoto, 2010).

As rochas expostas à superfície terrestre encontram-se em constante alteração o que leva à sua desagregação e decomposição, fator este denominado de intemperismo. O intemperismo é o conjunto de fenômenos físicos, atribuídos à degradação; químicos, à decomposição dos materiais rochosos; e biológicos.

O intemperismo é a forma natural de decomposição das rochas em partículas menores, trata-se de um processo lento e contínuo que afeta todas as substâncias expostas à atmosfera, incluindo as rochas (Siegesmund *et al.*, 2002).

O intemperismo pode se manifestar naturalmente de duas formas:

- **Intemperismo Físico**

O intemperismo físico é a desagregação da rocha, por meio da perda de material por fragmentação do corpo rochoso original. Esse processo é desencadeado pelas diversas dinâmicas comportamentais dos minerais que constituem as rochas, como por exemplo expansão e contração quando submetidos a variações térmicas, bem como a ocorrência de esforços físicos sobre a rocha efetuando cargas compressivas ou extensivas assim ocasionando em deformações rúpteis da rocha. Como processos do intemperismo físico podem se destacar: variações de temperatura, hidratação e desidratação, e congelamento e degelo.

- **Intemperismo Químico**

O intemperismo químico está relacionado com decomposição do material rochoso por meio de reações químicas dos minerais com soluções que penetram na rocha por fissuras. Essas soluções se formam por reações das águas das chuvas com moléculas

em suspensão como por exemplo o dióxido de carbono (CO_2). São processos do intemperismo químico: oxidação, hidrólise, carbonatação e dissolução.

Quando os processos físicos e/ou químicos têm alguma ação biológica denomina-se intemperismo biológico.

De acordo com Toledo *et al.* (2009) o fator que, isoladamente, mais influencia no intemperismo é o clima, pois as variações de pluviosidade e as temperaturas médias anuais de cada região desencadeiam distintas reações intempéricas. Dessa forma, o intemperismo físico é predominante em regiões com baixa pluviosidade e temperatura, em contrapartida regiões com altas temperaturas e pluviosidades estão mais sujeitas à ação do intemperismo químico (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Tipo de ação intempérica de acordo com as temperaturas e pluviosidades anuais. Imagem adaptada de Toledo (2009).

As ações do clima também englobam os agentes atmosféricos que atuam diretamente sobre as rochas. De acordo com Aires-Barros (1991), são:

- Umidade, manifestada em chuvas, névoas e a própria umidade relativa do ar;
- Temperatura do ar, podendo acelerar as reações químicas;
- Insolação e resfriamento noturno, podendo provocar condensações de vapor d'água existente na superfície da rocha ou afetar a taxa de deposição e os fenômenos de evaporação;

- Vento e energia cinética, que promovem ação abrasiva sobre as paredes;
- Constituintes do ar e poluentes atmosféricos (gasosos e aerossóis), condicionando as taxas de ataque químico.

A ação natural do intemperismo pode se acentuar quando ocorrem alterações químicas da atmosfera, fator potencializado em áreas urbanas e industriais onde a emissão de poluentes é presente.

De acordo com Lefèvre & Ausset (2002) e Fornaro (2006) as atmosferas poluídas em áreas urbanas estão relacionadas com o aumento populacional, e dos elevados níveis de produção e consumo de energia nos últimos dois séculos, desencadeados pelo desenvolvimento industrial, aumento dos meios de transportes públicos e privados e o aquecimento doméstico, bem como a substituição de madeira por carvão e derivados de petróleo, levando a um aumento expressivo de emissões atmosféricas de compostos sulfurosos, a exemplo de dióxido de enxofre (SO_2) e particulados (cinzas, fuligens), sendo a queima de combustíveis fósseis a principal fonte de poluentes.

Segundo Fornaro (2006) na atmosfera podem estar presentes grandes variedades de poluentes, classificados em:

- Poluentes primários: emitidos diretamente pelas fontes (SO_2 , NO, NH_3 , hidrocarbonetos, material particulado, etc.);
- Poluentes secundários: aqueles que são formados na atmosfera pelas reações químicas entre poluentes primários e constituintes naturais da atmosfera (O_3 , H_2O_2 , ácidos sulfúrico e nítrico, etc.).

Sendo Fornaro (2006) as principais fontes para esses poluentes atmosféricos são queimas de combustíveis, processos industriais, queimadas, sal marinho, erupções vulcânicas, suspensão de material particulado do solo e reações químicas da atmosfera, gerando emissões de CO, CO_2 , NO_x , SO_2 , hidrocarbonetos, ácidos orgânicos, além de íons em geral (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), metais (Fe, Cu, Pb, Ni, Cd, etc.) e ozônio (O_3).

As partículas em suspensão na atmosfera constituem um grupo consideravelmente extenso de poluentes do ar, provenientes de fontes variadas como automóveis, caminhões, siderúrgicas, fábricas de cimento, fábricas de celulose e aterros sanitário (Gomes, 2010). O Quadro 2.1 apresenta a composição dos diferentes tipos de partículas e suas respectivas fontes.

Quadro 2.1 - Composição dos diferentes tipos de partículas e respetiva fonte. (Adaptado de Gomes, 2010)

Partículas		Composição		Fonte			
		Nome	Fórmula/Símbolo				
Naturais	Primárias	Quartzo		SiO ₂		Emissões fugitivas do solo	
		Argila	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄			
			Illita	K(Al,Mg) ₃ SiAl ₁₀ (OH)			
		Feldspatos	Anortoclásio	KAISi ₃ O ₈			
			Plagioclásios	(Na,Ca)(AlSi) ₄ O ₈			
		Carbonatos	Calcita	CaCO ₃			
			Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂			
		Sulfato de Cálcio		CaSO ₄ .2H ₂ O			
		Óxido de Ferro		Fe ₂ O ₃			
		Cloreto de Sódio		NaCl			
		Sulfato de Sódio		Na ₂ SO ₄			
		Sulfato de Magnésio		MgSO ₄			
		Sulfato de Potássio		K ₂ SO ₄		Spray Marinho	
	Secundárias	Sulfatos		SO ₄			
		Nitratos		NO ₃			
Antropogénicas	Primárias	Potássio		K		Escapamentos de automóveis	
		Chumbo		Pb			
		Bromo		Br			
		Cloro		Cl			
		Níquel		Ni		Caldeiras	
		Vanádio		V			
		Manganês		Mn			
		Cobre		Cu			
	Secundárias	Sulfatos		SO ₄		Oxidação	Gases Sulfurados
		Nitratos		NO ₃			Óxidos de Nitrogénio

A remoção desses poluentes da atmosfera ocorre por dois mecanismos:

- 1) Deposição seca – corresponde à sedimentação gravitacional e à interceptação do material particulado ou absorção de gases por superfícies como solo, vegetação e edificações;

- 2) Deposição úmida - corresponde à absorção de poluentes gasosos e partículas por gotas de nuvem e por arraste durante queda das gotas na forma de neblina, chuva ou neve.

Dentre os diversos poluentes possíveis em ambientes urbanos e atmosferas naturalmente agressivas, este trabalho simulou ataques pelas ações de névoa salina (NaCl), SO₂, ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico e hidróxido de sódio.

De acordo com Amoroso & Fassina (1983), a ação de poluentes atmosféricos como o dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, ácido sulfúrico, ácido nítrico e partículas, aceleram grandemente a deterioração das rochas de construções e obras do patrimônio.

A névoa salina é um agente de intemperismo poderoso que age efetivamente sobre as rochas de qualquer composição. Os primeiros sinais de alteração se manifestam superficialmente, mesmo em rochas silicáticas (Silva & Simão, 2009).

O principal responsável pela atmosfera marinha corrosiva é o cloreto (Cl⁻), íon derivado do cloreto de sódio, transportado do oceano para os continentes pelos ventos (Lima, 2006).

A penetração de soluções salinas nos poros, fissuras e fraturas das rochas, assim como sua deposição e cristalização de sal envolvem tensões que aumentam os espaços vazios gerando a degradação dos materiais (Zornaza-Indart *et al.*, 2014).

O dióxido de enxofre (SO₂) é resultado da combustão de combustíveis fósseis e tem como fontes principais os automóveis e termelétricas. Na atmosfera, o SO₂ oxida formando ácido sulfúrico (H₂SO₄), transformação essa que depende do tempo de permanência no ar, da presença de luz solar, temperatura, umidade e adsorção do gás na superfície de partículas (Braga *et al.*, 2001).

De todos os compostos de enxofre, o SO₂ é o poluente maioritário (Gomes, 2010), e se forma quando o enxofre reage com oxigênio (Eq. 2.1):

Eq. 2.1

O SO₂ é o principal responsável pela formação de crostas negras nas superfícies de rochas calcárias de edifícios e monumentos. Estas ocorrem pela formação de gipsita (CaSO₄.2H₂O), gerada pela reação do gás com o carbonato de cálcio (Torfs & Van Grieken, 1996).

Uma vez na atmosfera, ocorrem várias reações que promovem a remoção do dióxido de enxofre, a exemplo da oxidação (Eq 2.2):

Eq. 2.2

Os óxidos de enxofre podem reagir com água formando ácidos, processo que ocorre em eventos de chuvas ácidas, quando o dióxido de enxofre é poluente assimilado, formando os ácidos sulfuroso e sulfúrico (Eq. 2.3 e 2.4):

Eq. 2.3

Eq. 2.4

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são poluentes emitidos a partir de fontes estacionárias, como equipamentos de combustão, e são compostos essencialmente por monóxido (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Na combustão fóssil, a formação de NO predomina sobre a de NO_2 , sendo a fração de NO_2 inferior a 10% do total de NO emitido.

O NO não é muito perigoso ou danoso, pois não é solúvel em água (Grossi, 2016). A ação mais degradante dos óxidos de nitrogênio é resultado de reações do NO_2 .

O ácido nítrico (HNO_3) é formado juntamente ao ácido nitroso (HNO_2) na reação do óxido nitroso (NO_2) com água (Eq. 2.5):

Eq. 2.5

As alterações ocorrem não somente por meio de poluentes atmosféricos, mas também pela ação de produtos que são postos em contato com as rochas. O ácido clorídrico (HCl) e o hidróxido de sódio (NaOH) são reagentes comumente presentes em produtos de limpeza, conhecidos popularmente pelas denominações de ácido muriático e soda cáustica.

O ácido muriático tem por composição básica o HCl, com concentração mínima de 33%. Alguns fabricantes e revendedores de produto usam a denominação de *limpa-pedras*.

A soda cáustica é uma base forte, utilizada como desengordurante e na produção de detergentes e produtos de limpeza em geral.

A inclusão destes dois reagentes na pesquisa objetivou observar as reações que podem ser desencadeadas por processos de limpeza.

Nesta pesquisa, também foi abordada alteração de caráter físico, que consistiu em ciclos de choque térmico.

A alteração por choque térmico objetivou observar as respostas das rochas à ação agressiva de mudança de temperatura, quando ocorre expansão e contração térmica dos minerais, acarretando perda de massa, aumento da porosidade e fraturamento, e perda de resistência.

De acordo com Frascá (2003), para a avaliação da alterabilidade são aplicáveis diversas técnicas, todas medindo a variação, no tempo, de uma grandeza intrínseca ou com ela intimamente correlacionada, atuando na sua característica fundamental que é a dinâmica temporal.

Os ensaios de alteração artificial constituem metodologias básicas de investigação no campo de estudo de materiais pétreos e suas alterações em monumentos. Referem-se a testes relativamente simples e comumente normatizados por diversos órgãos (ASTM, ABNT, RILEM, DIN, UNE). Consistem na exposição de rochas a ciclos de cristalização de sais, umedecimento e secagem, congelamento e degelo, luz ultravioleta, atmosferas agressivas e névoa salina (Rivas Brea *et al.*, 2008).

Se corretamente interpretados, eles podem contribuir tanto para a seleção adequada de materiais em relação ao uso (Becerra & Costa, 2007), como obter informações que forneçam subsídio para a escolha de técnicas de fixação, manutenção e conservação das rochas, buscando prevenir sua deterioração e favorecendo sua durabilidade (Frascá, 2003).

2.2 Estudos de intemperismo artificial

Estudos de intemperismo artificial, também denominados de envelhecimento artificial acelerado, ensaios de durabilidade, alteração acelerada, ou ainda, ensaio acelerado de corrosão, são frutos de estudos que buscam explicar as causas de degradação pelo meio sobre um material pétreo (Lima, 2006).

A mesma autora aponta que estas pesquisas podem ser enquadradas em três categorias principais:

- **Métodos indiretos:** baseiam-se na caracterização para deduzir a durabilidade de uma rocha, considerando também os fatores ambientais que atuam sobre a mesma.
- **Métodos comparativos:** avaliam o comportamento de um material pétreo a partir do conhecimento prévio que se tem do mesmo ou de outro de características similares.
- **Métodos experimentais:** em alguns casos, adicionalmente à caracterização petrofísica e das referências prévias, é conveniente recorrer a ensaios de laboratório, submetendo amostras de rocha a ensaios de intemperismo artificial.

O quadro 2.2 resume os métodos mais utilizados para avaliar a durabilidade de rochas.

Dentre esses métodos, o estudo de rochas pertencentes ao patrimônio histórico conta com investigações efetuadas pelos métodos comparativos e experimentais, já que nem sempre há disponibilidade de amostras.

Em sua grande maioria, os estudos comparativos são realizados com avaliações por ensaios não destrutivos aplicáveis nos edifícios e monumentos, sendo os resultados comparados com as amostras de laboratório. Algumas pesquisas recentes que utilizaram o método comparativo são: Gimenez (2012), Rodrigues (2012) e Grossi (2013).

Estudos por métodos laboratoriais, onde condições que alteram as rochas são impostas para determinar seu comportamento, têm sido desenvolvidos em diversos países nas últimas décadas, principalmente em regiões de obras do patrimônio cultural com risco eminente de degradação.

Quadro 2.2 - Métodos e ensaios de durabilidade das rochas mais utilizados. Fonte: Lima (2006).

1- Indiretos:
- Caracterização petrofísica
2- Comparativos:
- Comparação de deterioração
3- Experimentais (ensaios de durabilidade):
- Em tempo real: exposição à intempérie.
- Acelerados: ensaios de envelhecimento artificial
- Básicos:
Ciclos de umedecimento e secagem
Ciclos de congelamento e degelo
Ciclos de cristalização de sais
- Atmosferas controladas:
Atmosferas contaminadas
Névoa salina
Chuva ácida
- Outros:
Ataque com soluções agressivas
Exposição à radiação ultravioleta
Desmoronamento
Ciclos térmicos
Ensaio combinados

A maior parte dos trabalhos norteiam os estudos para o tratamento e acompanhamento de patologias detectadas buscando a melhor preservação dos objetos.

No Brasil, estes trabalhos ainda são escassos e em sua maioria partem de centros de pesquisa e universidades com linhas de pesquisas dedicadas ao estudo da conservação do patrimônio construído em rocha.

Os órgãos dedicados à preservação do patrimônio histórico, como o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) e o Departamento do Patrimônio Histórico do Município de São Paulo (DPH), não dispõem de recursos, sejam financeiros ou humanos, para investimentos em pesquisas na área.

A seguir são apresentadas pesquisas que utilizaram ensaios de intemperismo artificial desenvolvidos em laboratório para determinação das suscetibilidades de rochas a agentes de alteração.

Hutchinson *et al.* (1992), utilizando de dispositivos capazes de controle de emissões de SO₂ e HCl, investigaram os efeitos da deposição seca desses reagentes na alteração de

calcário, buscando simular a degradação tipicamente produzida em áreas externas de forma rápida e realística. Concluem que o HCl quando já depositado na superfície da rocha tende a ser absorvido mais rapidamente que o SO₂ em situações de umedecimento, devido à maior solubilidade do HCl.

Haneef *et al.* (1992), com uso de câmara climática, induziram taxas realísticas de SO₂, NO e NO₂ em superfície secas e úmidas de rochas calcárias, verificando também a ação oxidante do ozônio. Determinam que o SO₂ na fase gasosa não promove oxidação significativa em comparação à presença de umidade superficial. Apontam que o ozônio aumenta a oxidação dos gases poluentes NO e NO₂ na fase gasosa e úmida.

Frască (2003) estudou as respostas de dezoito tipos de rochas graníticas submetidas às alterações por névoa salina, câmara climática saturada por SO₂, imersão parcial em soluções de H₂SO₄, HCl, HNO₃ e NaOH, e choque térmico. Os ensaios de alteração foram de longa duração, em boa parte até que pudessem ser detectadas manifestações de alterabilidade visíveis ou táteis, dentre elas detectaram-se alterações cromáticas, oxidações, eflorescências, escamação, etc. As rochas apresentaram suscetibilidades distintas, sendo os ensaios de alteração considerados mais eficientes as exposições em câmaras de névoa salina e dióxido de enxofre, e a imersão parcial em ácido sulfúrico.

A mesma autora ainda afirma que o caráter introdutório de seu estudo, na área da alteração acelerada de rochas graníticas para revestimento, prevê, entre outros temas, a necessidade de trabalhos futuros em pesquisas para a adequação de técnicas de conservação de rochas.

Lima (2006) avaliou as reações de alteração de três gnaisses ornamentais do estado do Ceará de composição granítica em atmosfera salina e observou nos ensaios alterações de perda de massa e redução do brilho, salientando que tais alterações teriam influência direta na redução de resistência mecânica dessas rochas.

Becerra & Costa (2007) submeteram seis granitos ornamentais brasileiros a ensaios de alteração acelerada, simulando os principais processos de ataque químico produzidos por substâncias presentes em áreas urbanas afetadas por chuvas ácidas e alta salinidade (regiões litorâneas) e por substâncias utilizadas nas instalações e manutenções dessas rochas. Após os ensaios, observaram mudanças estéticas como a perda de brilho, efetuada a olho nu, e o microfraturamento.

Os autores ainda afirmaram que os ensaios de alteração acelerada cumprem com o objetivo de avaliar os processos de deterioração das rochas ornamentais antecipadamente,

pois permitem uma visão global em relação à resposta que as rochas apresentarão quando submetidas aos principais agentes físicos e químicos de degradação.

Torquato *et al.* (2008) estudaram três rochas graníticas oriundas do estado do Ceará por envelhecimento acelerado, onde amostras são submetidas a 80 ciclos em câmara climática com temperatura e umidade controladas em uma atmosfera saturada com SO₂. Os resultados permitiram observar que ocorreu forte ataque aos minerais ferro-magnesianos e a alteração de coloração para tons mais amarelados, tendo sido afetados principalmente os minerais do grupo dos feldspatos. Concluíram que todos os litotipos estudados se comportaram de forma semelhante e que as principais alterações se processaram no início do experimento.

Silva & Simão (2009) submeteram amostras de três calcários, três mármore, seis granitos, dois sienitos, um gabro e um basalto à névoa salina por 13 ciclos de 10 dias cada um. Avaliação após exposição indicou degradação de minerais, variação no brilho superficial, perda de massa e cristalização do sal na superfície das rochas.

Becerra (2009) avaliou a suscetibilidade de calcários ornamentais da região de Medellin, Colômbia, usando os métodos de exposição a vapores de SO₂ e imersão parcial em soluções aciduladas. Observou aumento de massa e formação de crostas negras após 21 dias de exposição. Na imersão parcial em H₂SO₄ constatou a formação de eflorescências nas superfícies das amostras.

Borges *et al.* (2011) expuseram cinco granitos largamente utilizados como rochas ornamentais a 150 ciclos de névoa salina. Avaliaram as alterações por meio de caracterização petrofísica, sendo a maioria dos ensaios físico-mecânicos efetuados prévia e posteriormente à exposição. Apontaram que ocorreu o decréscimo em todas as propriedades avaliadas e que as variações apresentadas após ciclos de NaCl são mais fracas em granitos de granulação média a fina, e média a altas em granitos mais grossos.

Wiese *et al.* (2013) avaliaram a influência da concentração de SO₂ e umidade relativa na velocidade de deposição do SO₂ em uma rocha carbonática e duas rochas silicáticas. Concluíram que a velocidade de deposição nas rochas silicáticas é significativamente mais lenta que na carbonática, pois a influência da umidade na deposição não age nas rochas silicáticas estudadas.

Zornaza-Indart *et al.* (2014) trataram amostras de calcarenitos da fortaleza espanhola de Bizerte (Tunísia) com diferentes consolidantes e os submetendo à ensaio de névoa salina para testar a eficácia dos produtos.

Grossi (2016) executou ensaios de alteração em câmara de SO₂, choque térmico e umedecimento e secagem no Arenito Itararé, utilizado na fachada frontal do Teatro Municipal de São Paulo, para investigação da eficiência de pré-consolidantes, consolidantes, hidrofugantes e proterores de superfície.

2.3 Ensaios de Controle

Os ensaios de caracterização e controle foram utilizados para acompanhar a alterabilidade das amostras ao longo das exposições às técnicas de intemperismo artificial. Dividem-se em dois grupos, o primeiro grupo aborda os métodos tradicionais e destrutivos, tratando-se de métodos aplicáveis unicamente em ambiente de laboratório, compreendendo os ensaios previstos na norma ABNT NBR 15845:2015, indicados para avaliação de rochas ornamentais em território brasileiro. O segundo grupo de ensaios aborda os métodos não destrutivos, ensaios que não requerem a coleta de amostras e não alteram as características dos objetos avaliados, assim podendo ser efetuadas em obras e edifícios tombados sem danificá-los.

Métodos tradicionais e destrutivos

As rochas ornamentais e de revestimento são um campo de interesse nacional de pesquisa mineral, apresentando representatividade comercial e incrementando lucros significativos ao setor mineral.

De acordo com Chiodi Filho & Chiodi (2009), rochas ornamentais e de revestimento, também designadas com pedras naturais, rochas lapídeas, rochas dimensionais e materiais de cantaria, compreendem os materiais geológicos naturais que podem ser extraídos em blocos ou placas, cortados em formas variadas e beneficiados por meio de esquadreamento, polimento, lustro, etc. Seus principais campos de aplicação incluem tanto peças isoladas, como esculturas, tampos e pés de mesa, balcões, lápides e arte funerária em geral, quanto edificações, destacando-se neste caso os revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas, soleiras, dentre outros.

O atual mercado consumidor tem como exigência que seja atestada a qualidade, o que compreende a durabilidade de um produto atrelada ao seu desempenho, de forma a exigir do fornecedor garantias sobre o produto caso seu comportamento não seja o esperado ou adequado. Essa prática é corrente e faz parte do cotidiano tanto de quem adquire um produto como de quem o comercializa.

O setor de rochas ornamentais, da mesma forma, com a evolução do mercado, vem se adequando a estas exigências, o que compreende no desenvolvimento de uma caracterização tecnológica de desempenho.

Essa caracterização tecnológica abrange uma bateria de ensaios que objetivam balizar os campos de aplicação dos materiais segundo padrões normatizados, sendo exigidos pelos grandes compradores e constando como itens obrigatórios em catálogos fotográficos promocionais (Chiodi Filho & Chiodi, 2009).

Segundo estes autores, os seis ensaios mais importantes, designados como *índices de qualidade*, incluem análise petrográfica, índices físicos (densidade, porosidade aparente e absorção d'água), teste de desgaste Amsler, compressão uniaxial ao natural, resistência à flexão em três e quatro apoios, e módulo de deformabilidade estática, ensaios estes que podem ser realizados em rochas brutas e beneficiadas.

Os principais ensaios de caracterização tecnológica estão presentes nas normas ABNT da série NBR 15845:2015 – Rochas para revestimento – Métodos de ensaio, prescrevendo em suas oito partes, os equipamentos e procedimentos padronizados necessários para a sua execução, quais sejam:

- Parte 1 – Análise petrográfica;
- Parte 2 – Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água.
- Parte 3 – Coeficiente de dilatação térmica linear;
- Parte 4 – Resistência ao congelamento e degelo;
- Parte 5 – Resistência à compressão uniaxial;
- Parte 6 – Módulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos);
- Parte 7 – Flexão por carregamento em quatro pontos;
- Parte 8 – Resistência ao impacto de corpo duro.

Dentre os ensaios de caracterização sugeridos pela norma esta pesquisa utilizou a parte 2 para determinação de densidade, porosidade e absorção de água.

Outro ensaio comumente adotado nas caracterizações de rochas é a absorção de água por capilaridade. Este ensaio é um dos parâmetros mais importantes nos estudos de deterioração de rochas, pois trata-se de propriedade reguladora da incorporação de água. A absorção de água depende da estrutura capilar, sendo importante conhecer a distribuição do tamanho dos poros na rocha e a porosidade total, pois o transporte de água ocorre por meios capilares (Frascá, 2003).

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi adotado nas pesquisas de Frascá (2003), Becerra (2009) e Grossi (2016), embora cada um desses autores utilize uma metodologia distinta de determinação da característica.

Estes dois ensaios não comprometem as amostras, pois não alteram suas características físicas durante as análises, não sendo considerados destrutivos, permitindo a reutilização dos corpos avaliados em outras análises. Porém, por se tratar de métodos realizados em laboratório, com a necessidade de coleta e preparação de amostras, são de difícil utilização em estudos do patrimônio.

De caráter destrutivo, optou-se pela utilização do índice de resistência ao carregamento pontual, mais comumente conhecido com *point load test* (PLT). Este ensaio pode ser utilizado como medida indireta para determinação da resistência à compressão uniaxial.

O método é mais utilizado em avaliações geotécnicas na determinação do índice da resistência como parâmetro comparativo à compressão uniaxial. Alguns autores que utilizaram o método são descritos a seguir.

Fener & Ince (2012) estudaram a influência de fenocristais de ortoclásio no índice de resistência por carregamento pontual de rochas graníticas. Concluíram que zonas de fraqueza nos planos de clivagem facilitam a ruptura quando cargas são aplicadas e que reduções significativas ocorrem quando os ensaios são realizados sobre os fenocristais.

Varela *et al.* (2015) usaram o método de carga pontual modificado para a seleção de britadores de minério de ferro, avaliando amostras de itabirito e determinando a resistência à compressão média de 120 MPa. No entanto, apontam que a anisotropia das amostras conferiu grande dispersão nos resultados e concluíram que há maior eficiência em adoção de britadores de rolo quando comparados aos de mandíbula na britagem dessa rocha.

Antão (2015) estudou um granito, também estabelecendo relações entre os valores obtidos pelo ensaio de carga pontual e da resistência à compressão uniaxial. Propôs algumas equações para estimar a resistência à compressão a partir do ensaio de carregamento pontual.

Métodos não destrutivos

Os ensaios considerados não destrutivos são aqueles que não causam nenhum dano no elemento ensaiado ou deixam pequenos danos para serem reparados após o ensaio (Evangelista, 2002).

O desenvolvimento de métodos não destrutivos aborda avaliações de matérias diversas. Sua aplicação é corrente em estudos de concreto, ligas metálicas, madeira e na geofísica.

Com eles é possível determinar propriedades, como resistência superficial e propriedades mecânicas, capacidade de absorção de água, identificar fraturas ou descontinuidades internas, acompanhar alterações cromáticas, determinar o módulo de deformação dinâmico, entre outros (Evangelista, 2002; Grossi, 2013).

A aplicação desses métodos permite executar verificações quantitativas dos materiais, obtendo resultados efetivos de imperfeições de processos produtivos ou das alterações sofridas por desgastes. No caso do estudo de rochas é possível determinar as alterações sofridas na estrutura das rochas.

Importância dos métodos na avaliação do patrimônio

A caracterização tecnológica das rochas ornamentais demonstra uma preocupação com o desempenho das mesmas em suas aplicações, o que compreende a unificação desde as expectativas de projeto, acabamento e principalmente segurança, fatores que não ocorriam no passado, pois a escolha das rochas para tais aplicações estavam mais relacionadas à disponibilidade local, a estética e a facilidade de desbaste e acabamento.

A utilização de métodos não destrutivos na avaliação de rochas constituintes do patrimônio histórico torna-se necessária, pois muitas vezes se desconhece o comportamento físico e químico dessas rochas. Em diversos casos, nunca foram submetidas a estudos técnicos que assegurassem sua aplicação em obra.

A padronização de métodos de caracterização tecnológica de rochas para revestimento, no Brasil, somente ocorre após o surgimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), fundada na década de 1940.

Antes do surgimento dos primeiros procedimentos de controle técnico, contava-se unicamente com o conhecimento dos artesãos e construtores da época, que dispunham de métodos tradicionais de aplicação e não tinham como saber o desempenho tecnológico das rochas.

Os métodos não destrutivos apresentam-se viáveis ao estudo do patrimônio histórico por permitirem que a avaliação seja executada diretamente sobre objeto de estudo, onde se coletam dados do estado de conservação das rochas sem gerar danos à obra.

Absorção de água por tubo de Karsten

O tubo de Karsten, desenvolvido na Alemanha entre os anos de 1958 e 1960, é utilizado neste método, que é não destrutivo e de fácil utilização *in situ*, e portanto, frequentemente usado por conservadores-restauradores. Consiste em um corpo cilíndrico graduado aberto que é acoplado a uma superfície do material em análise (horizontal ou vertical), preenchido com água destilada, determinando-se a absorção do material em função do tempo (Svahn, 2006).

Entre os fatores positivos do ensaio podem ser citados a sua portabilidade, o que compreende na facilidade de utilização em avaliações *in loco*, a facilidade de operação, baixo custo de utilização e aquisição, e a possibilidade de comparativos de laboratório com avaliações em campo.

Como fatores negativos estão a condição de aplicação, tendo os objetos de estudo de estar em condições de verticalidade ou horizontalidade quase perfeita para que seja efetiva a avaliação, fator este que em avaliações de campo muitas vezes não são ideais. Outro fator é a influência do material de ancoragem que pode absorver água ou permitir evaporação para o ambiente, bem como, a sua má aplicação pode reduzir a área superficial de absorção.

Em função de tratar-se de método de absorção de água não é indicado em rochas com alta porosidade, pois a absorção pode se dispersar na rocha apresentando resultados inconsistentes.

Apps (2011), Serafim (2012), Rodrigues (2012), Grossi (2013), Ricardo (2015), Grossi (2016) são exemplos de pesquisa que fizeram uso do método de absorção de água com tubos de Karsten.

Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

De acordo com Svahn (2006), hoje os métodos de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas estão bem estabelecidos na conservação da pedra. O motivo da popularidade do método é por ser rápido e de fácil utilização em campo. É usado para detectar fraturas e falhas, e para controle de concreto.

O método é favorecido pela portabilidade do aparelho de ultrassom e pelas formas de transmissão, direta, semidireta e indireta, conforme indicado pela norma ABNT NBR 8802/94 - Concreto endurecido: Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica, que permite a aplicação do método no objeto de estudo de acordo com as superfícies disponíveis para análise.

Com isso é possível avaliar a integridade da rocha estudada por meio das variações da velocidade de propagação da onda ultrassônica de uma ou diversas amostras de um mesmo material, podendo ser interpretadas variações na densidade, porosidade e até determinar a existência de descontinuidades internas dos objetos de estudo como a existência de fraturas.

Dentre as desvantagens, está a acoplagem dos transdutores ao objeto de estudo, que consiste em procedimento que requer a utilização de acoplante, material viscoso que preenche os vazios entre a base do transdutor e as irregularidades do objeto. O ideal é que a camada de acoplante seja fina e que os transdutores tenham o máximo possível de contato. No entanto, as mais distintas texturas são encontradas nas obras do patrimônio e em muitos casos as leituras não são possíveis em função da grande irregularidade.

A seguir apresentam-se alguns exemplos de pesquisas que fizeram de uso deste método.

Almesberger *et al.* (2000) avaliaram em laboratório o calcário *Pietra D'Istria*, oriundo da península de Istria (Itália), presente em aproximadamente 80% dos monumentos e construções de Veneza. Em função da anisotropia presente na rocha, utilizaram o método de propagação de ondas ultrassônicas tanto no sentido paralelo à estrutura, como no perpendicular. No estudo em questão utilizaram tanto transdutores de 55 kHz, como de 120 kHz, e afirmaram que os transdutores com maior frequência apresentaram-se mais sensíveis aos distúrbios gerados na onda em função de defeitos nas amostras, optando assim por obter a velocidade com transdutores de 120 kHz.

Frasca (2003) aplicou o método na determinação de alterações decorrentes de ensaios de intemperismo artificial em amostras de dezoito granitos, utilizando-o como método para controlar as alterações sofridas pelos litotipos.

Pelizan (2004) aplicou o método do ultrassom para a determinação do módulo de Young em toras de madeira, executando avaliações longitudinais e transversais pelo método da transmissão direta utilizando transdutores exponenciais. A autora refere-se a estes transdutores como *transdutores ultrassônicos de contato pontual*.

Silva (2005) utilizou o método na avaliação do Teatro Municipal da cidade do Rio de Janeiro, onde expressa a dificuldade de aquisição dos resultados em base constituída de rocha com superfícies irregulares, o que ocorre em função da difícil acoplagem dos transdutores à base, e comenta a influência das vibrações geradas pelo tráfego de veículos na Avenida Rio Branco, próxima ao Teatro Municipal, interferindo na avaliação pelo método de propagação de ondas ultrassônicas.

Rothert *et al.* (2007) usaram o método na avaliação de calcário em Malta, avaliando blocos aplicados em obra histórica e em rocha extraída de pedreira.

Kuzmickas & Del Lama (2014) utilizaram o método na avaliação de jazigo pétreo no Cemitério da Consolação em São Paulo, determinando a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na obra O Sepultamento de Victor Brecheret.

Gimenez & Del Lama (2014) aplicaram o método na avaliação do comportamento de ondas ultrassônicas no Granito Mauá para conservação do Monumento às Bandeiras. No estudo é realizado um comparativo entre os resultados obtidos em laboratório avaliando uma amostra sã, em comparação aos resultados obtidos no monumento com transdutores de 54 kHz e 150 kHz.

Grossi & Del Lama (2015) fizeram avaliação do estado de conservação de quatro faces do Monumento a Ramos de Azevedo utilizando as transmissões semidiretas e indiretas e utilizando transdutores de 54 kHz.

Resistência Superficial de Rochas pelo Método do Martelo de Rebote (esclerometria)

O martelo de Schmidt, ou esclerômetro, foi desenvolvido no final da década de 1940 como um aparelho para ensaios não destrutivos de concreto *in situ*. Tem sido utilizado no estudo da mecânica de rochas desde o início dos anos 1960, principalmente como ferramenta para estimar a resistência à compressão uniaxial e o módulo de Young (Aydin & Basu, 2005).

Como pontos positivos, podem ser apontados: leveza e portabilidade do equipamento, simples de operar e custo baixo, sendo que uma grande quantidade de dados pode ser obtida rapidamente. Os danos que podem ser causados na superfície são baixos, dependendo do tipo de material ao qual é aplicado e seu acabamento.

Um fator negativo é que não é aplicável em rochas frágeis, sendo pouco indicado para o estudo de rochas carbonáticas.

Silva (2005) aponta que as principais restrições de uso são:

- Deve ser empregado para rochas bem cimentadas e com comportamento elástico;
- Rochas que se desagregam ou se partem sob a ação do impacto não podem ser convenientemente testadas;
- As medidas devem ser tomadas em superfícies não rugosas;
- A avaliação em blocos de rochas pode ser feita desde que os mesmos tenham peso mínimo de algumas poucas dezenas de quilos.

A seguir apresentam-se alguns exemplos de pesquisas que fizeram de uso deste método.

Evangelista (2002) testou a eficiência do método na avaliação da resistência do concreto, apontando os principais motivos de utilização do esclerômetro, como o acompanhamento da evolução do concreto após moldagem para efetivação da desforma, o ganho de resistência com a cura do concreto, verificação das condições de recebimento de concreto, substituição da extração de testemunhos para análise de compressão, entre outros fatores.

Silva (2005) utilizou o método na avaliação de degradação de rochas em fachadas de prédios históricos, estudando o Teatro Municipal e o Paço Imperial na Cidade do Rio de Janeiro, apontando o comportamento das rochas utilizadas no patrimônio carioca.

Silva (2007) aplicou o método no estudo de alteração e conservação do patrimônio arquitetônico na cidade do Rio de Janeiro, efetuando análises no pórtico da Igreja do Outeiro da Glória.

Augusto (2009), entre outras avaliações efetuadas, usou o método do martelo de rebote na avaliação de monumentos pétreos da Cidade de São Paulo.

Grossi (2013) avaliou o estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo, efetuando comparativo dos resultados do Granito Itaquera, entre uma amostra sã e os blocos que compõem o monumento.

Determinação da alteração de cor por espectrofotometria

A identificação de cor em um objeto qualquer requer a presença de luz, que é uma porção do espectro eletromagnético compreendida na região do visível, onde os comprimentos de onda variam entre 380 a 780 nm, subdividida nas seguintes faixas: violeta, 380-440 nm; índigo, 440-460nm; azul, 460-490 nm; verde, 490-565 nm; amarelo, 565-590 nm; laranja, 590-630 nm; e vermelho 630-780 nm. Conhecemos como cor a luz refletida formada pela mistura e variação de intensidade dos diversos comprimentos de onda dentro da região do visível. Basicamente é a união da tonalidade, luminosidade e saturação, onde esses atributos são influenciados por diferenças na fonte de luz, na visada, no observador, no tamanho dos objetos, e no fundo ao qual o objeto se insere.

Muitas escalas para quantificar numericamente as cores foram criadas, a primeira delas em 1905, por A. H. Munsell, que classificou as cores de pastilhas de papel colorido de acordo com sua tonalidade (*Munsell Hue*), luminosidade (*Munsell Value*) e saturação (*Munsell*

Chroma), sendo esse sistema posteriormente aprimorado, criando-se o Sistema de Notação Munsell, até hoje utilizado, por exemplo em classificações de coloração de solos.

Mais tarde, em 1931 a CIE (Comissão Internacional de Iluminação) padronizou os sistemas de cores pela especificação dos iluminantes do observador padrão e a metodologia utilizada para obter os valores para descrever a cor.

A CIE utiliza três parâmetros espaciais de coordenadas para definir numericamente a cor, entre os quais estão o CIE ($L^*a^*b^*$) ou CIELAB e o CIELCh ($L^*C^*h^\circ$). Desenvolvido em 1976, esse sistema é formado por um espaço tridimensional, dividindo a luz em parâmetros colorimétricos: luminosidade, que é representado pela letra L^* e o valor 100 identifica o branco e o 0 o preto, a^* representa as cores verde (valores negativos) e vermelho (valores positivos), b^* representa azul (valores negativos) e amarelo (valores positivos), e C representa a saturação. O parâmetro h indica o ângulo da tonalidade métrica, que é semelhante ao da tonalidade cromática.

O método é muito efetivo, sua operação é simples e não requer grandes treinamentos. A portabilidade e o peso do equipamento permitem que várias medidas sejam efetuadas em um dia, favorecendo o operador.

O custo do equipamento é mediano, no entanto o equipamento pode ser utilizado na determinação de cor de qualquer material sólido, favorecendo a aquisição do mesmo.

Medições de cor são usadas em estudos de conservação de rochas para controlar o efeito da limpeza e monitorar o reaparecimento de sujidades após procedimentos de conservação. Também são utilizadas para identificar pigmentos. O procedimento é importante tanto para o acompanhamento de alterações cromáticas por razões estéticas como para identificação de alterações de caráter químico (Svahn, 2006). A seguir apresentam-se alguns exemplos de pesquisas que fizeram de uso do método.

Delgado Rodrigues & Costa (2006) avaliaram nas proximidades da cidade de Évora, Portugal, os aspectos das aplicações de consolidantes em rocha granítica, determinando os parâmetros colorimétricos e demonstrando que certos produtos geram escurecimento e amarelamento da rocha.

Grossi (2013) utilizou o método na avaliação do estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo, verificando a diferença colorimétrica das faces do monumento e correlacionando o estado alterado com amostras sãs em laboratório.

Kuzmickas (2013) aplicou o método em diversas rochas aplicadas em mausoléus históricos no cemitério da Consolação em São Paulo, correlacionando os resultados com o estado de alteração das obras.

Grossi *et al.* (2015) apresentaram resultados do monitoramento da variação de cor ao longo de dois anos no Monumento a Ramos de Azevedo, construído em Granito Itaquera. Compararam também as condições do monumento com amostra de rocha sã. Os resultados obtidos apontam que as variações cromáticas estão relacionadas com amarelamento causados por deposições de poluentes, alterando minerais ricos em ferro.

Del Lama *et al.* (2016) caracterizaram os aspectos colorimétricos do Granito Itaquera, efetuando avaliações em diversas obras e monumentos, gerando uma base de dados para acompanhamento de alterações que possam ocorrer, contribuindo com tratamento.

3 Rochas abordadas no estudo

As rochas abordadas neste estudo foram o Granito Itaquera, o Granito Mauá e o Monzonito Piracaia do estado de São Paulo, o Gnaiss Facoidal do estado do Rio de Janeiro e um mármore do estado do Espírito Santo.

3.1 Granito Itaquera

Os granitos da região de Itaquera, classificados no mapeamento da folha Mauá por Theodorovicz *et al.* (1991) como granito-gnaisses, estão inseridos no Grupo Açungui (Hasui & Sadowski 1976), pertencendo ao Complexo Embu (Silva, 2000). Janasi *et al.* (2003) inserem-os no Domínio Embu. Foram caracterizados petrograficamente em Janasi & Ulbrich (1992) e Del Lama *et al.* (2009).

O Granito Itaquera apresenta estrutura fracamente orientada devido à deformação pouco pronunciada. Trata-se de rocha de coloração cinza clara, com textura fanerítica e granulação fina equigranular (Figura 3.1). Em amostra de mão pode-se identificar a presença de muscovita, biotita, quartzo e feldspato.

Figura 3.1 - Visão macroscópica do Granito Itaquera. Imagem obtida com auxílio de scanner. Largura da foto: 7 cm.

A análise petrográfica mostrou granulação média a fina com cristais de 0,05 a 2,5 mm, ocorrendo raramente a presença de plagioclásio com dimensões entre 3 a 4,5 mm (Figuras 3.2 e 3.3).

A rocha classificada como um biotita monzogranito é composta por microclínio (40%), quartzo (30%), plagioclásio (22 a 23%), biotita (5%) e muscovita (2 a 3%). Como minerais acessórios ocorrem zircão, apatita, fluorita, monazita, titanita e opacos.

Sua utilização é identificada em diversas obras do centro velho da cidade de São Paulo e em jazigos do Cemitério da Consolação, como por exemplo, em parte da Igreja São Bento, na Catedral Metropolitana, na base do Teatro Municipal de São Paulo, no pórtico da entrada do Cemitério da Consolação, nos pedestais dos monumentos Índio Caçador, A Menina e o Bezerra, Aretuza, Fauno, Depois do Banho, Nostalgia, O Ceifador, além do Monumento a Ramos de Azevedo na Cidade Universitária (Reys, 2006; Augusto, 2009; Del Lama *et al.*, 2009; Kuzmickas, 2013; Grossi, 2013; Del Lama *et al.*, 2015; Machado, 2015).

Figura 3.2 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Granito Itaquera. (Polarizadores descruzados).

Figura 3.3 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Granito Itaquera. (Polarizadores cruzados).

3.2 Granito Cinza Mauá

O Granito Cinza Mauá, como é comercialmente denominado o Granito Mauá, é um corpo granítico com ocorrência entre os municípios de Mauá e Ribeirão Pires (Gimenez, 2012). Está inserido entre as diversas intrusões graníticas neoproterozoicas da porção central da Faixa de Dobramentos Ribeira no Domínio Embu (Janasi *et al.*, 2003).

Esta rocha de coloração cinza é classificada como biotita monzogranito porfirítico. A análise macroscópica permite a identificação de fenocristais de feldspato potássico de cor branca com dimensões variando de 10 a 15 mm e matriz de granulação média. A análise visual da matriz em amostra de mão permite a identificação de biotita, quartzo e feldspato (Figura 3.4).

Na análise petrográfica observou-se cristais variando de 0,1 a 0,3 mm e fenocristais de 8 a 10 mm (Figuras 3.5 e 3.6). É composta por microclínio (35 a 40%), quartzo (35%),

plagioclásio (20%) e biotita (5 a 10%). Como minerais acessórios ocorrem apatita, zircão, titanita, turmalina, rutilo, allanita e opacos.

Figura 3.2 - Visão macroscópica do Granito Cinza Mauá. Imagem obtida com auxílio de scanner. Largura da foto: 7 cm.

A utilização do Granito Cinza Mauá é encontrada facilmente na região metropolitana de São Paulo, sendo diversas as suas aplicações (Gimenez, 2012).

A rocha é explorada e comercializada até os dias atuais como rocha de revestimento. Historicamente seu uso na cidade contempla desde o Monumento às Bandeiras de Victor Brecheret, a fachada da biblioteca municipal Mário de Andrade, o revestimento da Catedral Metropolitana, o túmulo da Família Botti e a escultura Grande Anjo de Victor Brecheret no Cemitério da Consolação, até os pisos das estações de metrô de São Paulo e o calçamento do centro velho (Gimenez, 2012; Rodrigues, 2012; Kuzmickas, 2013; Machado, 2015).

Figura 3.5 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Granito Cinza Mauá. (Polarizadores descruzados).

Figura 3.6 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Granito Cinza Mauá. (Polarizadores cruzados).

3.3 Monzonito Piracaia

O Monzonito Preto Piracaia (Figura 3.7), comercialmente conhecido como Granito Preto Piracaia, é originário da cidade homônima. Trata-se uma rocha monzonítica integrante da Associação Magmática Piracaia (Artur *et al.*, 1991), formando vários corpos de pequenas dimensões e distribuídos principalmente na porção sudeste do batólito (Artur, 2003).

Em avaliação macroscópica a rocha apresenta-se equigranular. Possui cor cinza escuro, obtendo-se a cor preta somente após processo de polimento. Visualmente identifica-se percentagem elevada de biotita, feldspato e mineral máfico.

Figura 3.3 - Visão macroscópica do Monzonito Preto Piracaia. Imagem obtida com auxílio de scanner.

Na análise petrográfica apresenta textura granular com cristais variando entre 0,1 e 1,0 mm, excetuando-se os cristais de biotitas que atingem dimensões de até 3 mm (Figuras 3.8 e 3.9).

É composto por plagioclásio (40%), biotita (20%), microclínio (15%), quartzo (10%), hornblenda (7 a 8%), titanita (5%), epidoto (2 a 3%), e os acessórios: apatita, titanita, epidoto, clorita, allanita e opacos, sendo classificado como um hornblenda-biotita quartzo monzonito.

O Monzonito Preto Piracaia está entre as rochas mais utilizadas em edifícios do centro de São Paulo, estando presente no Edifício da Caixa Econômica Federal, conhecido como Caixa Cultural localizado nas proximidades da Praça da Sé, no pórtico de entrada do Banco de São Paulo, na base do Edifício Sampaio Moreira, entre outros (Del Lama *et al.*, 2015).

Figura 3.8 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Monzonito Preto Piracaia. (Polarizadores descruzados).

Figura 3.9 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Monzonito Preto Piracaia. (Polarizadores cruzados).

Seu uso também ocorre em jazigos, como por exemplo, no túmulo da Família Com. Sabbado D'Angelo no Cemitério da Consolação, a obra O último Adeus de Alfredo Olini, o Mausoléu do Ator de Antônio Del Debbio e Pietá de Galileo Emendabili no Cemitério São Paulo (Kuzmickas, 2013; Rodrigues, 2014).

3.4 Gnaiss Facoidal

O Gnaiss Facoidal do Rio de Janeiro, ou *Augen* Gnaiss, ocorre predominantemente nas cidades do Rio de Janeiro e Niterói. Está inserido na Suíte Rio de Janeiro definida por Silva (1999) e Silva *et al.* (2000).

Em análise macroscópica observou-se estrutura gnáissica bem definida, resultante da deformação ocorrida, detectada a partir da orientação das biotitas. Identifica-se megacristais de feldspato potássico variando entre 2 e 8 cm, e matriz de granulação média composta por biotita, quartzo e feldspato (Figura 3.10).

Figura 3.4 - Visão macroscópica do Gnaiss Facoidal. Imagem obtida com auxílio de scanner. Largura da foto: 7 cm.

A análise de lâmina delgada em microscópio petrográfico aponta textura porfiroclástica, com porções lepidoblástica e granoblástica. Os porfiroclastos apresentam-se fraturados, e ocorrem em agregados minerais com continuidade ótica. Os cristais da matriz variam de 0,5 a 3,0 mm (Figuras 3.11 e 3.12). É composta por microlínio (40%), quartzo (35%), plagioclásio (19-20%), biotita (5%) e granada (<1%). Apresenta minerais acessórios de clorita, fibrolita, zircão, carbonato, apatita, epidoto, titanita e opacos, sendo classificado como um biotita gnaiss.

Figura 3.11 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Gnaiss Facoidal. (Polarizadores descruzados).

Figura 3.12 – Fotomicrografia de lâmina delgada do Gnaiss Facoidal. (Polarizadores cruzados).

O uso do Gnaiss Facoidal na cidade do Rio de Janeiro tem início ainda no Brasil Colonial (Almeida & Porto Jr., 2012). A sua utilização pode ser contemplada em diversos edifícios históricos da cidade do Rio de Janeiro em obras centenárias ou ainda em obras do século XX, como por exemplo, Palácio do Catete, Arquivo Nacional, Palácio da Geologia do DNPM, Centro Cultural Banco do Brasil, Igreja de Santo Cristo dos Milagres, Igreja da Candelária, Museu Histórico Nacional, Palácio Capanema, Cais do Paço Imperial (atual Praça XV), assim como em diversas residências e edifícios da virada do século XIX para o XX.

3.5 Mármore

O mármore abordado neste estudo (Figura 3.13) é oriundo da região de Itaoca, município de Cachoeiro do Itapemirim no Espírito Santo, pertence ao Complexo Paraíba do Sul (Vieira *et al.*, 1997). Segundo estes autores, os mármore são o principal bem mineral da área.

Figura 3.5 - Visão macroscópica do mármore. Imagem obtida fotograficamente. Largura da foto: 7 cm.

Os mármore da região de Itaoca apresentam composição calcítica e/ou dolomítica, no entanto, na exploração para uso como rochas ornamentais, os dolomíticos são mais utilizados devido a sua melhor resistência (Jordt-Evangelista & Viana, 2000).

A rocha apresenta coloração branca e estrutura maciça, com cristais de carbonato com dimensão média. A reação ao ácido clorídrico diluído indica que o carbonato principal é dolomita, devido à baixa efervescência observada.

A análise petrográfica caracterizou textura granoblástica, apresentando cristais variando entre 2 a 4 mm para os carbonatos, apresentando-se mais finos para os demais minerais (Figuras 3.14 e 3.15).

A composição mineralógica é constituída por carbonato (83%), olivina (15%) e piroxênio (2%); e traços de: anfibólio, flogopita, apatita, serpentina e opacos, sendo classificado como um olivina mármore.

Figura 3.14 – Visão geral do mármore. Fotomicrografia de lâmina delgada (Polarizadores descruzados).

Figura 3.15 – Visão geral do mármore. Fotomicrografia de lâmina delgada (Polarizadores cruzados).

Não foi possível relacionar monumentos confeccionados especificamente com este litotipo, embora haja vários exemplos de monumentos em outros tipos de mármore na cidade de São Paulo, tais como, A Menina e o Bezerra de Pierra Chistophe, Amor Materno de Charles Louis Eugène Virion e Anhanguera de Luiz Brizzolara.

3.6 Locais de Coleta e Ocorrência

A coleta das rochas originárias do estado de São Paulo foi efetuada em pedreiras e afloramentos explorados para fins comerciais.

O Granito Itaquera ocorre no bairro de mesmo nome, situado no município de São Paulo. Sua coleta ocorreu na Pedreira Itaquera, que permaneceu em atividade entre os anos de 1923 e 1999, no entanto, na década de 1950 deixa a produção de blocos, paralelepípedos e lajes, para atender à crescente demanda por material britado, seguindo nessa atividade até o encerramento da lavra, sendo posteriormente utilizado para aterro de inertes, assim aterrando a cava completamente até o ano de 2006 (www.pedreiraitaquera.com.br).

A coleta foi possível na parede lateral da antiga pedreira com aproximadamente 10 metros de altura, exposta acima da cota máxima do aterro, onde foram retirados blocos de dimensões variadas (Figura 3.16).

A Pedreira Itaquera está situada muito próxima à estação Corinthians-Itaquera do Metrô e da Arena Corinthians. (Figura 3.17).

O Granito Mauá ocorre entre os municípios de Mauá e Ribeirão Pires, e a amostra foi coletada no município de Ribeirão Pires, no distrito denominado Quarta Divisão, nas proximidades da Estrada de Sapopemba. O afloramento de coleta ocorre na Rua Malvina Tavares, rua não pavimentada que permite acesso à Pedra do Elefante, ponto turístico local. O afloramento em questão vem sendo explorado para a confecção de cantaria, com comercialização na região. O mesmo local havia sido visitado dois anos e meio antes da coleta realizada nesta pesquisa e pode-se ver a evolução de sua exploração nas Figuras 3.18 e 3.19.

A ocorrência do Monzonito Piracaia fica na cidade homônima e a coleta de amostras foi realizada em pedreira ativa, onde foram coletados blocos de tamanhos diversos. A Figura 3.20 mostra corte da extração de rocha ornamental na pedreira.

O Gnaisse Facoidal, proveniente do estado do Rio de Janeiro, teve sua coleta efetuada na cidade do Rio de Janeiro, no Parque do Catalão, reserva situada na Ilha do Fundão, pertencente à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A autorização para coleta de amostras foi concedida à Professora Kátia Mansur da UFRJ, com obtenção de três blocos,

dois de grandes dimensões para pesquisas na UFRJ e um menor com dimensões de aproximadamente 60x40x30 cm destinado a esta pesquisa (Figura 3.21). Os blocos foram coletados à beira da Baía de Guanabara, tratando-se de material componente do aterro do Parque do Catalão (vale destacar que a rocha aflorante neste parque é um metagranitoide, com texturas equigranular e porfíritica, conforme descrito por Ramos *et al.*, 2016). O Gnaiss Facoidal tem sua ocorrência abundante na cidade do Rio de Janeiro, e atualmente não existem atividades extrativas, no entanto, frentes de lavra de antigas pedreiras são de fácil visualização (Figura 3.22).

O mármore usado na pesquisa foi doado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Trata-se de uma amostra de contraprova enviado para análise, e a identificação de sua procedência foi fornecida pelo IPT. Este mármore ocorre no subdistrito denominado Itaoca, no município de Cachoeiro do Itapemirim, estado do Espírito Santo (Figura 3.23).

Figura 3.6 - Parede exposta da Pedreira Itaquera após o aterramento.

Figura 3.7 – Localização da Pedreira Itaquera (A); Arena Corinthians (B); Metrô Corinthians-Itaquera (C). A seta indica o local da bancada onde foi feita a coleta de amostras. Fonte: Google Maps.

Figura 3.9 - Afloramento do Granito Mauá em Ribeirão Pires em Julho de 2011.

Figura 3.8 - Afloramento do Granito Mauá em Ribeirão Pires em Janeiro de 2014.

Figura 3.10 - Alunos em atividade de campo em corte oriundo da extração de rocha ornamental da pedreira do Monzonito Preto Piracaia (Foto: Valdecir de Assis Janasi).

Figura 3.11 - Local de coleta do Gnaiss Facoidal no Parque do Catalão, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro.

Figura 3.12 - Vista em segundo plano de corte da antiga Pedreira da Glória vista do Mirante de Santa Teresa.

Figura 3.13 - Imagem de satélite mostrando as diversas cavas para extração de rocha ornamental da região de Itaoca, Cachoeiro do Itapemirim, ES. Fonte: Google Maps.

4 Métodos

Neste capítulo estão descritas as metodologias adotadas para a preparação de amostras, a execução de ensaios de intemperismo artificial, e os ensaios de caracterização e controle, estes últimos utilizados para determinar as alterações decorrentes do intemperismo artificial.

Os ensaios de intemperismo artificial efetuados foram: exposição à névoa salina; resistência ao envelhecimento por ação de dióxido de enxofre; alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalina; e resistência ao envelhecimento por choque térmico.

Os ensaios de controle executados foram as determinações de: densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água, grupo de ensaios popularmente conhecido como *índices físicos*; absorção de água por capilaridade; absorção de água por tubo de Karsten; velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; resistência superficial de rochas pelo método do martelo de rebote (esclerometria); alteração de cor por espectrofotometria; resistência ao carregamento pontual e descrição petrográfica de lâminas delgadas.

4.1 Preparação das Amostras

A definição do tipo de corpo de prova e suas dimensões buscou obedecer aos requisitos de norma ou recomendações de manuais técnicos de alguns equipamentos, e considerando também que diversos ensaios seriam executados em um mesmo corpo de prova.

A dimensão cúbica de 7 cm dos corpos de prova foi definida com base no requisito de ensaio de índices físicos da norma ABNT NBR 15845:2015 – Parte 2, que especifica que os corpos tenham arestas entre 5 e 7 cm. Também contribuiu para a escolha desta dimensão as recomendações do aparelho de ultrassom V-Meter III da James Instruments Inc., que recomenda que as leituras com o equipamento sejam efetuadas em corpos com espessura superiores a 5 cm. Esta dimensão também favorece a execução do teste de absorção de água por tubo de Karsten, pois sua acoplagem é mais segura e eficiente em uma superfície que acomode a base do tubo, com no mínimo alguns milímetros da borda do corpo de prova.

A forma cúbica poderia ser substituída por cilíndrica de acordo com a ABNT 15845:2015, porém não seria adequada para a aquisição da velocidade de propagação de

onda ultrassônica em duas direções, paralela e perpendicular ao bandamento da rocha. Assim, as amostras foram confeccionadas com o formato de cubo.

Embasado nesses requisitos o processo de coleta buscou adquirir blocos com dimensões volumétricas onde fosse possível confeccionar corpos de prova cúbicos com dimensões de 7 cm de aresta em quantidade suficiente para execução dos ensaios previstos.

Foram confeccionados treze corpos de prova de cada litotipo para efetuar os ensaios de controle divididos entre os ensaios de intemperismo artificial da seguinte forma: um corpo de prova para o ensaio de esclerometria, dois corpos destinados ao ensaio de envelhecimento por choque térmico, três corpos para o ensaio de exposição à névoa salina; três para o ensaio de envelhecimento por ação de dióxido de enxofre e quatro destinados ao ensaio de alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Também foi necessário o preparo de 20 fragmentos de cada litotipo com dimensões de aproximadamente 2x2,5x3,0 cm para execução do ensaio de resistência ao carregamento pontual (*point load test*), excetuando o Gnaisse Facoidal, do qual foram confeccionados apenas 14 fragmentos, devido à quantidade de amostra disponível (Figura 4.1).

Os cortes dos cubos foram efetuados na Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e no IPT, utilizando-se serra circular com controle de altura por pedal (Figura 4.2), onde posiciona-se a amostra em mesa móvel. O mesmo tipo de equipamento foi utilizado nos dois locais, sendo que, após o corte, os corpos foram desbastados em retífica plana da ABCP para assegurar o paralelismo entre as faces e ajustar as dimensões com maior precisão (Figura 4.3).

Figura 4.1 - Descrição da quantidade de corpos de prova preparados por tipo de rocha para execução dos ensaios.

Figura 4.2 – Serra circular utilizada para corte de amostras da ABCP – Associação brasileira de Cimento Portland.

Figura 4.3 - Retífica plana usada na preparação dos corpos de prova na ABCP.

4.2 Ensaios de Intemperismo Artificial

4.2.1 Exposição à Névoa Salina

O ensaio de exposição à névoa salina foi realizado no Laboratório de Experimentos em Mecânica e Tecnologia de Rochas (LEMETRO) do Instituto de Geociências da UFRJ. A

exposição seguiu as recomendações da norma norte-americana ASTM B 117:2011 *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*.

De acordo com o procedimento da norma, a configuração básica exigida para o equipamento de névoa salina requer: uma câmara para disposição de corpos de prova, reservatório para a solução salina, fornecimento de ar comprimido adequadamente condicionado, um ou mais bocais de atomização, suportes para amostras, provisões para aquecimento e meios para os controles necessários.

A câmara disponível no LEMETRO é fabricada e fornecida pela Equilam, empresa especializada em equipamentos de laboratório, atendendo os requisitos especificados pela norma (Figura 4.4).

O procedimento de ensaio solicita que um número representativo de corpos de prova seja disposto dentro da câmara, sem que estes tenham contato um com os outros, e que tenham o mínimo contato possível com o escoramento ou base.

O ensaio consiste no posicionamento dos corpos de prova no interior da câmara em suportes que possibilitem que estes permaneçam com inclinação entre 15 e 30° em relação à posição vertical. Após o início do ensaio, a câmara deve atingir em seu interior uma temperatura de $35 \pm 2^\circ\text{C}$ e a névoa deve ser mantida entre 46 e 49°C, com uma pressão na saída do saturador de ar entre 83 e 124 kPa, e a câmara tem de apresentar uma umidade relativa de 95 a 98%. A névoa deve apresentar uma vazão que garanta uma quantidade de 1,0 a 2,0 ml/h para uma área de 80 cm² em um período médio de 16 horas.

Durante a execução do ensaio, o tempo de exposição dos corpos de prova à névoa pode variar: Lima (2006) trabalhou com ciclos de 360 h, 720 h e 1080 horas; e Frascá (2003) expôs as amostras a 1056 horas. O aparelho permite a execução de ensaios cíclicos ou contínuos, e a forma de execução varia de acordo com os objetivos de acordo com a ASTM B 117. No teste de exposição contínua, os corpos de prova são submetidos continuamente à ação da névoa salina, enquanto o cíclico conta com exposição intermitente, que pode compreender em ciclos diários intercalados entre horas de exposição à névoa e horas de secagem com a câmara aberta.

A preparação da solução de acordo com a norma ASTM B 117 deve ser na proporção de 95 partes de água destilada para 5 partes de NaCl.

Considerando o volume da água destilada em 1 g/cm³, a solução pode ser preparada pela pesagem do NaCl e a adição do volume desejado de água destilada.

Procedimento de ensaio realizado

Dentre os 12 corpos de prova preparados para serem submetidos aos ensaios de intemperismo artificial, foram designados para o ensaio de névoa salina três corpos de cada litotipo, numerados de 1 a 3.

Figura 4.4 - Câmara climática de exposição à névoa salina (LEMETRO - UFRJ).

A primeira etapa do procedimento foi a preparação da câmara para o início da exposição à névoa salina. Foram adaptados os suportes da câmara para a disposição dos quinze cubos e os 47 fragmentos prismáticos para o ensaio de carregamento pontual.

A solução foi preparada utilizando um balão volumétrico de 6 litros. Para a esse volume a quantidade de NaCl foi de 316 g.

Utilizando um becker, o sal foi dissolvido, adicionando-se entre 1 e 1,5 litros de água destilada para a dissolução do sal, sendo posteriormente transferido para o balão volumétrico após dissolução total.

Completado o volume de 6 litros do balão com água destilada, o produto deve ser uma solução homogênea com pH entre 6,5 e 7,2, pH este que foi determinado com auxílio de pHmetro eletrônico em todos os preparos de solução que se fizeram necessários.

Optou-se pela exposição à névoa salina pelo procedimento cíclico, submetendo os corpos a 30 ciclos, onde um ciclo completo corresponde a 24 horas, divididos entre 6 horas de exposição à névoa salina e 18 horas de secagem, onde a câmara é desligada, deixando-se a tampa aberta em condições ambientais de temperatura e umidade. Sendo assim, totalizaram-se 30 dias de ensaio com exposição total à névoa salina de 180 horas.

4.2.2 Resistência ao Envelhecimento por ação de SO₂

O procedimento de exposição ao ensaio de resistência ao envelhecimento por ação de SO₂ foi realizado no CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, localizado na cidade do Rio de Janeiro, em câmara climatizada desenvolvida para exposição ao dióxido de enxofre (Figura 4.5).

A metodologia de execução do ensaio foi realizada seguindo procedimento interno baseado na norma ABNT NBR 8096:1983 - Material metálico revestido e não-revestido – Corrosão por exposição ao dióxido de enxofre.

Nessa exposição, as amostras são submetidas a uma sequência de ciclos pré-estabelecidos, com duração de 24 horas cada um, onde a exposição é feita com SO₂, em períodos de 8 horas. A temperatura da câmara é mantida a 40^o±3^oC, com umidade relativa de 100%, sendo que o SO₂ deve estar concentrado em 0,67% na água do equipamento. Nos intervalos entre um ciclo e outro, o que compreende 16 horas, a câmara deve permanecer desligada e aberta para ventilação.

Procedimento de ensaio realizado

Os corpos de prova para este ensaio foram numerados de 4 a 6. Estes foram posicionados suspensos no interior da câmara, sem contato entre si e distantes das paredes da câmara (Figura 4.6)

Finalizados os 30 ciclos de SO₂, os corpos de prova foram retirados e transportados para a realização dos ensaios de caracterização e controle no Laboratório de Estudos do Patrimônio Cultural do Instituto de Geociências da USP.

Figura 4.5 - Câmara climática de exposição ao SO₂ do CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. (Rio de Janeiro).

Figura 4.6 - Disposição dos corpos de prova no interior da câmara de SO₂.

4.2.3 Alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalina

O ensaio de alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalina consiste em submeter corpos de prova dos litotipos escolhidos em contato com soluções que representem substâncias nocivas presentes nos ambientes urbanos. As soluções ácidas e alcalina às quais foram parcialmente imersas as rochas deste estudo são ácido sulfúrico (H₂SO₄), ácido nítrico (HNO₃), ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH).

As duas últimas soluções dizem respeito a soluções comumente componentes de materiais empregados para limpeza de superfícies impregnadas com gorduras e materiais aderentes, não excluindo sua aplicação em revestimentos e monumentos em rocha. São reagentes com ação efetiva na remoção de tintas, sendo estas presentes nas rochas devido a atos de vandalismo.

O ensaio tem duração de 30 dias contínuos, onde se acompanha a evolução dos corpos de prova. Além da alteração gerada pelo contato com a solução, a região não imersa comumente apresenta sais por eflorescência na superfície. A composição destes sais foi determinada por difração de raios X.

De acordo com Frascá (2003), o ensaio consiste em imergir três corpos de prova até a profundidade de um centímetro com determinada solução. Com a absorção capilar ocorrem reações nas superfícies emersas. Acompanhando sua evolução, o mecanismo consiste na migração da solução, da zona de imersão para a zona capilar (Figura 4.7), na qual, por evaporação e supersaturação, ocorre a cristalização dos sais.

Figura 4.7 - Ilustração esquemática das zonas de imersão e capilar. Adaptado de Frascá (2003).

Procedimento de ensaio realizado

O ensaio foi realizado no Laboratório de Estudos do Patrimônio Cultural do Instituto de Geociências da USP. Para cada uma das rochas estudadas, foi submetido um corpo de prova para cada solução de alteração definida.

As soluções foram preparadas no Laboratório de Química do mesmo instituto em capela, utilizando os Equipamentos de Proteção Individual (E.P.I.) requeridos para a

manipulação de tais reagentes. Os E.P.I. utilizados foram luvas, óculos e avental de manga longa, não sendo necessária a utilização de máscara em função da preparação ocorrer em capela com exaustão forçada e a manipulação ser em pequenos volumes.

O preparo das soluções de ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO_3), foi realizado por meio da mistura em volume de 1% dos ácidos em concentração máxima (P.A.) em água destilada. Foram adicionados 20 ml de ácido em cerca de um litro água destilada em becker de vidro, misturando-se a solução com bastão de vidro por aproximadamente dois minutos para garantir uma mistura adequada. Posteriormente essa solução foi transferida para um frasco balão volumétrico de 2 litros sendo adicionada água destilada até o volume total. A aferição do pH da solução foi realizada utilizando papel indicador, onde a acidez foi controlada entre 0 e 1.

A solução de hidróxido de sódio (NaOH), a única básica entre os reagentes adotados, foi realizada em massa, considerando que o NaOH necessitou ser dissolvido, uma vez que é fornecido em lentilhas. Sendo assim a relação também foi de 1% de reagente para 99% de água destilada. Foi realizada a pesagem da água em becker de vinil determinando uma massa de 1980 g.

Em aproximadamente 500 ml dessa massa foram adicionados 20 g de NaOH e agitados com auxílio de bastão de vinil até dissolução total das lentilhas do reagente, sendo completado o volume de água e agitado novamente. Da mesma forma que para os demais reagentes, a alcalinidade foi determinada com o auxílio de papel indicador, sendo o pH aferido entre 13 e 14.

Foram utilizados recipientes de vidro para os reagentes ácidos, e recipientes plásticos para o hidróxido de sódio, uma vez que os ácidos utilizados não causam reações no vidro, mas que pode ocorrer em contato com o hidróxido de sódio. Desta forma, foi utilizado para este reagente o uso de recipientes plásticos.

Diferentemente do realizado por Frascá (2003) e Becerra (2009), que colocaram os corpos de prova a uma profundidade de 1 cm e 0,5 cm respectivamente, no presente estudo as amostras foram imersas até à metade, ou seja, aproximadamente 3,5 cm. Essa alteração no ensaio foi realizada para que fosse possível distinguir as ações das soluções tanto em regiões imersas, como emersas.

Os corpos de prova submetidos a este ensaio foram identificados com os números 7 a 10, respectivamente para as soluções de H_2SO_4 , HCl , HNO_3 e NaOH .

As amostras foram posicionadas de forma a não fazerem contato com o fundo e paredes dos recipientes, sendo apoiadas apenas pelos vértices basais em recipientes de base ovalada, assim disponibilizando a maior área de contato possível com a solução. A face na

qual foram adquiridos os valores de espectrofotometria foi a basal, ou seja, a única face totalmente imersa na solução.

Após imersão parcial dos corpos de prova, os recipientes foram fechados com filme de PVC no intuito de evitar odores no laboratório, porém após 9 dias de ensaio essa prática foi descartada devido ao aumento da umidade no interior dos recipientes, impedindo assim uma dinâmica de evaporação nos corpos.

O ensaio teve duração total de 30 dias, com acompanhamento fotográfico das reações ocorridas com os corpos de prova, sem retirar os mesmos da imersão (Quadro 4.1 e Figura 4.8). O laboratório onde o ensaio foi executado não possui climatização controlada, sendo assim as amostras estiveram sujeitas a variações de temperatura e umidade de acordo com as mudanças climáticas e a relação das mesmas com o local de ensaio.

4.2.4 Resistência ao Envelhecimento por Choque Térmico

O ensaio da resistência ao envelhecimento por choque térmico é prescrito pela norma britânica BS EN 14066:2013 – *Natural stone test methods - Determination of resistance to ageing by thermal shock*. Consiste em efetuar ciclos de aquecimentos e resfriamentos bruscos, gerando rápidas mudanças de temperatura sobre os corpos de prova, estimulando assim a expansão e a contração do material.

Frasca (2003) aponta que dilatação e contração, é uma das principais causas de desagregação de rochas de revestimento estimuladas por condicionantes físicos.

O procedimento de ensaio de acordo com a BS EN 14066:2013 consiste em submeter amostras de rochas à secagem em temperatura de $40 \pm 5^\circ\text{C}$ por uma semana, e resfriados a uma temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ antes do início dos ciclos. Os ciclos de choque térmico são realizados inserindo os corpos de prova em estufa com temperatura controlada a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ por um período de $18 \pm 1\text{h}$, em seguida sendo imersos por $6 \pm 0,5\text{h}$ em água com temperatura inicial de $20 \pm 5^\circ\text{C}$. Após totalizados 20 ciclos, os corpos devem passar por secagem a uma temperatura de $70 \pm 5^\circ\text{C}$ até estabilidade de massa.

Quadro 4.1 - Disposição dos corpos de prova imersos parcialmente em soluções ácidas.

Litotipos	Disposição das amostras	Imagem
Gnaiss Facoidal	<p>Acima: imersão em solução de H_2SO_4;</p> <p>Centro: imersão em solução de HCl;</p> <p>Abaixo: imersão em HNO_3.</p>
Monzonito Piracaia	<p>Acima: imersão em solução de H_2SO_4;</p> <p>Centro: imersão em solução de HCl;</p> <p>Abaixo: imersão em HNO_3.</p>
Granito Mauá	<p>Acima: imersão em solução de H_2SO_4;</p> <p>Centro: imersão em solução de HCl;</p> <p>Abaixo: imersão em HNO_3.</p>
Granito Itaquera	<p>Acima: imersão em solução de H_2SO_4;</p> <p>Centro: imersão em solução de HCl;</p> <p>Abaixo: imersão em HNO_3.</p>
Mármore	<p>Acima: imersão em solução de H_2SO_4;</p> <p>Centro: imersão em solução de HCl;</p> <p>Abaixo: imersão em HNO_3.</p>

Figura 4.8 - Disposição dos corpos de prova em recipientes plásticos imersos parcialmente em solução de NaOH. [Esquerda] Alto: Granito Itaquera; abaixo: mármore. [Direita] Alto: Gnaiss Facoidal; centro: Monzonito Piracaia; abaixo: Granito Mauá.

Procedimento de ensaio realizado

Os corpos de prova para este ensaio receberam a numeração 11 e 12.

Algumas modificações foram efetuadas no procedimento realizado em relação à BS EN 14066:2013.

A secagem dos corpos antes do início dos ciclos foi realizada em estufa com temperatura a $70 \pm 5^\circ\text{C}$ e seguindo o mesmo procedimento de norma para o resfriamento.

Os ciclos respeitaram os mesmos tempos de exposição e temperatura da água de imersão. A temperatura da estufa foi alterada, regulada a $200 \pm 5^\circ\text{C}$ com base em Lam dos Santos (2011), buscando-se ação mais agressiva à sugerida pela norma. Devido a problemas técnicos, apenas 12 ciclos foram realizados nessa condição, os outros 8 ciclos foram realizados a $150 \pm 5^\circ\text{C}$.

Finalizados os ciclos, os corpos passaram pelo processo de secagem indicado na norma.

4.3 Ensaios de controle

Os ensaios de caracterização e controle consistem nas avaliações que objetivaram caracterizar as rochas previamente aos ensaios de aceleração intempérica, bem como determinar a alteração ocorrida nas amostras após esses ensaios.

Estes ensaios podem ser divididos em dois grupos. O primeiro aborda os métodos tradicionalmente efetuados para caracterização de rochas ornamentais, tratando-se de métodos aplicáveis unicamente em ambiente laboratorial. Os testes realizados pertencentes a esse grupo são: determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água; determinação da absorção de água por capilaridade e resistência ao carregamento pontual.

O segundo grupo de ensaios aborda os métodos não destrutivos, ensaios que não requerem a coleta de amostras e também não alteram as características dos objetos avaliados, assim podendo ser efetuados tanto em laboratório quanto em obras e edifícios tombados, sem danificá-los. Os métodos não destrutivos realizados aqui foram absorção de água por tubo de Karsten, propagação de ondas ultrassônicas, determinação da resistência superficial pelo método do martelo de rebote (esclerometria) e determinação de cor por espectrofotometria.

Após os ensaios de alteração de caráter químico, foi realizada a dessalinização das amostras.

4.3.1 Dessalinização dos corpos de prova

Após a conclusão dos ensaios de exposição à névoa salina, resistência ao envelhecimento por ação de SO_2 e alteração por imersão parcial em soluções ácidas e alcalinas, foi efetuada a dessalinização das amostras. Nessa etapa foi efetuada a lavagem dos corpos com água destilada aquecida, controlando-se a condutividade elétrica da água para determinar a retirada de todo o sal.

O procedimento consiste em imergir os corpos de prova em becker com água destilada e aquecê-los em estufa a uma temperatura de 60°C por um período de 4 horas.

Com o auxílio de um condutímetro, é determinada a condutividade elétrica da água destilada antes da imersão dos corpos e após as quatro horas de aquecimento. O procedimento é efetuado repetidamente, até que os valores da condutividade elétrica, inicial e final, sejam semelhantes.

Todos os corpos analisados foram submetidos a este procedimento eliminar os sais que estivessem preenchendo os poros e fraturas.

4.3.2 Determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

O procedimento de ensaio é prescrito pela norma brasileira ABNT NBR 15845:2015, Parte 2. Foram executados em dez corpos de prova cúbicos de todos os tipos litológicos com dimensões entre 5 a 7 cm de lado, cada um, submetidos a procedimento a seguir descrito:

- Os corpos de prova foram lavados em água corrente e escovados com escova de cerdas macias.
- Posteriormente passaram por secagem em estufa ventilada a temperatura de $70 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante, o que consiste em diferença inferior a 0,1% da massa entre duas pesagens consecutivas em um período de 24 horas.
- Após a obtenção da constância de massa, as amostras são resfriadas em um dessecador.
- Obtida a constância de massa, são pesados individualmente ao ar, em balança com precisão de 0,01g, onde se obtém a *Massa Seca* (M_{sec}).
- Os corpos foram colocados em um recipiente, com bordas altas o bastante para que se pudessem cobrir os corpos de prova com água, e adicionada água deionizada ou destilada até alcançar 1/3 de sua altura. Após 4 horas foi colocada água até atingir 2/3 da altura dos corpos, e, após mais 4 horas, foi completada a submersão total dos corpos de prova (Figura 4.9). Após este período as amostras foram mantidas por mais 40 horas nessa condição.
- Posteriormente, os corpos de prova foram pesados individualmente, na condição submersa, utilizando-se a aparelhagem adequada para pesagem hidrostática, obtendo-se assim a *Massa Submersa* (M_{sub}).
- Finalmente, os corpos de prova foram retirados da água, suas superfícies enxugadas com pano levemente úmido e os corpos foram pesados ao ar livre, obtendo-se a *Massa Saturada* (M_{sat}). Os resultados do ensaio foram determinados com a resolução das fórmulas a seguir:

- **Densidade aparente**

$$\rho_a = \frac{M_{\text{sec}}}{(M_{\text{sat}} - M_{\text{sub}})} \times 100$$

Onde: ρ_a é a densidade aparente; M_{sec} é a Massa Seca; M_{sub} é a Massa Submersa; e M_{sat} é a Massa Saturada.

- **Porosidade aparente**

$$\eta_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sub}} \times 100$$

Onde: η_a é a porosidade aparente.

- **Absorção de água**

$$\alpha_a = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sec}} \times 100$$

Onde: α_a é a absorção de água.

Figura 4.9 - Corpos de prova totalmente imersos durante o ensaio de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água. Ilustração para o Granito Cinza Mauá.

Procedimento de ensaio realizado

O ensaio foi executado seguindo as prescrições da ABNT NBR 15845:2015, parte 2, as únicas variações foram: o número de corpos de provas, que ao invés de 10 foram utilizados

12 em uma mesma bateria de ensaio, totalizando os corpos a serem utilizados por rocha no estudo; e a balança utilizada não dispunha de precisão de duas casas decimais, sendo assim a pesagem foi obtida com precisão de 0,1g.

4.3.3 Absorção de Água por Capilaridade

Este teste é prescrito pela norma britânica BS EN 1925:1999 *Natural stone test methods – Determination of water absorption coefficient by capillarity*. O ensaio consiste em determinar a absorção de água pela ascensão capilar em intervalos de tempo pré-estabelecidos, determinando assim o coeficiente de capilaridade.

Os equipamentos requisitados para o ensaio são:

- Recipiente coberto, de base plana, com pequenos suportes para as amostras de material não oxidante e não absorvente.
- Dispositivo capaz de manter um nível constante de água no tanque.
- Cronômetro com precisão mínima de 1 s.
- Estufa capaz de manter a temperatura regulada em $70 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Balança com precisão de 0,01 g.
- Paquímetro com precisão mínima de 0,05 mm
- Ambiente com temperatura controlada em $20 \pm 5^\circ\text{C}$

Os corpos de prova devem ser cúbicos com 70 ± 5 mm ou 50 ± 5 mm de aresta, ou podem também ser cilíndricos, com diâmetros com as mesmas especificações das arestas cúbicas.

Procedimento de ensaio realizado

Previamente ao início do ensaio os corpos de prova passaram por secagem em estufa com temperatura de $70 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingir massa constante, o que consiste em diferença inferior a 0,1% da massa entre duas pesagens consecutivas em um período de 24 ± 2 h.

Finalizada esta etapa, os corpos foram resfriados em dessecador no ambiente de laboratório a temperatura de $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Posteriormente, cada amostra foi pesada obtendo o (m_d), e a área da base foi obtida com paquímetro com precisão mínima de 0,1 mm. Essa área deve ser expressa em m^2 .

Em seguida os corpos foram dispostos sobre os apoios dentro do recipiente, de maneira que a base das amostras não sofresse perda de área significativa.

A norma sugere que seja observada a disposição das amostras em relação aos planos de anisotropia das rochas. Optou-se por posicionar os corpos com a foliação perpendicular ao sentido da absorção de água.

No momento de inserção dos corpos sobre os suportes, eles atingiram uma submersão de 5 ± 1 mm, quando iniciou-se a contagem do tempo para efetuar as leituras.

A norma BS EN 1925:1999 solicita que os corpos sejam imersos em uma lâmina de água controlada em 3 ± 1 mm, no entanto adequou-se esse quesito de acordo com a norma ABNT NBR 9779:95 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Essa alteração permitiu que o controle dessa imersão pudesse ser acompanhado com mais eficiência, efetuando leituras no nível de água com auxílio de régua metálica e paquímetro.

O nível de água foi mantido constante, efetuando-se medidas da lâmina de água duas vezes ao dia e adicionando água quando necessário.

Nos intervalos de tempo determinados (t_i), inicialmente curtos e posteriormente longos, as amostras foram retiradas para pesagem, com suas bases enxugadas com pano levemente umedecido, para retirada do excesso de água.

A pesagem (m_i) foi realizada imediatamente após sua retirada do recipiente, voltando depois para sua posição em imersão.

A escolha dos intervalos de pesagem depende do tipo de rocha. Para rochas com absorções elevadas, os tempos sugeridos pela norma europeia são de 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 180, 480 e 1440 minutos. Para rochas de baixa absorção, que é o caso das rochas aqui analisadas, a norma sugere leituras com 30, 60, 180, 480, 1440, 2880 e 4320 minutos.

Optou-se por realizar leituras com 60, 120, 180, 360, 1440, 2880 e 4320 minutos para todas as amostras analisadas.

A absorção de água por capilaridade para cada intervalo de tempo é obtida em gramas por metro quadrado, dividindo-se a massa de água absorvida pela amostra pela área de sua base em metros quadrados. Deve ser expressa graficamente como função da raiz do tempo em segundos.

$$C = \frac{m_i - m_d}{A \cdot \bar{t}_i}$$

Onde:

C é a absorção de água por capilaridade;

m_i é a massa da amostra úmida no intervalo de tempo definido;

m_d é a massa inicial;

t_i é a raiz do tempo em segundos para cada intervalo de leitura;

A é a área da base da corpo.

4.3.4 Índice de resistência ao carregamento pontual

O ensaio segue as orientações da norma norte-americana ASTM D 5731:2008 *Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*.

De acordo com a norma, este método apresenta vantagens no que diz respeito à portabilidade do equipamento, favorecendo seu emprego tanto em laboratório quanto em campo, e é indicado para rochas de resistência média com resistência acima de 15 MPa. Outro fator importante é o de permitir testar amostras de formas diversas, tais como prismas, cilindros, blocos e com formas irregulares com diâmetros de ensaio variando entre 30 e 85 mm. No entanto, são requisitadas proporções mínimas nas dimensões dos corpos de prova para a obtenção de resultados válidos que estão indicadas na Figura 4.10.

O índice de resistência ao carregamento pontual trata-se de um ensaio de fácil preparação de amostras e execução se comparado ao ensaio de resistência uniaxial. No entanto, seu resultado é um índice da resistência e não deve ser considerado em projetos, é uma estimativa para análises comparativas.

Procedimento de ensaio realizado

O ensaio é realizado submetendo uma amostra de rocha a uma carga cada vez mais concentrada até que ocorra a ruptura. A carga concentrada é aplicada com dispositivos cônicos, na base e no topo da amostra. A carga de ruptura é usada para calcular o índice de resistência de carga pontual, podendo ser usado para classificar as rochas quanto à sua

resistência. Um método comum usado é a correlação com a resistência à compressão uniaxial (ASTM D5731:2008)

Este ensaio foi executado no LEMETRO, do Instituto de Geociências da UFRJ. O equipamento utilizado é fabricado pela Martins Campelo Desenvolvimento de Tecnologia e conta com célula de carga acionada por pistões hidráulicos manuais e a aquisição de dados de carga e deslocamento ocorrem por unidade de aquisição digital acoplada à célula de carga e ao LVDT (Figura 4.11).

Figura 4.10 - Representação das possíveis formas de corpos de prova e indicação de requisitos das proporções altura, largura e comprimento para obtenção do diâmetro (D) ou diâmetro equivalente (De) utilizados na determinação do índice de resistência. Fonte: ASTM D5731:2008.

Foram preparados para esta análise 20 corpos de prova com formas prismáticas de aproximadamente 2,2x2,5x3,0 cm, e 14 corpos de prova para o Gnaisse Facoidal.

Os corpos foram divididos em duas baterias de ensaio, uma efetuada para determinar o índice de resistência ao carregamento pontual das amostras inalteradas, e a outra efetuada após exposição dos corpos a 30 ciclos de exposição à névoa salina.

O cálculo do índice de resistência ao carregamento pontual dos corpos é obtido pela fórmula:

$$I_s = P / D_e^2$$

Onde: I_s é índice de resistência ao carregamento pontual em MPa; P é a carga de ruptura; e D_e é o diâmetro do núcleo equivalente determinado pelas proporções indicadas na Figura 4.10.

No entanto, o procedimento requer que seja determinado o índice de resistência $I_{s(50)}$, que refere-se a determinação da resistência para um corpo de prova considerado como ideal, com diâmetro de 50 mm. Para a determinação do $I_{s(50)}$ é aplicada fórmula para determinação do fator de correção do tamanho do corpo:

$$F = (D_e/50)^{0.45}$$

Onde: F é o fator de correção do tamanho.

Finalmente o $I_{s(50)}$ é obtido pela fórmula:

$$I_{s(50)} = F \cdot I_s$$

Figura 4.11 – Equipamento de carregamento pontual do LEMETRO, Instituto de Geociências, UFRJ.

4.3.5 Ensaio de caracterização petrográfica e composicional

Além dos ensaios de caracterização e controle pré-estabelecidos também foram realizados ensaios de caracterização petrográfica e composicional. Esses ensaios tratam-se de:

- Descrição petrográfica de lâminas delgadas efetuadas nas rochas inalteradas e observação de lâminas para detecção de alterações oriundas dos ensaios de intemperismo artificial.
- Difractometria de raios X de sais formados nas superfícies dos corpos durante os ensaios de alteração.

Esses ensaios foram realizados nos Laboratórios de Ótica e Difração de Raios X do Instituto de Geociências da USP.

4.3.6 Absorção de Água por Tubo de Karsten

O ensaio consiste em determinar a absorção de água pelo acoplamento de tubos graduados (tubo de Karsten), efetuando leitura do volume absorvido em intervalo de tempo definido.

Com o ensaio é possível estimar a porosidade do material, bem como detectar a presença de fraturas em regiões específicas do objeto de estudo. A metodologia é baseada na Norma RILEM – II.4 *Water Absortion Tube Test* (RILEM, 2006), tendo sido utilizadas adaptações sugeridas por Rodrigues (2012) referente ao material para acoplagem do tubo às amostras.

O tubo de Karsten consiste em uma coluna vítrea graduada de 0 a 4 mililitros (ml), com divisões de 0,05 ml para realizar a leitura, conhecido também como cachimbo para absorção, em função de sua semelhança com o objeto. Existem dois padrões de tubo de Karsten, um desenvolvido para uso em superfícies horizontais e outro para superfícies verticais (Figura 4.12).

O tubo de Karsten desenvolvido para superfícies verticais consiste em um tubo de vidro cilíndrico com formato em *L*, fator que permite que a base seja ancorada ao objeto de estudo. O tubo para medidas horizontais é uma coluna que é ancorada à base horizontal do objeto de estudo, com as mesmas funções que o tubo em *L*.

A sua acoplagem à base deve garantir a estanqueidade completa do tubo com o objeto de estudo, garantindo que a área da base do tubo seja a única forma de perda da água contida no mesmo sobre a amostra. Diversos materiais são capazes de garantir a estanqueidade do tubo, como por exemplo, silicone, massa de calafetar, massa de modelar, entre outros. No

entanto, quando se trata de estudo do patrimônio, devem ser aplicados materiais de fácil limpeza e que não fiquem impregnados após seu uso.

Rodrigues (2012) avaliou o desempenho de diversos produtos usados para a ancoragem, buscando um material adequado que não impregnasse a superfície das rochas. Os testes foram efetuados com massa acrílica de modelar e massa de calafetar, mas, ambos os materiais comumente utilizados em avaliações de laboratório engorduravam as superfícies das amostras.

O material que mostrou melhor desempenho para a fixação dos tubos de Karsten foi o hidrocoloide irreversível, conhecido também como alginato. O alginato é um composto de sais minerais que contém como principal componente um alginato solúvel, de sódio ou potássio. Trata-se de material desenvolvido para uso odontológico, com o qual se produzem os moldes de arcadas dentárias.

O alginato demonstrou ser um produto de fácil aquisição e não agressivo às obras do patrimônio, não gerando impregnações e garantindo a estanqueidade de água do tubo de Karsten acoplado à amostra.

Procedimento de ensaio realizado

A absorção de água por tubo de Karsten foi efetuada em todos os corpos por um período total de cinco horas. O modelo utilizado foi o horizontal, que foi acoplado às amostras com o auxílio de alginato (Figura 4.13).

Os tubos foram preenchidos com água destilada até o nível marcando o zero e as leituras de absorção de água foram efetuadas nos intervalos de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 45, 60, 120, 180, 240 e 300 minutos.

Figura 4.12 - Tubos de Karsten com suas dimensões. Esquerda: tubo vertical; direita: tubo horizontal. Fonte: (RILEM, 2006).

Figura 4.13 - Ensaio de absorção de água por tubo de Karsten, acoplagem horizontal efetuada com alginato.

4.3.7 Velocidade de Propagação de Ondas Ultrassônicas

O método da determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é uma técnica muito utilizada para a avaliação de obras históricas confeccionadas em rocha por se tratar de um ensaio não destrutivo. Bem difundida no exterior, recentemente no Brasil vem sendo desenvolvidos trabalhos onde a técnica é empregada (Kuzmickas, 2013; Gimenez & Del Lama, 2014; Grossi & Del Lama, 2015; Machado, 2015). É um dos métodos mais utilizados na avaliação do estado de degradação de rochas (Valdeón *et al.*, 1992).

O desenvolvimento e utilização de métodos vibracionais teve início na década de 1930, visando a determinação de propriedades físicas de concreto. Durante a II Guerra Mundial, na Inglaterra e Canadá, estudos impulsionaram o aparecimento de novos aparelhos (Naik *et al.*, 2004), e na década de 1960 aparelhos mais sofisticados são desenvolvidos, fornecendo o tempo de trânsito da onda (Evangelista, 2002; Kuzmickas, 2013).

▪ **Descrição do método**

Ondas ultrassônicas são ondas mecânicas, classificadas dentro do grupo das ondas sonoras, compreendidas no intervalo de 20 a 20.000 kHz. As ondas mecânicas podem ser divididas em dois grupos:

Ondas transversais: são ondas nas quais as partículas do meio perturbado se movem perpendicularmente à direção da propagação.

Ondas longitudinais: são ondas nas quais as partículas do meio realizam deslocamentos paralelos ao sentido da propagação. As ondas sonoras no ar, por exemplo, são longitudinais.

De acordo com Gimenez & Del Lama (2014), a técnica mais utilizada nas avaliações de obras do patrimônio é chamada de técnica da transmissão, que consiste no uso de dois transdutores, um emissor e outro receptor, posicionados em pontos distintos e opostos da amostra. Os transdutores são terminais conversores de ondas mecânicas em elétricas e vice-versa.

Essa técnica é descrita na norma norte-americana ASTM D 2845:2008 *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constant*, que prescreve a metodologia para avaliações em laboratório.

A execução do ensaio de ultrassom por este método requer um equipamento que em conjunto com um par de transdutores, seja capaz de registrar o tempo de percurso das ondas ultrassônicas através do material em análise. A razão da distância entre os transdutores e o tempo de percurso do pulso na amostra fornece a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.

De acordo com Gimenez (2012) a aparelhagem para ensaio consiste em aparelho capaz de emitir um pulso de um terminal emissor, que é acoplado à amostra que se pretende estudar, o pulso por sua vez atravessa o material que constitui a amostra e é recebido em outro terminal receptor após o percurso pela amostra. Este aparelho informa o tempo de trânsito entre o terminal emissor e o terminal receptor, esses terminais recebem o nome de transdutores (Figura 4.14).

Procedimento de ensaio realizado

O ensaio foi realizado no Laboratório de Estudos do Patrimônio Cultural do Instituto de Geociências da USP nos corpos de prova previamente preparados.

Os materiais utilizados foram: paquímetro com precisão de 0,05 mm para determinação das dimensões das amostras; equipamento digital para determinação da velocidade ultrassônica, modelo V-Meter III da James Instruments Inc.; transdutores adequados à realização do ensaio e gel acoplante para análises ultrassônicas, destinado a melhorar o contato do transdutor com a amostra.

Figura 4.14 - Esquema simplificado de aparelho de ultrassom executando ensaio. Fonte: Gimenez (2012).

Todos os corpos cúbicos tiveram determinadas suas velocidades de onda ultrassônica por transmissão direta, com utilização de três pares de transdutores para a aquisição das velocidades: planos de 54 e 150 kHz e exponenciais de 54 kHz.

As leituras foram realizadas em duas direções de análise, uma paralela à orientação dos cristais/bandamento da rocha e a outra perpendicular à essa orientação (Figura 4.15).

O procedimento foi realizado nos corpos prévia e posteriormente à sua exposição aos ensaios de alteração.

Figura 4.15 - Esquema representando a aplicação da transmissão direta com o transdutor emissor (T. E.) e transdutor receptor (T. R.) paralelo à foliação [esquerda] e perpendicular à foliação [direita].

4.3.8 Determinação da resistência superficial pelo método do martelo de rebote

O martelo de rebote, também conhecido como esclerômetro ou martelo de Schmidt, em referência ao seu idealizador, Ernest Schmidt, é um equipamento capaz de adquirir a dureza superficial de materiais, permitindo a determinação da resistência superficial.

O funcionamento do equipamento ocorre pela liberação de uma mola com energia potencial contra um êmbolo quando pressionado contra a superfície do material avaliado. Ocorre então o choque do êmbolo na superfície de análise seguido pelo recolhimento do conjunto à posição inicial (Augusto, 2009).

Os martelos de rebote mais comumente utilizados em avaliações de rochas são os dos tipos L e N, diferenciados pelos valores de energia aplicada, sendo de 0,735 Nm no tipo L e 2,207 Nm no N (Buyuksagis & Goktan, 2007).

O procedimento de ensaio usado foi adaptado, tomando como base as recomendações da norma norte americana ASTM D5873:2005 *Standard Test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method*.

Neste estudo foi utilizado um martelo de rebote do tipo L produzido pela James Instruments Inc. modelo W-D-2000. O equipamento é dotado de display digital e sistema que permite a prévia definição de parâmetros necessários para o cálculo da carga obtida, sendo possível inserir no sistema a posição de utilização do equipamento, forma dos corpos de prova (cilíndricos ou cúbicos), e a unidade para expressão dos resultados, onde optou-se por MPa.

Foi necessário aplicar fator de correção indicado pelo fabricante de acordo com as dimensões dos cubos, que no caso do presente estudo teve valor de 1,35.

Procedimento de ensaio realizado

O ensaio foi realizado no Laboratório de Estudos do Patrimônio Cultural do Instituto de Geociências da USP.

Para a realização do ensaio efetuou-se travamento dos corpos de prova cúbicos em uma morsa presa a uma bancada. No contato entre a morsa e os corpos foram colocadas duas placas de E.V.A. (acetato-vinílico de etileno) de espessura de 2 mm.

As avaliações foram efetuadas perpendicularmente à face horizontal dos corpos presos à morsa (Figura 4.16), alternando-se as faces de forma que todas fossem avaliadas.

Figura 4.16 - Corpo de prova preso à morsa com placas de E.V.A. durante ensaio de resistência superficial.

Em cada face dos corpos foram preestabelecidos quatro pontos de leitura, possibilitando realizar o total de 24 leituras por amostra.

A face destinada à confecção de lâmina delgada não foi ensaiada para evitar fraturamento superficial que pudesse gerar interpretações equivocadas quanto a origem de possíveis fraturas, sendo assim em alguns corpos foram efetuadas apenas 20 medições.

4.3.9 Determinação da Alteração de Cor por Espectrofotometria

A determinação da cor foi feita com uso de espectrofotômetro, equipamento capaz de determinar graficamente o espectro de luz refletida pelo objeto analisado, classificando a cor pelos comprimentos de ondas adquiridos no intervalo de luz visível. A cor é alocada por coordenadas e dispostas graficamente no espaço CIELAB (Figura 4.17).

O cálculo da variação de cor (ΔE) é determinado pela fórmula a seguir:

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

Onde: ΔL^* = variação na luminosidade; Δa^* = variação entre as cores verdes e vermelho; Δb^* = variação entre as cores azul e amarelo.

Figura 4.17 - Espaço CIELAB. Fonte: Kuzmickas (2013).

Em termos de percepção de variação cromática do olho humano, a literatura aponta o limite de $\Delta E = 3$. Abaixo disso não é possível detectar modificação da cor a olho nu. Sasse & Snethlage (1997), Cardoso (2004), Miliani *et al.* (2007) e Matteini *et al.* (2011) discutiram os limites de variação da cor quando a rocha é tratada (limpeza, aplicação de consolidantes e hidrofugantes) ou exposta em ambientes urbanos.

O espectrofotômetro é um equipamento portátil, de fácil manuseio e transporte, que registra em memória interna a análise de cor e a posiciona graficamente baseando-se no diagrama CIELAB. Sua utilização em estudos de patrimônio histórico tem grande importância, pois alterações cromáticas fazem parte das alterações ocasionadas pelo intemperismo ou pela manutenção inadequada de uma obra.

A operação do espectrofotômetro é extremamente simples, após ligar o equipamento é feita uma rápida calibração utilizando-se padrões de cor, e em seguida, basta encostar o feixe de luz no objeto a ser analisado e registrar no equipamento a cor (Figura 4.18).

A norma europeia BS EN 15886:2010 *Conservation of cultural property – Test methods – Colour measurement of surfaces* foi utilizada como base para as avaliações realizadas pelo método.

Algumas das orientações seguidas prescritas pela norma são:

- Em materiais não homogêneos, o número de pontos de medição deve ser adaptado ao espécime para obter valores estatisticamente representativos;
- Os objetos avaliados devem ser suficientemente grandes para contemplar a área de medida do instrumento;
- Um mínimo de cinco amostras representativas é considerado adequado. No entanto, se apenas um número limitado estiver disponível, as amostras representativas devem ser usadas;
- A superfície a medir deve, na medida do possível, ser suavizada e plana de modo a excluir a luz externa da área de medida;
- As medidas de cor antes e depois do tratamento, e qualquer medida subsequente, devem ser realizadas sob as mesmas condições ambientais.

O método, portanto, favorece o acompanhamento prévio e posterior a tratamentos efetuados nas rochas, sendo possível acompanhar a evolução da cor de uma dada superfície no tempo.

Método de ensaio realizado

Na avaliação inicial das rochas por espectrofotometria, os corpos de prova tiveram uma face dos doze cubos medida, sendo esta efetuada em três pontos nos granitos Itaquera e Cinza Mauá, no Monzonito Piracaia e no mármore. No Gnaisse Facoidal foram determinados seis pontos de leitura por apresentar maior variação de cor (Figura 4.19).

As leituras foram registradas em todos os litotipos e as faces avaliadas foram imageadas com uso de *scanner* para registro do estado das amostras previamente aos ensaios de alteração.

Cada ponto lido forneceu coordenadas que foram posicionadas no espaço de cor $L^*a^*b^*$, sendo possível determinar para cada eixo sua variabilidade para os 12 corpos de prova pela determinação da média e os valores máximos e mínimos adquiridos em uma mesma face.

Figura 4.18 - Ensaio com espectrofotômetro no monumento Nostalgia de Francisco Leopoldo e Silva. (Foto: Lauro K. Dehira).

Figura 4.19 - Padrões de pontos de leitura com espectrofotômetro. Padrão de seis pontos usado no Gnaiss Facoidal (esquerda); Padrão de 3 pontos usado nos demais litotipos (direita).

5 Apresentação dos resultados

Este capítulo apresenta os resultados do comportamento das rochas aos ensaios de alteração acelerada, nos ensaios de exposição à névoa salina, câmara saturada de SO_2 , imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, e choque térmico.

São apresentadas as alterações constatadas durante os ensaios e posteriormente os resultados subdivididos pelos ensaios de caracterização e controle, realizados antes e após à exposição aos ensaios de alteração dispostos na seguinte ordem: análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico; densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água; absorção de água por capilaridade; índice de resistência por carregamento pontual, realizado somente na exposição à névoa salina; absorção de água por tubo de Karsten; velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; resistência superficial por esclerometria; e determinação de cor por espectrofotometria.

5.1 Granito Itaquera

5.1.1 Alterações constatadas durante os ensaios

Ao longo do ensaio de névoa salina foi constatada a presença de uma fratura preexistente no corpo de prova 2.

Após a exposição à névoa salina, foi notado o acúmulo de sal e fragmentos de biotita nas arestas inferiores dos corpos observados em lupa. As arestas que apresentaram acúmulo de sal não faziam contato com a base, o acúmulo de sal ocorreu por escoamento da solução na superfície das amostras (Figura 5.1).

Os corpos submetidos ao SO_2 não apresentaram alterações detectáveis visualmente após os ciclos de exposição.

No ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina ocorreu a formação superficial de eflorescências nos corpos em contato com o ácido sulfúrico e hidróxido de sódio (Figuras 5.2).

Os materiais das eflorescências foram coletados e submetidos à análise de difratometria de raios X para determinação composicional.

A reação do ácido sulfúrico com o Granito Itaquera gerou halotriquita ($\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) conforme difratograma da Figura 5.3.

A halotriquita é um sulfato de alumínio e ferro hidratado. A disponibilidade química de enxofre, hidrogênio e oxigênio teve origem provável na solução ácida, enquanto o ferro e alumínio são oriundos de cristais de biotita e plagioclásio carregados por lixiviação para a superfície do corpo de prova.

Figura 5.1 - Acúmulo de NaCl e biotita em aresta da amostra do Granito Itaquera exposta à névoa salina.

Figura 5.2 - Formação superficial de eflorescências nas amostras do Granito Itaquera exposto ao ácido sulfúrico (esquerda) e hidróxido de sódio (direita).

A formação de gipsita ocorre pela provável reação entre a solução ácida e os cristais de plagioclásio, gerada pela lixiviação durante a capilaridade da solução no corpo.

A reação com o hidróxido de sódio gerou eflorescências de carbonatos. A Figura 5.4 mostra, principalmente, formação de thermonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e pequenas quantidades de gipsita e albita, sendo este mineral componente da rocha. A formação dos sais de sódio ocorre pela reação da solução alcalina com o CO_2 atmosférico, depositando-se na superfície da amostra no processo de evaporação da solução absorvida pela amostra.

Figura 5.3 - Difratoograma das eflorescências formadas no Granito Itaquera durante imersão parcial em ácido sulfúrico.

Figura 5.4 - Difratoograma das eflorescências formadas no Granito Itaquera durante imersão parcial em hidróxido de sódio.

No ensaio de choque térmico não foram visualizadas alterações nos corpos de Granito Itaquera.

5.1.2 Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico

Entre as lâminas do Granito Itaquera preparadas para observação ao microscópio petrográfico das alterações ocorridas durante os ensaios de alteração, apenas a referente ao ensaio de choque térmico apresentou alterações visivelmente atribuídas ao procedimento.

Nas demais lâminas não foram observadas alterações decorrentes dos ataques, uma vez que estas foram comparadas a lâminas de rocha não alterada.

Observou-se na análise petrográfica da amostra submetida ao choque térmico o fraturamento de cristais de quartzo, ocorrendo principalmente no contato com outros minerais (Figuras 5.5 e 5.6).

Figura 5.5 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do Granito Itaquerá (polarizadores descruzados).

Figura 5.6 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do Granito Itaquerá (polarizadores cruzados). Ocorrência de fraturas nos cristais de quartzo.

5.1.3 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

As Tabelas 5.1 a 5.4 apresentam os resultados obtidos prévia e posteriormente aos ensaios de alteração na determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água do Granito Itaquera.

A análise da Tabela 5.1 diz respeito aos corpos submetidos à névoa salina. Observando-se os valores médios e coeficientes de variação da densidade, porosidade e absorção de água, nota-se que os resultados iniciais e finais são muito próximos e praticamente idênticos.

Efetuada uma análise individual das amostras, vemos que a variação da densidade é quase zero entre os corpos. Quanto à porosidade, nota-se que o corpo de prova 1 tem aumento da porosidade de 12%, tomando como base o valor inicial, enquanto as outras amostras, 2 e 3, apresentam reação oposta com diminuição de 4 e 5% em relação à porosidade inicial. Consequentemente os resultados de absorção de água também seguem o mesmo padrão de comportamento, confirmando o exposto na porosidade.

Tabela 5.1 - Resultados comparativos obtidos nos ensaios de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Itaquera antes e após exposição à névoa salina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	CP 01	2646	2645	0,47	0,52	0,18	0,20
	CP 02*	2629	2632	0,66	0,63	0,25	0,24
	CP 03	2640	2642	0,54	0,51	0,20	0,19
Máximo		2646	2645	0,66	0,63	0,25	0,24
Mínimo		2629	2632	0,47	0,51	0,18	0,19
Média		2639	2639	0,55	0,56	0,21	0,21
Coeficiente de Variação		0,003	0,003	0,18	0,12	0,18	0,12

*O corpo de prova 2 apresentou fratura não identificada visualmente antes do início dos ensaios.

A provável causa de tal divergência no comportamento dos corpos 2 e 3 é a obstrução dos poros por cristais de halita formados durante os ciclos de névoa salina. Mesmo passando pelo processo de dessalinização, a halita permaneceu presente nos interstícios da rocha, fator que reduz a porosidade e absorção de água da rocha.

O corpo de prova 2 revelou a presença de uma fratura preexistente durante os ensaios, fator que não gerou alteração nos resultados.

As amostras do Granito Itaquera expostas à atmosfera saturada por SO₂ (Tabela 5.2), demonstram nos valores médios variação superior à ocorrida nos ensaios de névoa salina.

A média da densidade após alteração aumentou. Esse fator ocorre devido à variação de densidade muito elevada do corpo 4, que teve um aumento de 14% enquanto o corpo 5 apresentou queda de 2% e o 6 apresentou queda de 1%.

Os valores da porosidade e da absorção de água em todos os corpos diminuíram, sendo o corpo 5 o mais afetado, apresentando redução de 20% na porosidade e 19% na absorção de água. A causa da queda de porosidade e absorção de água é atribuída ao preenchimento de vazios por minerais formados durante a exposição em câmara climática.

Tabela 5.2 - Resultados comparativos obtidos nos ensaios de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Itaquera antes e após exposição à atmosfera saturada de SO₂.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	CP 04	2312	2628	0,58	0,56	0,25	0,21
	CP 05	2642	2599	0,57	0,45	0,22	0,17
	CP 06	2621	2640	0,53	0,49	0,20	0,18
Máximo		2642	2640	0,58	0,56	0,25	0,21
Mínimo		2312	2599	0,53	0,45	0,20	0,17
Média		2525	2622	0,56	0,50	0,22	0,19
Coeficiente de Variação		0,073	0,008	0,04	0,11	0,11	0,10

Os corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina tiveram diminuições leves da densidade (Tabela 5.3), excetuando-se o corpo 10 exposto à hidróxido de sódio, que mostrou aumento da densidade em 9%.

Todos os corpos apresentaram diminuição da porosidade e absorção de água, sendo mais expressiva a alteração naqueles ensaiados nos ácidos sulfúrico e clorídrico.

A amostra 8, teve redução da porosidade e absorção de água em aproximadamente 29%, sendo a mais alterada. O corpo 7 teve reduções das mesmas características na ordem

de 13%. As amostras 9 e 10 tiveram redução da porosidade de 5 e 2% e absorção de água de 5 e 10%, respectivamente.

No ensaio de choque térmico, os valores de densidade aumentaram em ambos os corpos. A média da porosidade alterou-se de 0,49% para 0,71%, com variação de 45%, assim como a média da absorção de água que partiu de 0,22% para 0,27%, variando 23% (Tabela 5.4).

Tabela 5.3 - Resultados comparativos obtidos nos ensaios de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Itaquera antes e após ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
H₂SO₄	CP 07	2639	2636	0,61	0,53	0,23	0,20
HCl	CP 08	2639	2638	0,62	0,44	0,24	0,17
HNO₃	CP 09	2643	2639	0,49	0,47	0,19	0,18
NaOH	CP 10	2406	2630	0,48	0,47	0,20	0,18

Tabela 5.4 - Resultados comparativos obtidos nos ensaios de densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Itaquera antes e após ensaio de choque térmico.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	CP 11	2275	2627	0,51	0,75	0,23	0,29
	CP 12	2266	2635	0,47	0,67	0,21	0,26
Média		2271	2631	0,49	0,71	0,22	0,27
Coefficiente de Variação		0,003	0,002	0,07	0,08	0,06	0,08

5.1.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade das amostras expostas à névoa salina apresentou resultados com comportamentos distintos após 72 horas de ensaio (Tabela 5.5).

O corpo de prova 1 apresentou diminuição da absorção de água em 6% enquanto o 2 apresentou aumento de 21% e o 3 não se alterou significativamente. A maior discrepância ocorrida ocorreu no corpo 2, atribuída à fratura presente no corpo, fator que pode ter colaborado para a ascensão capilar da água.

A Figura 5.7 apresenta o gráfico da absorção de água por capilaridade onde é possível observar o comportamento da absorção de água ao longo do tempo de ensaio.

No gráfico é notório que as curvas dos corpos de prova 1 e 3 apresentam comportamento semelhante antes e após ensaio de alteração. Observam-se pequenas variações na absorção de água, atingindo valores muito próximos após 72 horas de ensaio.

As curvas referentes à amostra 2 mostram uma variação superior à ocorrida nos demais corpos, por causa da fratura, demonstrando absorção de água mais expressiva, na avaliação final, após seis horas de ensaio.

Tabela 5.5 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após exposição à névoa salina para o Granito Itaquera.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	360 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 01 - Antes	58,5	78,0	97,5	136,5	234,1	273,1	312,1
CP 01 - Depois	38,6	96,5	96,5	115,7	231,5	270,1	289,4
CP 02 - Antes	75,9	113,8	151,8	170,8	284,6	322,5	360,5
CP 02 - Depois	75,5	94,3	132,1	188,7	358,5	377,4	434,0
CP 03 - Antes	75,0	112,4	131,2	149,9	224,9	262,4	281,1
CP 03 - Depois	37,2	55,8	74,3	148,7	204,5	241,6	278,8

Os corpos expostos à câmara de SO₂ apresentaram mesmo padrão de comportamento entre as avaliações iniciais e finais, demonstrando aumento da absorção de água por capilaridade entre 11 e 23% (Tabela 5.6).

O gráfico da Figura 5.8 mostra o comportamento da absorção de água por capilaridade. Destaca-se o corpo 4, que apresenta maior absorção de água tanto na avaliação inicial como final, embora apresente a menor variação dentre os corpos.

Figura 5.7 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Granito Itaquera antes e após exposição à névoa salina.

Tabela 5.6 - Valores da absorção de água em g/m^2 obtidos antes e após exposição à câmara de SO_2 para o Granito Itaquera.

Corpo	Absorção de Água (g/m^2)						
	60 min.	120 min.	180 min.	360 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 04 - Antes	115,7	154,3	173,6	212,2	308,6	347,2	366,5
CP 04 - Depois	115,7	154,3	192,9	289,4	366,5	385,8	405,1
CP 05 - Antes	56,6	75,5	94,3	132,1	169,8	207,6	245,3
CP 05 - Depois	56,6	75,5	75,5	113,2	207,6	283,0	301,9
CP 06 - Antes	74,3	74,3	92,9	111,5	185,9	223,0	260,2
CP 06 - Depois	55,8	74,3	74,3	92,9	204,5	260,2	297,4

Os corpos de prova 7, 8, 9 e 10 imersos parcialmente em soluções de ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico e hidróxido de sódio, respectivamente, apresentaram em todos os casos redução na absorção de água por capilaridade após 72 horas de ensaio (Tabela 5.7).

A maior alteração ocorreu com o corpo 7, 19%, seguido pelo 9, 13%. As amostras 8 e 10 ambas variaram 7%.

A análise gráfica mostra um comportamento muito similar entre a avaliação inicial e final dos corpos de prova, permitindo a visualização da redução da taxa de absorção de água das amostras a partir da segunda hora de ensaio (Figura 5.9).

Figura 5.8 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Granito Itaquera antes e após exposição à câmara saturada de SO_2 .

Tabela 5.7 - Valores da absorção de água em g/m^2 obtidos antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para o Granito Itaquera.

Corpo	Absorção de Água (g/m^2)						
	60 min.	120 min.	180 min.	360 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 07 - Antes	75,5	94,3	113,2	169,8	226,4	264,2	301,9
CP 07 - Depois	56,6	113,2	113,2	132,1	226,4	226,4	245,3
CP 08 - Antes	56,8	75,8	94,7	113,7	208,4	246,3	265,3
CP 08 - Depois	37,9	75,8	75,8	94,7	189,5	227,4	246,3
CP 09 - Antes	74,8	93,4	112,1	130,8	224,3	261,7	280,3
CP 09 - Depois	56,1	74,8	93,4	112,1	186,9	224,3	243,0
CP 10 - Antes	57,1	95,1	114,2	133,2	228,3	266,4	285,4
CP 10 - Depois	38,1	95,1	95,1	133,2	209,3	247,3	266,4

Figura 5.9 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Granito Itaquera antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

O ensaio de absorção de água por capilaridade realizado nos corpos submetidos ao choque térmico apresentou aumento de absorção significativo, com resultados de 75 e 80% em relação aos valores iniciais (Tabela 5.8).

O comportamento mais absorvente nos corpos de prova ocorreu desde a primeira leitura, sendo que com 24 horas de ensaio os valores já se aproximavam da estabilidade (Figura 5.10).

Devido à variação entre a avaliação inicial e final é possível afirmar que ocorreu um aumento significativo de fraturas nas amostras o que lhes conferiu essa capacidade de absorção.

Tabela 5.8 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após choque térmico para o Granito Itaquera.

Corpo	Absorção de Água (g/m²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	360 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 11 - Antes	77,6	135,8	155,2	174,7	252,3	291,1	310,5
CP 11 - Depois	174,7	271,7	349,3	465,7	524,0	524,0	543,4
CP 12 - Antes	75,2	94,0	112,8	131,6	206,7	244,3	281,9
CP 12 - Depois	281,9	394,7	451,0	451,0	507,4	507,4	507,4

Figura 5.10 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Granito Itaquera antes e após choque térmico.

5.1.5 Índice de resistência ao carregamento pontual (*Point load test*)

Das 20 amostras preparadas para o ensaio, duas delas estavam fraturadas, sendo inutilizadas, destinando-se assim 9 corpos para o ensaio sem alteração e 9 corpos foram ensaiados após exposição à névoa salina.

A Tabela 5.9 apresenta os resultados do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Granito Itaquera.

Verificou-se menor resistência média para os corpos expostos à nevoa salina, apresentando redução de 0,2 MPa (11%) em relação à média dos corpos não submetidos à alteração.

Os valores máximos adquiridos foram de 2,0 MPa nas duas análises e os mínimos apresentaram pequena diferença.

Os valores do desvio padrão e coeficiente de variação apresentam os mesmos valores, confirmando uma redução uniforme dos resultados.

Tabela 5.9 - Resultados obtidos na determinação do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Granito Itaquera. Comparativo das amostras não alteradas com as expostas à névoa salina.

Amostra	Índice de Resistência – $I_{s(50)}$ (MPa)	
	Não alteradas	Expostas à névoa salina
1	2,0	1,8
2	1,5	2,0
3	2,0	1,6
4	1,9	1,4
5	1,9	1,6
6	1,6	1,8
7	1,5	1,6
8	2,0	1,4
9	1,8	1,6
Média	1,8	1,6
Máximo	2,0	2,0
Mínimo	1,5	1,4
Desvio Padrão	0,2	0,2
Coeficiente de Variação	0,13	0,13

5.1.6 Absorção de água por tubo de Karsten

A absorção de água por tubo de Karsten efetuada nos corpos submetidos à névoa salina do Granito Itaquera apresentou discrepância nos resultados, pois das três amostras avaliadas cada uma apresenta um comportamento distinto.

O corpo de prova 1 tanto na avaliação prévia à exposição quanto na posterior obtém o mesmo resultado ao final das cinco horas de ensaio (Figura 5.11).

A amostra 2 apresentou um aumento de 50% da absorção, enquanto o corpo de prova 3 demonstrou redução de 33% em relação à avaliação inicial.

Dos corpos de prova submetidos à exposição em câmara saturada de SO₂, ocorreu a redução da absorção de água em todos os casos. As variações da absorção de água foram de 29% na amostra 4 a 50% nas amostras 5 e 6 (Figura 5.12).

Das amostras submetidas à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, ocorreu a redução da absorção de água em todas as amostras. A maior alteração ocorreu no corpo de prova imerso parcialmente em hidróxido de sódio que apresentou redução de 50%; 33% nas amostras imersas nos ácidos sulfúrico e clorídrico; e 25% no corpo imerso em ácido nítrico (Figura 5.13).

As amostras expostas ao choque térmico apresentaram aumento da absorção de água por tubo de Karsten entre as avaliações iniciais e finais. O corpo de prova 11 absorveu quase 3 vezes mais água que na avaliação inicial e o 12 absorveu 19 vezes mais (Figura 5.14).

Figura 5.11 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à névoa salina em corpos do Granito Itaquera.

Figura 5.12 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à câmara de SO₂ em corpos do Granito Itaquera.

Figura 5.13 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina em corpos do Granito Itaquera.

Figura 5.14 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após choque térmico em corpos do Granito Itaquera.

5.1.7 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A Tabela 5.10 apresenta os resultados obtidos na determinação da velocidade de onda ultrassônica em duas direções, perpendicular e paralela à foliação da rocha, efetuada com três pares de transdutores para os corpos do Granito Itaquera expostos à névoa salina.

A média das velocidades obtida com os transdutores de 54 kHz e 150 kHz nas duas direções foi muito próxima, com coeficientes de variação satisfatórios, onde as velocidades adquiridas na direção perpendicular são superiores à paralela.

Os valores obtidos com os transdutores exponenciais são mais díspares.

Tabela 5.10 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Itaquera expostos à névoa salina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	54 kHz	CP 01	4,07	3,87	4,36	4,20
		CP 02	4,33	4,18	4,14	4,14
		CP 03	4,57	4,30	4,14	4,00
		Máximo	4,57	4,30	4,36	4,20
		Mínimo	4,07	3,87	4,14	4,00
		Média	4,32	4,12	4,21	4,12
		C. V.	0,06	0,05	0,03	0,03
	150 kHz	CP 01	4,07	3,83	4,36	4,02
		CP 02	4,36	4,18	4,07	3,96
		CP 03	4,51	4,27	4,11	3,91
		Máximo	4,51	4,27	4,36	4,02
		Mínimo	4,07	3,83	4,07	3,91
		Média	4,31	4,09	4,18	3,96
		C. V.	0,05	0,06	0,04	0,01
	Exponencial	CP 01	3,66	3,68	3,86	3,92
		CP 02	4,10	5,29	3,71	5,92
		CP 03	3,82	4,24	3,61	3,69
		Máximo	4,10	5,29	3,86	5,92
		Mínimo	3,66	3,68	3,61	3,69
		Média	3,86	4,40	3,73	4,51
		C. V.	0,06	0,19	0,03	0,27

A variação das velocidades adquiridas antes e após ensaio de alteração apresenta diminuição das velocidades 0,15 a 0,27 km/s na direção perpendicular e de 0 a 0,34 km/s na paralela para os transdutores de 54 e 150 kHz. Os transdutores exponenciais apresentam

aumento nas velocidades variando de 0,02 a 1,19 km/s na direção perpendicular e de 0,06 a 2,21 km/s na paralela (Figura 5.15).

Os transdutores de 150 kHz apresentaram maior precisão na aquisição dos dados, seguidos pelos transdutores de 54 kHz. Os transdutores exponenciais apresentam elevada variação e discrepância de resultados.

Figura 5.15 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à névoa salina nos corpos de Granito Itaquera.

A Tabela 5.11 apresenta os resultados das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nas direções perpendicular e paralela à foliação da rocha, realizadas com três pares de transdutores, para os corpos do Granito Itaquera expostos à câmara de SO_2 .

Nestas avaliações as médias das velocidades aumentaram nas avaliações realizadas com os transdutores de 54 kHz e exponenciais. Para os transdutores 150 kHz ocorreu aumento da média na direção perpendicular. Na direção paralela a média não apresenta alteração relevante.

Tabela 5.11 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Itaquera expostos à câmara de SO₂.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	54 kHz	CP 04	3,63	3,84	3,50	3,74
		CP 05	4,09	4,13	4,55	4,49
		CP 06	4,13	4,20	4,56	4,50
		Máximo	4,13	4,20	4,56	4,50
		Mínimo	3,63	3,84	3,50	3,74
		Média	3,95	4,06	4,20	4,24
		C. V.	0,07	0,05	0,14	0,10
	150 kHz	CP 04	3,46	3,60	3,41	3,50
		CP 05	3,97	4,06	4,55	4,41
		CP 06	4,08	4,18	4,50	4,50
		Máximo	4,08	4,18	4,55	4,50
		Mínimo	3,46	3,60	3,41	3,50
		Média	3,84	3,94	4,15	4,14
		C. V.	0,09	0,08	0,16	0,13
	Exponencial	CP 04	3,20	3,43	2,92	3,42
		CP 05	3,24	3,81	3,86	3,96
		CP 06	3,28	3,96	3,51	4,28
		Máximo	3,28	3,96	3,86	4,28
		Mínimo	3,20	3,43	2,92	3,42
		Média	3,24	3,74	3,43	3,89
		C. V.	0,01	0,07	0,14	0,11

As velocidades na direção perpendicular apresentaram variação entre 0,05 e 0,21 km/s para os transdutores de 54kHz e 150 kHz, na paralela essa variação foi de -0,14 a 0,24 km/s. Os transdutores exponenciais variaram entre 0,23 e 0,69 km/s na direção perpendicular e de 0,11 a 0,77 km/s na paralela (Figura 5.16).

Figura 5.16 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à câmara de SO_2 nos corpos de Granito Itaquera.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados obtidos na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas direções perpendicular e paralela à foliação da rocha, realizada com três pares de transdutores, para os corpos do Granito Itaquera imersos parcialmente em soluções ácidas e alcalina.

Em praticamente todas as avaliações nos quatro reagentes nas duas direções, realizadas com os transdutores de 54 e 150 kHz, ocorre o aumento das velocidades. Na avaliação do corpo imerso parcialmente em NaOH ocorre pequena redução nas duas direções nos valores obtidos com os transdutores de 54 kHz. O mesmo ocorre na direção paralela para o corpo imerso em H_2SO_4 para o mesmo par de transdutores. Os transdutores exponenciais obtiveram aumento de velocidade na direção perpendicular, na direção paralela também ocorre aumento na maioria dos casos, ocorrendo redução da velocidade apenas no corpo exposto ao ácido sulfúrico.

A Figura 5.17 mostra os valores e a variação das velocidades obtidas antes e após a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.12 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Itaquera submetidos a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Imersão parcial	54 kHz	CP 07	4,04	4,19	4,11	4,07
		CP 08	4,12	4,27	4,20	4,27
		CP 09	4,45	4,58	4,05	4,26
		CP 10	4,07	4,04	4,09	4,07
	150 kHz	CP 07	3,93	4,14	4,07	4,31
		CP 08	4,01	4,27	4,13	4,30
		CP 09	4,50	4,64	4,01	4,28
		CP 10	3,98	4,09	4,00	4,09
	Exponencial	CP 07	3,51	3,90	3,99	3,78
		CP 08	3,33	3,86	3,34	4,12
		CP 09	3,95	4,33	3,27	4,11
		CP 10	3,35	4,10	3,72	4,01

OBS: CP nº-Solução: CP 07 = H₂SO₄, CP 08 = HCl, CP 09 = HNO₃, CP 10 = NaOH

Figura 5.17 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina nos corpos de Granito Itaquera.

A Tabela 5.13 apresenta os resultados obtidos na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas direções perpendicular e paralela à foliação da rocha, realizada com três pares de transdutores, para os corpos do Granito Itaquera submetidos à alteração por choque térmico.

Nesta avaliação ocorreu a diminuição das velocidades adquiridas nas duas direções, perpendicular e paralela, para os transdutores de 54 e 150 kHz. A velocidade média aumenta na direção perpendicular para os transdutores exponenciais.

Dos três pares de transdutores, os de 54kHz foram os que apresentaram menor discrepância entre as leituras efetuadas, bem como a menor variação (Figura 5.18).

Tabela 5.13 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Itaquera submetidos à alteração por choque térmico.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Choque térmico	54 kHz	CP 11	3,96	3,31	4,12	3,46
		CP 12	4,09	3,52	4,09	3,46
		Média	4,02	3,42	4,11	3,46
		C. V.	0,02	0,04	0,00	0,00
	150 kHz	CP 11	3,89	3,22	4,07	2,96
		CP 12	4,04	2,85	4,03	2,79
		Média	3,97	3,04	4,05	2,87
		C. V.	0,03	0,09	0,01	0,04
	Exponencial	CP 11	3,38	3,37	3,45	2,82
		CP 12	3,84	3,91	3,64	2,68
		Média	3,61	3,64	3,55	2,75
		C. V.	0,09	0,10	0,04	0,04

Figura 5.18 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após alteração por choque térmico nos corpos de Granito Itaquera.

5.1.8 Resistência superficial por esclerometria

A Tabela 5.14 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à névoa salina.

Para efeito comparativo, um corpo de prova não submetido a ensaios de intemperismo artificial foi utilizado como referência da resistência superficial.

Das três amostras avaliadas, duas apresentaram valores médios de resistência inferiores aos da amostra de referência, apenas o corpo 2 apresentou valores mais elevados. O corpo de prova 1 apresentou valor máximo igual ao da referência.

A Figura 5.19 apresenta gráfico com os valores obtidos na resistência superficial por esclerometria em ordem crescente, onde é possível observar o comportamento dos corpos expostos à névoa salina.

A Tabela 5.15 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à câmara de SO₂.

Os corpos 4 e 5 apresentaram valores da resistência inferiores aos obtidos na referência. A amostra 6 opondo-se às demais, apresenta valores superiores à referência.

Os valores obtidos na avaliação dos corpos expostos ao SO₂ podem ser observados em ordem crescente no gráfico da Figura 5.20.

A Tabela 5.16 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

As amostras imersas parcialmente nos ácidos sulfúrico, clorídrico e nítrico mostraram valores da resistência superiores aos obtidos no corpo de referência, apenas a amostra imersa em hidróxido de sódio apresentou valores inferiores.

Esses resultados podem indicar que a imersão parcial em soluções ácidas causou aumento de resistência superficial.

A Figura 5.21 mostra o gráfico com os valores obtidos na resistência superficial para os corpos submetidos à imersão parcial em ordem crescente.

A Tabela 5.17 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à alteração por choque térmico.

Os corpos 11 e 12 mostraram valores inferiores aos obtidos no corpo de referência, o que caracteriza a alteração mecânica ocorrida no ensaio de choque térmico. Os valores das resistências adquiridos nesses corpos estão expostos no gráfico da Figura 5.22 em ordem crescente.

Tabela 5.14 – Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Itaquera expostos à névoa salina.

Resistência	Referência	CP01	CP02	CP03
Média (MPa)	22,6	17,8	26,3	19,3
Máximo (MPa)	31,1	31,1	32,5	28,4
Mínimo (MPa)	13,5	8,1	20,3	10,8

Figura 5.19 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Itaquera expostos à nevoa salina.

Tabela 5.15 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Itaquera expostos à câmara de SO₂.

Resistência	Referência	CP04	CP05	CP06
Média (MPa)	22,6	15,0	13,9	27,1
Máximo (MPa)	31,1	23,0	25,7	35,2
Mínimo (MPa)	13,5	9,5	8,1	21,7

Figura 5.20 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Itaquera expostos à câmara de SO₂.

Tabela 5.16 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Itaquera submetidos a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Resistência	Referência	CP07	CP08	CP09	CP 10
Média (MPa)	22,6	24,2	25,9	27,7	18,5
Máximo (MPa)	31,1	32,5	35,2	36,5	26,0
Mínimo (MPa)	13,5	16,2	14,9	17,6	13,0

OBS: CP nº- Solução: CP 07 = H₂SO₄, CP 08 = HCl, CP 09 = HNO₃, CP 10 = NaOH

Figura 5.21 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Itaquera submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.17 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Itaquera expostos à alteração por choque térmico.

Resistência	Referência	CP11	CP12
Média (MPa)	22,6	17,7	12,0
Máximo (MPa)	31,1	27,1	18,9
Mínimo (MPa)	13,5	10,8	8,1

Figura 5.22 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Itaquera submetidos à alteração por choque térmico.

5.1.9 Determinação da cor por espectrofotometria

A alteração da cor por espectrofotometria foi determinada antes e após ensaios de alteração em uma face previamente estabelecida dos corpos de prova (face de referência). Apenas os submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina necessitaram mais áreas de análise por apresentarem variação cromática em regiões distintas dos corpos. Para esses casos foram definidas áreas nas laterais dos corpos onde ocorreram variações cromáticas.

As faces de referência dos corpos também foram registradas usando o auxílio de um scanner para avaliação visual e apresentação das alterações.

A Figura 5.23 mostra as imagens obtidas com auxílio de scanner antes e após exposição à névoa salina. Foram observadas alterações de coloração, constatando-se suave clareamento nas amostras.

A Figura 5.24 mostra imagens obtidas com scanner antes e após exposição ao SO_2 . Neste caso também se observa aspecto mais claro das amostras após ensaio de alteração.

Figura 5.23 – Coloração apresentada pelos corpos 1 a 3 do Granito Itaquera antes e após exposição à névoa salina.

A Figura 5.25 mostra imagens obtidas com scanner antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Neste caso foi controlada a alteração da face de referência, previamente determinada, e registrado o aspecto de uma das laterais do corpo, onde a base da imagem corresponde a região totalmente imersa em solução e o topo a região de ascensão capilar.

Todas as faces de referência apresentaram clareamento e suave amarelamento nos corpos submetidos a soluções ácidas, 7 a 9. No corpo 10 referente à solução alcalina observa-se apenas o clareamento das amostras na face de referência.

A maior alteração de cor ocorreu nas laterais dos corpos. O corpo 7, imerso em ácido sulfúrico, mostrou perda de coloração com suave amarelamento no topo e amarelamento mais evidente na base.

O corpo 8, imerso em ácido clorídrico, apresentou forte amarelamento em quase todo o corpo, sendo menos expressivo no topo.

O corpo de prova 9, imerso em ácido nítrico, apresentou maior amarelamento no topo e baixa alteração de cor na base. Observou-se a formação de uma linha escura que acompanhava a altura de ascensão capilar da solução na amostra. Região essa também avaliada por espectrofotometria.

No corpo 10 foi observado leve clareamento da face lateral em toda sua área.

Figura 5.24 - Coloração apresentada pelos corpos 4 a 6 do Granito Itaquera antes e após exposição ao SO₂.

A Figura 5.26 mostra imagens obtidas com scanner antes e após choque térmico. Neste caso também se observa aspecto mais claro das amostras após ensaio de alteração e aspecto mais alaranjado em alguns pontos.

A Figura 5.27 mostra a dispersão no plano a*b* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos do Granito Itaquera submetidos às alterações por névoa salina, SO₂ e choque térmico.

Figura 5.25 - Coloração apresentada pelos corpos 7 a 10 do Granito Itaquera antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Esquerda, face antes da imersão; centro, face imersa na solução; direita, face lateral do corpo ao final do período de imersão. A base da imagem refere-se à zona imersa e o topo à zona de capilaridade.

Observando os pontos relativos às leituras efetuadas após ensaio de névoa salina e SO_2 ficou visível que a variação ocorrida em relação a avaliação inicial, em média, é muito sutil, com acréscimo no parâmetro b^* para os corpos expostos à névoa salina. Nos corpos submetidos ao choque térmico ocorreu variação positiva nos parâmetros b^* e a^* , sendo esta mais acentuada.

A Figura 5.28 apresenta a mesma dispersão para as áreas avaliadas nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Desses corpos, o que apresentou menor alteração cromática foi o imerso em hidróxido de sódio, com valores de a^* muito similares aos iniciais e acréscimo no parâmetro b^* .

Dos corpos submetidos aos ácidos ocorreu o amarelamento em todos os corpos e áreas de medida, confirmados pelo aumento do parâmetro b^* , com destaque ao corpo imerso em ácido clorídrico.

Figura 5.26 - Coloração apresentada pelos corpos 11 e 12 do Granito Itaquera antes e após choque térmico.

A maior variação do parâmetro a^* ocorreu também no corpo em contato com o ácido clorídrico, especificamente nas leituras efetuadas nas laterais, onde a zona emersa apresentou maior alteração nas leituras efetuadas.

A Figura 5.29 mostra a dispersão no plano L^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos do Granito Itaquera expostos à névoa salina, SO_2 e choque térmico. Observa-se no gráfico o aumento do parâmetro L^* nas leituras realizadas nos corpos expostos à névoa salina, SO_2 e choque térmico, o que confirma clareamento da superfície das amostras.

Dos corpos imersos em soluções ácidas e alcalina, as leituras realizadas no corpo em contato com hidróxido de sódio foram os que menos se altera, apresentando pequena redução do parâmetro em algumas leituras (Figura 5.30).

Nos corpos expostos aos ácidos observa-se maior redução do parâmetro L^* na zona emersa do corpo em contato com ácido clorídrico e na faixa escura observada na amostra exposta ao ácido nítrico.

A Tabela 5.18 apresenta o resultado dos cálculos do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado nos corpos do Granito Itaquera, mostrando a alteração cromática ocorrida nos corpos em cada região analisada.

Figura 5.27 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Itaquera submetidos à névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Figura 5.28 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Itaquera submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Figura 5.29 - Dispersão no plano L^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Itaquera submetidos aos ensaios de névoa salina, SO₂ e choque térmico para observação da variação do parâmetro L^* .

Figura 5.30 - Dispersão no plano L*b* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Itaquera submetidos à imersão parcial para observação da variação do parâmetro L*.

Tabela 5.18 – Valores médios de L* a* e b* e cálculo do ΔE , efetuados antes e após ensaios de alteração nas áreas avaliadas dos corpos de Granito Itaquera.

Agente de alteração/área avaliada	Inicial			Final			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
Névoa Salina				73,3	-0,7	0,6	4,4
SO ₂				74,2	-0,7	-0,01	5,1
Choque Térmico				76,3	0,1	2,8	8,1
H ₂ SO ₄ Referência				73,0	-0,5	3,7	6,1
H ₂ SO ₄ Zona Imersa				72,6	-0,2	6,0	7,8
H ₂ SO ₄ Zona Emersa				68,3	-0,4	9,1	10,2
HCl Referência				68,7	-0,5	4,9	6,0
HCl Zona Imersa	69,2	-0,6	-1,0	67,2	0,8	12,5	13,8
HCl Zona Emersa				62,1	2,9	20,1	22,6
HNO ₃ Referência				69,1	-0,4	3,4	4,4
HNO ₃ Zona Imersa				68,4	-0,3	7,2	8,1
HNO ₃ Faixa				61,0	-0,3	9,3	13,2
HNO ₃ Zona Emersa				69,5	-0,7	1,7	2,7
NaOH Referência				67,0	-0,6	-0,02	2,4
NaOH Zona Imersa				68,3	-0,5	0,3	1,6
NaOH Zona Emersa				67,9	-0,6	0,7	2,1

5.2 Granito Cinza Mauá

5.2.1 Alterações constatadas durante os ensaios

Na observação efetuada em lupa dos corpos expostos à névoa salina, foi notado o acúmulo de sal na superfície de um dos corpos com coloração amarelada (Figura 5.31).

Os corpos submetidos ao SO_2 não apresentaram alterações detectáveis visualmente após os ciclos de exposição.

No ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina ocorreu a formação superficial de eflorescências nos corpos em contato com o ácido sulfúrico e hidróxido de sódio (Figuras 5.32).

Os materiais das eflorescências foram coletados e submetidos ao ensaio de difratometria de raios X para determinação composicional.

A reação do ácido sulfúrico com o Granito Cinza Mauá (Figura 5.33) gerou eflorescências de halotriquita ($\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e pequenas quantidades de alunogen ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$) e magadita ($\text{Na}_2\text{Si}_{14}\text{O}_{29} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). A formação destes sais ocorreu pela reação da solução ácida com os minerais presentes na rocha, como biotita e plagioclásio.

Figura 5.31 - Acúmulo sal com cor amarelada na superfície de corpo do Granito Cinza Mauá exposto à névoa salina.

O contato com o hidróxido de sódio gerou carbonato de sódio hidratado ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) formados na reação da solução alcalina com o

CO₂ atmosférico (Figura 5.34). Foram identificadas no ensaio pequenas quantidades de plagioclásio, mineral presente na composição da rocha.

No ensaio de choque térmico não foram visualizadas alterações nos corpos de Granito Cinza Mauá.

Figura 5.32 - Formação superficial de sais nas amostras do Granito Cinza Mauá expostas ao ácido sulfúrico (esquerda) e hidróxido de sódio (direita).

Figura 5.33 - Difratoograma das eflorescências formadas no Granito Cinza Mauá durante imersão parcial em ácido sulfúrico.

Figura 5.34 - Difratoograma das eflorescências formadas no Granito Cinza Mauá durante imersão parcial em hidróxido de sódio.

5.2.2 Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico

A análise de lâminas delgadas do Granito Cinza Mauá constatou alterações apenas na lâmina do corpo submetido ao choque térmico. As lâminas referentes aos demais ensaios não produziram alterações detectáveis ao microscópio petrográfico.

Nas Figuras 5.35 e 5.36 visualiza-se fino fraturamento de cristais de quartzo, predominantemente entre contatos.

Figura 5.35 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do Granito Cinza Mauá (polarizadores descruzados).

Figura 5.36 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em cristais de quartzo (Qtz) em amostra do Granito Cinza Mauá (polarizadores cruzados).

5.2.3 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

As Tabelas 5.19 a 5.22 apresentam os resultados obtidos prévia e posteriormente aos ensaios de alteração na determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água do Granito Cinza Mauá.

A Tabela 5.19 aborda os corpos submetidos ao ensaio de névoa salina. Na avaliação dos valores médios não ocorrem alterações relevantes.

A avaliação individual das amostras, mostra alterações baixas nos valores da densidade. Na obtenção da porosidade e absorção de água, demonstraram comportamentos distintos. O corpo 1 apresenta aumento da absorção de água e porosidade na ordem de 4%, enquanto a amostra 2 apresenta redução dessas características em 9%. O terceiro corpo não apresenta alteração em seus resultados de porosidade e absorção.

A Tabela 5.20 refere-se aos corpos expostos à câmara de SO₂. Os valores médios da avaliação apresentam pequenas reduções na densidade, porosidade e absorção de água.

Analisando as amostras individualmente observa-se que os corpos não apresentam alterações significativas da densidade. Nos resultados da porosidade e absorção de água ocorre, em todos os corpos de prova, diminuição de aproximadamente 5%.

Tabela 5.19 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Cinza Mauá antes e após exposição à névoa salina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa salina	CP 01	2660	2659	0,57	0,59	0,21	0,22
	CP 02	2661	2660	0,60	0,55	0,23	0,21
	CP 03	2653	2654	0,59	0,59	0,22	0,22
Máximo		2661	2660	0,60	0,59	0,23	0,22
Mínimo		2653	2654	0,57	0,55	0,21	0,21
Média		2658	2657	0,59	0,58	0,22	0,22
Coeficiente de Variação		0,002	0,001	0,03	0,04	0,03	0,04

Tabela 5.20 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Cinza Mauá antes e após exposição à atmosfera saturada de SO₂.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	CP 04	2663	2668	0,53	0,51	0,20	0,19
	CP 05	2659	2656	0,53	0,50	0,20	0,19
	CP 06	2663	2660	0,52	0,50	0,20	0,19
Máximo		2663	2668	0,53	0,51	0,20	0,19
Mínimo		2659	2656	0,52	0,50	0,20	0,19
Média		2662	2661	0,53	0,50	0,20	0,19
Coeficiente de Variação		0,001	0,002	0,01	0,01	0,01	0,01

Nos corpos de prova do Granito Cinza Mauá submetidos à imersão parcial (Tabela 5.21) em soluções ácidas e alcalina observou-se baixa variação da densidade, no entanto o comportamento do corpo imerso parcialmente em ácido sulfúrico apresentou aumento de 5% e os demais redução pouco expressiva.

Em todos os corpos ocorreu diminuição da porosidade e absorção de água, sendo o corpo exposto ao ácido clorídrico o mais afetado variando 32% para ambos, o segundo mais

afetado foi o corpo imerso em ácido sulfúrico que variou na ordem de 22%, nas duas características. De maneira semelhante os corpos expostos a ácido nítrico e hidróxido de sódio variaram aproximadamente 18 e 15%, respectivamente.

Nos corpos expostos ao choque térmico (Tabela 5.22), os valores médios apresentaram alterações mais expressivas, ocorrendo diminuição da densidade, e aumento da porosidade e absorção de água.

Na avaliação individual dos corpos é verificada a maior alteração do corpo 11 que apresenta diminuição de 1% na densidade, aumento da porosidade e absorção de água de 34% e 35%, enquanto o corpo 12 não apresenta alteração significativa da densidade e obtém aumento da porosidade e absorção de água de valores 29%.

De todas as alterações realizadas no Granito Cinza Mauá o choque térmico foi único no qual os corpos apresentaram aumento da porosidade e absorção de água de forma contundente.

Tabela 5.21 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Cinza Mauá antes e após ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
H ₂ SO ₄	CP 07	2641	2654	0,61	0,48	0,23	0,18
HCl	CP 08	2657	2653	0,68	0,46	0,26	0,17
HNO ₃	CP 09	2652	2648	0,61	0,50	0,23	0,19
NaOH	CP 10	2663	2659	0,58	0,50	0,22	0,19

Tabela 5.22 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Granito Cinza Mauá antes e após ensaio de choque térmico.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	CP 11	2665	2649	0,53	0,71	0,20	0,27
	CP 12	2657	2652	0,57	0,74	0,22	0,28
Média		2661	2651	0,55	0,72	0,21	0,27
Coeficiente de Variação		0,002	0,001	0,06	0,03	0,06	0,03

5.2.4 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 5.23 mostra os valores da absorção de água por capilaridade dos corpos do Granito Cinza Mauá submetidos à névoa salina.

As três amostras tiveram comportamento semelhante, apresentando diminuição da absorção de água por capilaridade após 72 horas, os corpos 1 e 3 variaram 10 e 11% respectivamente, enquanto o corpo 2 teve diminuição de 20%.

O gráfico da Figura 5.37 contém as curvas de absorção de água por capilaridade, onde é possível visualizar o comportamento de queda na absorção de água após 24 horas de ensaio nos três corpos.

Tabela 5.23 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após exposição à névoa salina para o Granito Cinza Mauá.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	360 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 01 - Antes	34,8	52,1	86,9	121,7	226,0	330,3	365,0
CP 01 - Depois	52,1	86,9	86,9	104,3	226,0	295,5	330,3
CP 02 - Antes	57,5	76,6	95,8	134,1	249,1	344,9	383,2
CP 02 - Depois	38,3	57,5	76,6	95,8	210,8	268,3	306,6
CP 03 - Antes	38,1	95,1	114,2	133,2	266,4	323,4	361,5
CP 03 - Depois	38,1	76,1	95,1	114,2	228,3	285,4	323,4

A Tabela 5.24 mostra redução dos valores da absorção de água por capilaridade em todos os corpos alterados por SO_2 , sendo que o corpo 4 absorveu 24% menos água, enquanto os corpos 2 e 3 variaram 11%.

Na Figura 5.38 é percebida a menor absorção de água a partir de 6 horas de ensaio, assim como a maior variação do corpo 4 em relação aos demais.

Os valores da absorção de água por capilaridade dos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina estão expressos na Tabela 5.25, onde observa-se expressiva diminuição da absorção de água em todas as amostras.

A redução da absorção de água foi de: 41% no corpo 7 (H_2SO_4), 40% no 10 (NaOH), 33% no 8 (HCl) e 30% no 9 (HNO_3).

Figura 5.37 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($\text{s}^{1/2}$) dos corpos de Granito Cinza Mauá antes e após exposição à névoa salina.

Tabela 5.24 - Valores da absorção de água em g/m^2 obtidos antes e após exposição à câmara de SO_2 para o Granito Cinza Mauá.

Corpo	Absorção de Água (g/m^2)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 04 - Antes	57,7	96,2	96,2	134,7	250,1	384,7	404,0
CP 04 - Depois	38,5	57,7	76,9	96,2	211,6	269,3	307,8
CP 05 - Antes	39,7	59,6	99,3	119,2	238,4	337,8	357,6
CP 05 - Depois	39,7	59,6	79,5	119,2	238,4	317,9	317,9
CP 06 - Antes	56,5	56,5	75,4	94,2	245,0	320,3	358,0
CP 06 - Depois	37,7	56,5	75,4	113,1	207,3	282,7	320,3

Na Figura 5.39 é possível observar a variação entre a absorção ocorrida nos corpos antes e após imersão em soluções ácidas e alcalina.

Nos corpos submetidos ao choque térmico é observado aumento expressivo da absorção, sendo a variação de 53 % para o corpo 11 e de 107% para o corpo 12 após 72 horas (Tabela 5.26).

A Figura 5.40 permite observar que a absorção após alteração é praticamente idêntica para os dois corpos, sendo que a diferença analítica entre os corpos ocorreu antes do choque térmico. Nota-se também que a maior absorção dos corpos após ensaio de alteração ocorre até as 6 horas de ensaio, praticamente estabilizando após esse tempo.

Figura 5.38 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Granito Cinza Mauá antes e após exposição à câmara saturada de SO_2 .

Tabela 5.25 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para o Granito Cinza Mauá.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 07 - Antes	38,3	76,5	95,7	133,9	248,7	382,6	420,9
CP 07 - Depois	57,4	76,5	95,7	114,8	210,4	229,6	248,7
CP 08 - Antes	57,8	77,1	96,3	115,6	231,2	327,5	346,8
CP 08 - Depois	38,5	57,8	57,8	96,3	173,4	211,9	231,2
CP 09 - Antes	38,3	57,4	76,5	114,8	306,1	344,3	382,6
CP 09 - Depois	57,4	57,4	95,7	114,8	210,4	229,6	267,8
CP 10 - Antes	59,6	79,5	119,2	139,1	258,3	357,6	397,3
CP 10 - Depois	19,9	39,7	59,6	99,3	158,9	218,5	238,4

Figura 5.39 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo (s^{1/2}) dos corpos de Granito Cinza Mauá antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.26 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após choque térmico para o Granito Cinza Mauá.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 11 - Antes	19,1	57,4	57,4	114,8	210,5	325,3	363,6
CP 11 - Depois	267,9	363,6	421,0	497,6	535,8	555,0	555,0
CP 12 - Antes	57,2	57,2	57,2	76,2	133,4	228,6	266,7
CP 12 - Depois	285,8	400,1	457,2	476,3	533,4	533,4	552,5

Figura 5.40 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Granito Cinza Mauá antes e após choque térmico.

5.2.5 Índice de resistência ao carregamento pontual (*Point load test*)

A Tabela 5.27 apresenta os resultados do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Granito Cinza Mauá.

Verificou-se menor resistência média para os corpos expostos à nevoa salina, apresentando redução de 0,1 MPa (6%) em relação à média dos corpos não submetidos à alteração.

Os valores máximos adquiridos foram de 1,9 MPa nas duas análises e os mínimos apresentaram diferença de 0,1 MPa (7%).

Os valores do desvio padrão e coeficiente de variação apresentam melhores resultados na avaliação após alteração, garantindo maior confiabilidade dos resultados nesta etapa.

Tabela 5.27 - Resultados obtidos na determinação do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Granito Cinza Mauá. Comparativo das amostras não alteradas com as expostas à névoa salina.

Amostra	Índice de Resistência - $I_{s(50)}$ (Mpa)	
	Não alteradas	Expostas à névoa salina
1	1,9	1,3
2	1,7	1,3
3	1,5	1,9
4	1,5	1,6
5	1,5	1,6
6	1,8	1,5
7	1,6	1,5
8	1,5	1,6
9	1,4	1,5
10	1,5	1,6
Média	1,6	1,5
Máximo	1,9	1,9
Mínimo	1,4	1,3
Desvio Padrão	0,2	0,2
Coefficiente de Variação	0,11	0,10

5.2.6 Absorção de água por tubo de Karsten

A absorção de água por tubo de Karsten efetuada nos corpos do Granito Cinza Mauá expostos à névoa salina não apresenta modificação de valores, uma vez que os corpos 1 e 2 apresentaram o mesmo resultado antes e após ensaio de alteração (Figura 5.41).

O corpo 3, embora tenha apresentado variação de absorção entre as avaliações inicial e final, não pode ser considerado como representativo, pois a absorção ocorrida nos primeiros 5 minutos de ensaio pode ter sido ocasionada por algum vazio ou bolha de ar entre o tubo e o material de fixação.

Na avaliação realizada com os corpos de prova submetidos à câmara de SO_2 ocorre redução da absorção de água nos corpos 5 e 6, o que configura menor porosidade na rocha na região de avaliação. O corpo de prova 4 não mostrou alteração entre a avaliação inicial e final (Figura 5.42).

Dos corpos imersos em soluções ácidas e alcalina ocorreu variação da absorção de água por tubo de Karsten somente nos submetidos ao ácido nítrico e ao hidróxido de sódio (Figura 5.43).

A amostra submetida ao ácido nítrico teve aumento de 200% em função da baixa absorção da rocha não alterada, já a amostra que foi imersa em hidróxido de sódio, mostrou redução de 33%.

Figura 5.41 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à névoa salina em corpos do Granito Cinza Mauá.

Figura 5.42 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à câmara de SO₂ em corpos do Granito Cinza Mauá.

A absorção de água por tubo de Karsten dos corpos submetidos ao choque térmico apresentou aumento na ordem de 400% para a amostra 11 e de 633% para a 12 (Figura 5.44).

Figura 5.43 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina em corpos do Granito Cinza Mauá.

Figura 5.44 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após choque térmico em corpos do Granito Cinza Mauá.

5.2.7 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

Os resultados médios das velocidades de propagação ultrassônica obtidos com os transdutores de 54 e 150 kHz apresentaram redução nas duas direções de avaliação e coerência entre os valores obtidos entre os transdutores, apresentando maior variação na direção paralela, usando os transdutores de 150 kHz (Tabela 5.28). Os transdutores exponenciais apresentaram comportamento inverso aos demais e maior variação entre a avaliação inicial e final.

Os transdutores de 54 kHz demonstraram boa estabilidade entre as leituras iniciais e finais, variando entre 0,17 e 0,19 km/s na direção perpendicular e de 0,13 a 0,20 na paralela. As variações obtidas com os transdutores de 150 kHz foram de 0,14 a 0,25 km/s na direção perpendicular e de 0,10 a 0,31 na paralela. Os transdutores exponenciais apresentam variação de 0,07 a 0,46 km/s na direção perpendicular e de 0 a 0,26 na paralela (Figura 5.45).

Tabela 5.28 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Cinza Mauá expostos à névoa salina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	54 kHz	CP 01	4,07	3,87	4,36	4,20
		CP 02	4,33	4,18	4,14	4,14
		CP 03	4,57	4,30	4,14	4,00
		Máximo	4,57	4,30	4,36	4,20
		Mínimo	4,07	3,87	4,14	4,00
		Média	4,32	4,12	4,21	4,12
		C. V.	0,06	0,05	0,03	0,03
	150 kHz	CP 01	4,07	3,83	4,36	4,02
		CP 02	4,36	4,18	4,07	3,96
		CP 03	4,51	4,27	4,11	3,91
		Máximo	4,51	4,27	4,36	4,02
		Mínimo	4,07	3,83	4,07	3,91
		Média	4,31	4,09	4,18	3,96
		C. V.	0,05	0,06	0,04	0,01
	Exponencial	CP 01	3,66	3,68	3,86	3,92
		CP 02	4,10	5,29	3,71	5,92
		CP 03	3,82	4,24	3,61	3,69
		Máximo	4,10	5,29	3,86	5,92
		Mínimo	3,66	3,68	3,61	3,69
		Média	3,86	4,40	3,73	4,51
		C. V.	0,06	0,19	0,03	0,27

Figura 5.45 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à névoa salina nos corpos do Granito Cinza Mauá.

Nos corpos alterados por SO_2 ocorreu aumento sutil das médias das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas nas duas direções de análise para os três pares de transdutores (Tabela 5.29).

A maior estabilidade de leitura ocorreu com os transdutores de 54 kHz, seguida por 150 kHz. Os transdutores exponenciais nesta avaliação apresentaram precisão satisfatória nas leituras efetuadas na direção perpendicular, fator que não ocorreu na paralela (Figura 5.46).

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz foram de 0,03 km/s para todos os corpos na direção perpendicular e 0,03 a 0,08 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre 0,03 e 0,59 km/s na direção perpendicular e de 0,03 a 0,43 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre -0,04 e 0,18 km/s na direção perpendicular e 0,21 e 0,47 km/s na paralela.

Tabela 5.29 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Cinza Mauá expostos à câmara de SO₂.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	54 kHz	CP 04	4,56	4,58	4,36	4,44
		CP 05	4,54	4,57	4,38	4,44
		CP 06	4,38	4,41	4,52	4,55
		Máximo	4,56	4,58	4,52	4,55
		Mínimo	4,38	4,41	4,36	4,44
		Média	4,49	4,52	4,42	4,47
		C. V.	0,02	0,02	0,02	0,01
	150 kHz	CP 04	4,50	4,53	4,41	4,44
		CP 05	4,54	4,60	4,38	4,44
		CP 06	4,35	4,95	4,49	4,92
		Máximo	4,54	4,95	4,49	4,92
		Mínimo	4,35	4,53	4,38	4,44
		Média	4,46	4,69	4,43	4,60
		C. V.	0,02	0,05	0,01	0,06
	Exponencial	CP 04	3,93	4,11	3,70	4,17
		CP 05	4,04	4,04	3,76	3,96
		CP 06	3,80	3,76	3,88	4,19
		Máximo	4,04	4,11	3,88	4,19
		Mínimo	3,80	3,76	3,70	3,96
		Média	3,92	3,97	3,78	4,11
		C. V.	0,03	0,05	0,02	0,03

A Tabela 5.30 apresenta os resultados das velocidades de propagação de ondas ultrassônica dos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Nos valores obtidos com os transdutores de 54 e 150 kHz nas duas direções, as velocidades obtidas antes e após imersão parcial não se alteram significativamente, demonstrando que os corpos resistiram bem aos ataques ácidos.

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre 0,00 e 0,05 km/s na direção perpendicular e 0,00 a 0,03 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre 0,00 e 0,06 km/s na direção perpendicular e de -0,08 a 0,31 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre 0,04 e 0,53 km/s na direção perpendicular e -0,43 e 0,52 km/s na paralela (Figura 5.47).

Figura 5.46 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à câmara de SO₂ nos corpos de Granito Cinza Mauá.

Tabela 5.30 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Cinza Mauá submetidos a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Imersão Parcial	54 kHz	CP 07	4,48	4,48	4,53	4,53
		CP 08	4,55	4,58	4,48	4,50
		CP 09	4,59	4,62	4,39	4,39
		CP 10	4,31	4,36	4,48	4,51
	150 kHz	CP 07	4,48	4,53	4,50	4,42
		CP 08	4,55	4,55	4,48	4,48
		CP 09	4,59	4,59	4,39	4,41
		CP 10	4,31	4,31	4,48	4,45
	Exponencial	CP 07	3,67	3,71	3,65	3,80
		CP 08	3,73	3,98	3,43	3,95
		CP 09	3,81	4,19	3,99	3,78
		CP 10	3,52	4,06	4,33	3,90

OBS: CP nº - Solução: CP 07 = H₂SO₄, CP 08 = HCl, CP 09 = HNO₃, CP 10 = NaOH

Os resultados das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos alterados por choque térmico apresentam diminuições expressivas nas duas direções de avaliação com os três pares de transdutores (Tabela 5.31).

Figura 5.47 Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina nos corpos de Granito Cinza Mauá.

Tabela 5.31 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Granito Cinza Mauá submetidos à alteração por choque térmico.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	54 kHz	CP 11	4,50	3,45	4,36	3,26
		CP 12	4,58	3,52	4,75	3,80
		Média	4,54	3,48	4,55	3,53
		C. V.	0,01	0,02	0,06	0,11
	150 kHz	CP 11	4,50	3,31	4,36	2,97
		CP 12	4,74	3,37	4,78	3,19
		Média	4,62	3,34	4,57	3,08
		C. V.	0,04	0,01	0,07	0,05
	Exponencial	CP 11	3,917	2,955	3,767	2,702
		CP 12	4,053	2,715	4,093	2,794
		Média	3,99	2,83	3,93	2,75
		C. V.	0,02	0,06	0,06	0,02

Os valores médios adquiridos com os transdutores de 54 kHz e 150 kHz são próximos, apresentando maior discrepância se comparados aos adquiridos com os exponenciais.

O comportamento e diferenças entre os valores iniciais e finais são muito similares comparando-se os três pares de transdutores (Figura 5.48).

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz foram de -1,06 km/s para os dois corpos na direção perpendicular e -1,10 a -0,95 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -1,20 e -1,36 km/s na direção perpendicular e de -1,39 e -1,59 km/s na paralela. Os transdutores exponenciais apresentaram variações entre -0,96 e -1,34 km/s na direção perpendicular e -1,06 e -1,30 km/s na paralela.

Figura 5.48 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após alteração por choque térmico nos corpos de Granito Cinza Mauá.

5.2.8 Resistência superficial por esclerometria

A Tabela 5.32 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à névoa salina.

Das três amostras avaliadas duas apresentaram valores médios de resistência inferiores ao da amostra de referência, apenas o corpo 3 apresentou valores mais elevados.

A Figura 5.49 apresenta gráfico com os valores obtidos, onde é possível observar que o corpo de prova de referência apresenta as leituras com maior resistência, no entanto sua amostragem contém em sua maioria valores abaixo dos adquiridos para a amostra 3.

A Tabela 5.33 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à câmara de SO₂.

Nessa avaliação, os corpos 4 e 6 apresentaram valores da resistência inferiores aos obtidos no corpo de referência. A amostra 5, opondo-se às demais, apresenta valores superiores à referência.

Os valores obtidos na avaliação dos corpos expostos ao SO₂ podem ser observados em ordem crescente no gráfico da Figura 5.50.

A Tabela 5.34 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

As amostras imersas parcialmente nos ácidos sulfúrico, clorídrico e nítrico mostraram valores da resistência superiores aos obtidos no corpo de referência, apenas a amostra imersa em hidróxido de sódio apresentou valores muito similares ou inferiores a referência.

A Figura 5.51 mostra o gráfico com os valores obtidos na resistência superficial para os corpos submetidos à imersão parcial em ordem crescente.

A Tabela 5.35 apresenta a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à alteração por choque térmico.

Os corpos 11 e 12 mostraram valores inferiores aos obtidos no corpo de referência. Os valores das resistências adquiridos nesses corpos estão expostos no gráfico da Figura 5.52 em ordem crescente.

Tabela 5.32 – Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Cinza Mauá expostos à névoa salina.

Resistência	Referência	CP01	CP02	CP03
Média (MPa)	21,9	14,7	14,0	23,1
Máximo (MPa)	39,2	21,7	25,7	31,1
Mínimo (MPa)	10,8	8,1	9,5	16,2

Figura 5.49 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Cinza Mauá expostos à névoa salina.

Tabela 5.33 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Cinza Mauá expostos à câmara de SO₂.

Resistência	Referência	CP04	CP05	CP06
Média (MPa)	21,9	17,1	24,0	14,6
Máximo (MPa)	39,2	31,1	39,2	24,4
Mínimo (MPa)	10,8	10,8	17,6	8,1

Figura 5.50 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Cinza Mauá expostos à câmara de SO₂.

Tabela 5.34 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Cinza Mauá submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Resistência	Referência	CP07	CP08	CP09	CP 10
Média (MPa)	21,9	26,4	24,3	23,0	18,3
Máximo (MPa)	39,2	35,2	31,1	32,5	25,0
Mínimo (MPa)	10,8	17,6	14,9	13,5	10,0

OBS: CP nº - Solução: CP 07 = H₂SO₄, CP 08 = HCl, CP 09 = HNO₃, CP 10 = NaOH

Figura 5.51 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Cinza Mauá submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.35 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Granito Cinza Mauá expostos à alteração por choque térmico.

Resistência	Referência	CP11	CP12
Média (MPa)	21,9	18,1	10,7
Máximo (MPa)	39,2	25,7	18,9
Mínimo (MPa)	10,8	12,2	8,1

Figura 5.52 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Granito Cinza Mauá submetidos à alteração por choque térmico.

5.2.9 Determinação da cor por espectrofotometria

A Figura 5.53 mostra imagens obtidas com auxílio de scanner antes e após exposição à névoa salina. Observou-se suave clareamento nas amostras de acordo com as imagens.

A Figura 5.54 mostra imagens obtidas com scanner antes e após exposição ao SO₂. Neste caso também se observou aspecto mais claro das amostras após ensaio de alteração.

A Figura 5.55 mostra imagens obtidas com scanner antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Neste caso foi controlada a alteração da face de referência, previamente determinada, e registrado o aspecto de uma das laterais do corpo, onde a base da imagem corresponde a região totalmente imersa em solução e o topo a região de ascensão capilar.

Todas as faces de referência apresentaram clareamento, ocorrendo amarelamento nos corpos submetidos a soluções ácidas, e clareamento do corpo imerso em solução alcalina.

Figura 5.53 – Coloração apresentada pelos corpos 1 a 3 do Granito Cinza Mauá antes e após exposição à névoa salina.

Figura 5.54 - Coloração apresentada pelos corpos 4 a 6 do Granito Cinza Mauá antes e após exposição ao SO₂.

Figura 5.55 - Coloração apresentada pelos corpos 7 a 10 do Granito Cinza Mauá antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Esquerda, face antes da imersão; centro, face imersa na solução; direita, face lateral do corpo ao final do período de imersão. A base da imagem refere-se à zona imersa e o topo à zona de capilaridade.

A maior variação ocorreu nas laterais dos corpos. O corpo 7, imerso em ácido sulfúrico, mostrou perda de coloração com suave amarelamento no topo e na base, ocorrendo o surgimento de uma faixa larga no centro da face com amarelamento muito evidente.

O corpo 8, imerso em ácido clorídrico, apresentou forte amarelamento em quase todo o corpo, sendo menos expressivo na base.

O corpo de prova 9, imerso em ácido nítrico, apresentou maior amarelamento na base e baixa alteração de cor no topo. Observou-se a formação de uma faixa de cor amarela mais marcada que acompanhava a altura de ascensão capilar da solução na amostra.

No corpo 10 foi observado leve clareamento da face lateral em toda sua área.

A Figura 5.56 mostra imagens obtidas com scanner antes e após choque térmico. Neste caso também se observa aspecto mais claro das amostras após ensaio de alteração e aspecto mais alaranjado em alguns pontos.

Figura 5.56 - Coloração apresentada pelos corpos 11 e 12 do Granito Cinza Mauá antes e após choque térmico.

A Figura 5.57 mostra a dispersão no plano a^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos do Granito Cinza Mauá submetidos às alterações por névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Observando os pontos relativos às leituras efetuadas após ensaio de névoa salina e SO_2 notou-se que a variação ocorrida em relação a avaliação inicial, em média, é muito sutil, com acréscimos no parâmetro b^* em ambos os casos, o que confirma amarelamento das amostras. Nos corpos submetidos ao choque térmico ocorreu variação no parâmetro b^* , similar aos outros ensaios, e maiores valores de a^* .

Figura 5.57 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Cinza Mauá submetidos à névoa salina, SO_2 e choque térmico.

A Figura 5.58 apresenta a mesma dispersão para as áreas avaliadas nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Desses corpos o que apresentou menor alteração cromática foi o imerso em hidróxido de sódio, com valores de a^* muito similares aos iniciais, e acréscimo no parâmetro b^* .

Dos corpos submetidos aos ácidos, ocorreu o amarelamento em todos os corpos e áreas de medida, confirmados pelo aumento do parâmetro b^* , com destaque para os corpos imersos nos ácidos sulfúrico e nítrico.

A maior variação do parâmetro a^* ocorreu no corpo em contato com ácido clorídrico, especificamente nas leituras efetuadas nas laterais, onde a zona emersa apresentou maior alteração nas leituras efetuadas. Também se destacaram as alterações ocorridas nas faixas detectadas nos corpos submetidos aos ácidos sulfúrico e nítrico.

A Figura 5.59 mostra a dispersão no plano L^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos do Granito Cinza Mauá submetidos à névoa salina, SO_2 e

choque térmico. Notou-se no gráfico o aumento médio do parâmetro L^* nas leituras realizadas nos ensaios de névoa salina e SO_2 , o que confirma clareamento da superfície das amostras.

Dos corpos imersos em soluções ácidas e alcalina, as leituras realizadas no corpo em contato com hidróxido de sódio foram os que menos se alteraram nesse parâmetro, apresentando pequena redução em alguns pontos de leitura. Em análise geral os corpos submetidos aos ácidos apresentam ampla variação no parâmetro L^* (Figura 1.60).

A Tabela 5.36 apresenta o resultado dos cálculos do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado nos corpos do Granito Cinza Mauá, mostrando a alteração cromática ocorrida nos corpos em cada região analisada.

Figura 5.58 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Cinza Mauá submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Figura 5.59 - Dispersão no plano L^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Cinza Mauá submetidos à névoa salina, SO_2 e choque térmico para observação da variação do parâmetro L^* .

Figura 5.60 - Dispersão no plano L^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de Granito Cinza Mauá submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para observação da variação do parâmetro L^* .

Tabela 5.36 – Valores médios de L* a* e b* e cálculo do ΔE , efetuados antes e após ensaios de alteração nas áreas avaliadas dos corpos de Granito Cinza Mauá.

Agente de alteração/área avaliada	Inicial			Final			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
Névoa Salina				71,8	-0,8	1,8	4,3
SO ₂				72,3	-0,8	2,2	4,9
Choque Térmico				69,3	0,3	3,7	4,4
H ₂ SO ₄ Referência				69,5	-0,5	4,4	5,1
H ₂ SO ₄ Zona Imersa				72,1	0,0	6,5	8,0
H ₂ SO ₄ Faixa				67,1	0,9	12,1	12,8
H ₂ SO ₄ Zona Emersa				67,6	-0,2	7,3	7,8
HCl Referência				73,5	-0,4	4,3	7,1
HCl Zona Imersa	68,3	-0,7	-0,5	70,7	-0,1	5,8	6,8
HCl Zona Emersa				63,6	1,1	16,0	17,2
HNO ₃ Referência				65,2	-0,3	4,9	6,3
HNO ₃ Zona Imersa				68,8	0,1	7,1	7,7
HNO ₃ Faixa				65,9	0,9	13,1	13,9
HNO ₃ Zona Emersa				67,2	-0,7	2,9	3,6
NaOH Referência				63,4	-0,7	0,9	5,1
NaOH Zona Imersa				66,4	-0,7	1,2	2,5
NaOH Zona Emersa				67,5	-0,7	1,6	2,2

5.3 Monzonito Preto Piracaia

5.3.1 Alterações e reações constatadas durante os ensaios

Na observação em lupa dos corpos expostos à névoa salina, foi notada formação de incrustação de sal e fragmentos de biotita nas arestas inferiores dos corpos (Figura 5.61).

Os corpos submetidos ao SO₂ não apresentaram alterações detectáveis visualmente após os ciclos de exposição.

Na imersão parcial em soluções ácidas e alcalina ocorreu a formação superficial de sais, eflorescências, nos corpos em contato com o ácido sulfúrico e hidróxido de sódio (Figura 5.62).

Os materiais das eflorescências foram coletados e submetidos à difração de raios X para determinação composicional.

A reação do ácido sulfúrico com o Monzonito Preto Piracaia gerou eflorescências de sulfato de alumínio e potássio dodecahidratado ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2(\text{H}_2\text{O})_{12}$), halotriquitita ($\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) conforme difratograma apresentado na Figura 5.63. O sulfato de alumínio e potássio dodecahidratado e a halotriquitita tem origem provável na reação da solução ácida com a biotita, e a gipsita na reação com plagioclásio.

O contato com o hidróxido de sódio (Figura 5.64) gerou carbonatos, thermonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e wegscheiderita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{NaHCO}_3$), formados por reações entre o CO_2 atmosférico e a solução alcalina.

Outra reação observada foi a desagregação de biotita ocorrida no corpo exposto ao hidróxido de sódio.

No ensaio de choque térmico foram observadas fraturas nos corpos, visíveis somente durante ensaios de absorção de água (Figura 5.65).

Figura 5.61 – Imagem mostrando incrustação de sal com biotita, ocorridos na aresta inferior de corpo do Monzonito Preto Piracaia exposto à névoa salina. A imagem foi invertida devido ao seu posicionamento na câmara.

Figura 5.62 - Formação superficial de sais nas amostras do Monzonito Preto Piracaia expostas ao ácido sulfúrico (esquerda) e hidróxido de sódio (direita).

Figura 5.63 - Difratoograma das eflorescências formadas no Monzonito Preto Piracaia durante imersão parcial em ácido sulfúrico.

Figura 5.64 - Difratoograma das eflorescências formadas no Monzonito Preto Piracaia durante imersão parcial em hidróxido de sódio.

Figura 5.65 - Fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico, evidenciado durante absorção de água em corpo do Monzonito Preto Piracaia.

5.3.2 Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico

A análise em microscópio petrográfico de lâminas delgadas dos corpos submetidos a ensaio de alteração do Monzonito Preto Piracaia detectou alterações somente na lâmina referente ao choque térmico.

Nas Figuras 5.66 e 5.67 podem ser observadas fraturas de cristais de quartzo ocorridas no ensaio.

Figura 5.66 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do Monzonito Preto Piracaia (polarizadores descruzados).

Figura 5.67 - Micrografia em mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do Monzonito Preto Piracaia em cristais de quartzo (Qtz) (polarizadores cruzados).

5.3.3 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 5.37 contém os resultados obtidos de densidade, porosidade e absorção de água das amostras expostas à névoa salina. Observa-se redução dessas características em todos os corpos ensaiados tanto nos valores médios como individuais.

A amostra 1 apresentou a maior variação de densidade de 2%, seguida pelo corpo 2, 1% e a amostra 3 não obteve variação significativa.

Na aquisição da porosidade, a maior alteração ocorre no corpo 2, 42%, enquanto os corpos 1 e 3 apresentam redução de 23% e 22% respectivamente. A absorção de água apresentou variações muito próximos aos da porosidade em todas as amostras.

Tabela 5.37 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Monzonito Preto Piracaia antes e após exposição à névoa salina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	CP 01	2860	2796	0,51	0,39	0,18	0,14
	CP 02	2847	2817	0,44	0,25	0,15	0,09
	CP 03	2833	2824	0,38	0,29	0,13	0,10
Máximo		2860	2824	0,51	0,39	0,18	0,14
Mínimo		2833	2796	0,38	0,25	0,13	0,09
Média		2847	2812	0,44	0,31	0,15	0,11
Coeficiente de Variação		0,005	0,005	0,15	0,23	0,15	0,23

Os corpos submetidos à câmara de SO₂ também apresentaram reduções médias nos três índices avaliados, apresentando variações muito pouco expressivas na densidade e 27% de queda na porosidade e absorção de água (Tabela 5.38).

Individualmente, ocorreu aumento na densidade em um corpo e redução em dois, todos com variações inferiores a 1%. Nos valores da porosidade e absorção de água, as alterações foram maiores, onde a amostra 5 têm redução de 37% na porosidade e 36% na

absorção de água. Essas mesmas avaliações apresentaram variação de 17% nos dois índices para o corpo 4 e 28% e 29% no 6, respectivamente.

Tabela 5.38 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Monzonito Preto Piracéia antes e após exposição à atmosfera saturada de SO₂.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	CP 04	2849	2837	0,36	0,30	0,13	0,11
	CP 05	2853	2831	0,31	0,20	0,11	0,07
	CP 06	2838	2853	0,39	0,28	0,14	0,10
Máximo		2853	2853	0,39	0,30	0,14	0,11
Mínimo		2838	2831	0,31	0,20	0,11	0,07
Média		2847	2840	0,35	0,26	0,12	0,09
Coeficiente de Variação		0,003	0,004	0,11	0,21	0,11	0,21

Nos corpos submetidos às soluções ácidas e a alcalina observou-se diminuição da densidade naqueles expostos aos ácidos sulfúrico e nítrico, ambas inferiores a 1%. O corpo imerso em ácido clorídrico não apresentou variação, já o submetido ao hidróxido de sódio teve incremento da densidade em 1% (Tabela 5.39).

Ocorreu a redução da porosidade e absorção de água nas amostras em contato com os reagentes: ácido clorídrico, ácido nítrico e hidróxido de sódio, dentre eles a maior alteração ocorreu com o exposto ao hidróxido de sódio, variação de 41% na porosidade e 42% na absorção de água. A variação nas amostras foi muito semelhante nas duas características nos corpos submetidos aos ácidos clorídrico e nítrico, 7% e aproximadamente 15%, respectivamente.

A amostra parcialmente imersa em ácido sulfúrico não mostrou alterações de porosidade e absorção de água.

Tabela 5.39 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Monzonito Preto Piracaia antes e após ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
H₂SO₄	CP 07	2854	2846	0,50	0,50	0,18	0,18
HCl	CP 08	2844	2844	0,39	0,36	0,14	0,13
HNO₃	CP 09	2844	2841	0,35	0,29	0,12	0,10
NaOH	CP 10	2807	2844	0,30	0,18	0,11	0,06

Os corpos alterados pelo choque térmico não apresentaram variações de densidade significativas e tiveram aumentos semelhantes da porosidade e absorção de água, aproximadamente 39% na amostra 11 e 27% na 12 (Tabela 5.40).

Tabela 5.40 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Monzonito Preto Piracaia antes e após ensaio de choque térmico.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	CP 11	2847	2842	0,35	0,49	0,12	0,17
	CP 12	2845	2844	0,37	0,47	0,13	0,16
Média		2846	2843	0,36	0,48	0,13	0,17
Coeficiente de Variação		0,001	0,000	0,03	0,03	0,03	0,03

5.3.4 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 5.41 apresenta os resultados da absorção de água por capilaridade das amostras expostas à névoa salina durante as 72 horas. Na avaliação ocorreu aumento da absorção no corpo 1 (8%) e redução nos corpos 2 e 3 (13 e 11%), respectivamente).

Tabela 5.41 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após exposição à névoa salina para o Monzonito Preto Piracaia.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 01 - Antes	19,3	19,3	57,9	77,2	154,3	231,5	250,8
CP 01 - Depois	19,3	57,9	77,2	77,2	173,6	231,5	270,1
CP 02 - Antes	18,8	18,8	37,6	56,4	75,2	94,0	150,3
CP 02 - Depois	0,0	37,6	37,6	37,6	75,2	112,7	131,5
CP 03 - Antes	57,0	57,0	57,0	76,0	114,0	133,0	171,0
CP 03 - Depois	0,0	19,0	19,0	38,0	76,0	133,0	152,0

A Figura 5.68 apresenta o gráfico da absorção de água por capilaridade, onde é possível observar o comportamento da absorção de água ao longo do tempo de ensaio. Destaca-se no gráfico o comportamento do corpo de prova 1, que apresenta elevada absorção em relação aos demais. Outro fator observado é o comportamento das curvas antes e após alteração muito próximas, ocorrendo alternância na absorção para mais e para menos ao longo do ensaio.

Figura 5.68 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo (s^{1/2}) dos corpos de Monzonito Preto Piracaia antes e após exposição à névoa salina.

Na avaliação dos corpos expostos à câmara de SO_2 observou-se o aumento da absorção de água por capilaridade nos corpos 4 e 6, enquanto ocorre redução de absorção na amostra 5 (Tabela 5.42).

O incremento de absorção nas amostras 4 e 6 foi de 13 e 11% respectivamente, e a redução ocorrida no corpo 5 foi de 17%.

Na Figura 5.69 observa-se que as absorções de água são baixas e que as curvas da etapa prévia apresentam comportamento e valores muito similares aos obtidos após alteração durante as 72 horas de ensaio.

Tabela 5.42 - Valores da absorção de água em g/m^2 obtidos antes e após exposição à câmara de SO_2 para o Monzonito Preto Piracaia.

Corpo	Absorção de Água (g/m^2)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 04 - Antes	21,0	21,0	42,0	63,0	104,9	125,9	167,9
CP 04 - Depois	42,0	42,0	63,0	63,0	125,9	146,9	188,9
CP 05 - Antes	40,7	40,7	40,7	40,7	101,8	101,8	122,1
CP 05 - Depois	0,0	0,0	20,4	20,4	61,1	81,4	101,8
CP 06 - Antes	38,9	58,3	58,3	97,1	155,4	155,4	174,8
CP 06 - Depois	58,3	58,3	77,7	77,7	116,6	155,4	194,3

Figura 5.69 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($\text{s}^{1/2}$) dos corpos de Monzonito Preto Piracaia antes e após exposição à câmara saturada de SO_2 .

A avaliação da absorção de água por capilaridade constatou decréscimo em todos os corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. As variações obtidas nas amostras em ordem decrescente foram: 63% para a exposta no ácido nítrico, 50,0% no ácido clorídrico, 29% no hidróxido de sódio e 25% no ácido sulfúrico (Tabela 5.43).

A análise gráfica mostra o comportamento da absorção de água das amostras, onde a partir das 3 horas de ensaio, as curvas das avaliações iniciais e finais apresentam comportamentos distintos, destacando-se a maior absorção do corpo 7 entre 3 e 6 horas de ensaio (Figura 5.70).

Tabela 5.43 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para o Monzonito Preto Piracaia.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 07 - Antes	19,8	39,6	59,3	59,3	138,5	217,6	237,4
CP 07 - Depois	39,6	59,3	59,3	118,7	138,5	178,0	178,0
CP 08 - Antes	0,0	0,0	39,6	39,6	118,9	138,7	158,5
CP 08 - Depois	19,8	39,6	39,6	59,4	59,4	59,4	79,2
CP 09 - Antes	19,3	19,3	19,3	38,6	77,2	115,8	154,3
CP 09 - Depois	38,6	38,6	38,6	38,6	38,6	57,9	57,9
CP 10 - Antes	0,0	18,6	18,6	37,2	92,9	111,5	130,1
CP 10 - Depois	18,6	37,2	37,2	55,8	74,4	92,9	92,9

A absorção de água por capilaridade dos corpos alterados por choque térmico apresentou aumento médio de 100%, onde a variação dos corpos foi de 125% para a amostra 11 e 75% para a 12 (Tabela 5.44).

A Figura 5.71 mostra o comportamento da absorção de água por capilaridade nos corpos 11 e 12, onde é visível o comportamento similar das amostras nas duas etapas. Observa-se também o incremento da absorção na avaliação final logo nos primeiros minutos de ensaio, apresentando maior estabilidade após 24 horas.

Figura 5.70 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Monzonito Preto Piracaia antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.44 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após choque térmico para o Monzonito Preto Piracaia.

Corpo	Absorção de Água (g/m²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 11 - Antes	0,0	0,0	38,7	38,7	77,4	135,4	154,8
CP 11 - Depois	116,1	154,8	174,1	232,1	328,9	328,9	348,2
CP 12 - Antes	22,1	22,1	44,1	44,1	88,2	132,4	176,5
CP 12 - Depois	132,4	176,5	198,5	242,7	308,8	308,8	308,8

Figura 5.71 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/cm^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Monzonito Preto Piracaia antes e após choque térmico.

5.3.5 Índice de resistência ao carregamento pontual (*Point load test*)

A Tabela 5.45 apresenta os resultados do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Monzonito Preto Piracaia.

Verificou-se menor resistência média para os corpos expostos à nevoa salina, apresentando redução de 0,3 MPa (17%) em relação à média dos corpos não submetidos à alteração.

Os valores máximos adquiridos mostraram redução de 0,1 MPa (5%) e os mínimos apresentaram de 0,7 MPa (50%).

Os valores do desvio padrão e coeficiente de variação apresentam melhores resultados na avaliação após alteração após exclusão do corpo discrepante.

Tabela 5.45 - Resultados obtidos na determinação do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Monzonito Preto Piracaia. Comparativo das amostras não alteradas com as expostas à névoa salina.

Amostra	Índice de Resistência - $I_{s(50)}$ (Mpa)	
	Não alteradas	Expostas à névoa salina
1	1,5	1,8
2	1,9	1,2
3	1,9	0,7
4	1,5	1,6
5	1,8	1,4
6	1,7	1,6
7	1,9	1,5
8	1,8	1,4
9	1,7	1,4
10	1,4	1,4
Média	1,7	1,4
Máximo	1,9	1,8
Mínimo	1,4	0,7
Desvio Padrão	0,2	0,3
Coefficiente de Variação	0,12	0,20

5.3.6 Absorção de água por tubo de Karsten

A absorção de água por tubo de Karsten do Monzonito Preto Piracaia apresentou nas avaliações prévia às alterações, resultados muito baixos, variando entre 0,05 e 0,10 ml após 5 horas de ensaio, em todos os corpos de prova, tornando o ensaio susceptível a falhas considerando que a precisão mínima de leitura do tubo de Karsten é de 0,05 ml.

Esse fator pode ter contribuído para comportamentos de aumento ou diminuição da absorção de água nas amostras, no entanto mostrou-se satisfatório nas avaliações dos corpos submetidos às alterações por imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, e choque térmico.

A Figura 5.72 apresenta os resultados da absorção nos corpos expostos à névoa salina, onde a amostra 1 obtém aumento de 100%, ou seja, 0,05 ml, enquanto os demais corpos não mostram mudanças.

Das amostras submetidas ao SO₂, ocorre a redução da absorção de 50% no corpo 4, acréscimo de 100% no corpo 5 e o corpo 6 não apresenta variações (Figura 5.73).

Os corpos imersos parcialmente em ácido sulfúrico, ácido nítrico e hidróxido de sódio apresentam um aumento da absorção em 100%, 0,05 ml, enquanto o corpo submetido ao ácido clorídrico não mostrou alterações (Figura 5.74).

A absorção de água por tubo de Karsten mostrou-se mais eficiente para essa rocha nos corpos alterados por choque térmico que tiveram aumento significativo da absorção, 400% na amostra 11 e 500 % na 12 (Figura 5.75).

Figura 5.72 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à névoa salina em corpos do Monzonito Preto Piracaia.

Figura 5.73 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à câmara de SO₂ em corpos do Monzonito Preto Piracaia.

Figura 5.74 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina em corpos do Monzonito Preto Piracaia.

Figura 5.75 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após choque térmico em corpos do Monzonito Preto Piracaia.

5.3.7 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A Tabela 5.46 apresenta os resultados obtidos na determinação da velocidade de onda ultrassônica nas direções perpendicular e paralela à foliação da rocha para os corpos do Monzonito Preto Piracaia expostos à névoa salina.

As velocidades adquiridas com os transdutores de 54 kHz e 150 kHz apresentam valores médios aproximados, tanto nas avaliações iniciais quanto finais, apresentando aumento das velocidades.

Nota-se também pequena discrepância na avaliação na direção perpendicular após exposição à névoa salina adquirida com os transdutores de 150 kHz, obtendo-se redução de velocidade adquirida no corpo de prova 2.

Os valores adquiridos com os transdutores exponenciais se afastam consideravelmente na avaliação prévia à alteração, apresentando resultados mais consistentes após exposição.

Tabela 5.46 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Monzonito Preto Piracaia expostos à névoa salina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	54 kHz	CP 01	4,59	4,90	4,65	4,84
		CP 02	4,86	4,93	4,97	5,19
		CP 03	4,65	4,93	4,66	4,97
		Máximo	4,86	4,93	4,97	5,19
		Mínimo	4,59	4,90	4,65	4,84
		Média	4,70	4,92	4,76	5,00
		C. V.	0,03	0,00	0,04	0,04
	150 kHz	CP 01	4,59	5,00	4,59	4,90
		CP 02	4,80	4,56	4,86	5,15
		CP 03	4,56	4,71	4,72	5,00
		Máximo	4,80	5,00	4,86	5,15
		Mínimo	4,56	4,56	4,59	4,90
		Média	4,65	4,76	4,72	5,02
		C. V.	0,03	0,05	0,03	0,02
	Exponencial	CP 01	4,07	5,27	3,80	4,30
		CP 02	4,03	4,44	3,94	4,93
		CP 03	3,68	4,38	4,46	4,35
		Máximo	4,07	5,27	4,46	4,93
		Mínimo	3,68	4,38	3,80	4,30
		Média	3,93	4,70	4,06	4,53
		C. V.	0,05	0,11	0,09	0,08

A Figura 5.76 mostra as variações das velocidades adquiridas em cada corpo de prova, onde nota-se um comportamento mais estável na aquisição das velocidades realizadas com os transdutores de 54 kHz, pois ocorre aumento em todas as avaliações.

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre 0,06 e 0,31 km/s na direção perpendicular e 0,19 a 0,31 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -0,24 e 0,41 km/s na direção perpendicular e de 0,28 a 0,31 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre 0,41 e 1,21 km/s na direção perpendicular e -0,10 e 0,99 km/s na paralela.

Figura 5.76 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à névoa salina nos corpos de Monzonito Preto Piracaia.

Na Tabela 5.47 são apresentados os resultados obtidos nas avaliações efetuadas nos corpos de prova expostos ao SO_2 . Observando os valores médios obtidos com os transdutores de 54 e 150 kHz é verificado o aumento das velocidades, fator que ocorre de forma inversa nos transdutores exponenciais.

A Figura 5.77 mostra as variações das velocidades adquiridas em cada corpo de prova, onde o corpo de prova 5 apresenta pouca alteração e redução das velocidades adquiridas com os transdutores de 54 e 150 kHz nas duas direções de avaliação.

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -0,07 e 0,30 km/s na direção perpendicular e -0,03 a 0,23 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -0,03 e 0,27 km/s na direção perpendicular e de -0,03 a 0,36 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre -0,64 e 0,48 km/s na direção perpendicular e -0,70 e 0,73 km/s na paralela.

Tabela 5.47 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Monzonito Preto Piracaia expostos à câmara de SO₂.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	54 kHz	CP 01	4,69	4,99	4,57	4,80
		CP 02	4,97	4,90	4,93	4,90
		CP 03	4,91	5,01	4,76	4,92
		Máximo	4,97	5,01	4,93	4,92
		Mínimo	4,69	4,90	4,57	4,80
		Média	4,86	4,97	4,75	4,87
		C. V.	0,03	0,01	0,04	0,01
	150 kHz	CP 01	4,76	5,03	4,51	4,77
		CP 02	4,97	4,93	4,93	4,90
		CP 03	4,94	5,16	4,64	4,99
		Máximo	4,97	5,16	4,93	4,99
		Mínimo	4,76	4,93	4,51	4,77
		Média	4,89	5,04	4,69	4,88
		C. V.	0,02	0,02	0,05	0,02
	Exponencial	CP 01	4,59	3,95	3,77	4,50
		CP 02	4,31	4,79	4,54	4,31
		CP 03	4,76	4,13	3,62	2,91
		Máximo	4,76	4,79	4,54	4,50
		Mínimo	4,31	3,95	3,62	2,91
		Média	4,55	4,29	3,97	3,91
		C. V.	0,05	0,10	0,12	0,22

Figura 5.77 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à câmara de SO₂ nos corpos de Monzonito Preto Piracaia.

A Tabela 5.48 apresenta os resultados das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Usando os transdutores de 150 kHz observa-se o aumento das velocidades nas duas direções nos corpos imersos nos ácidos sulfúrico, clorídrico e nítrico e redução na amostra exposta ao hidróxido de sódio. Com os transdutores de 54 kHz esse comportamento se repete, excetuando a leitura da amostra alterada por ácido nítrico que tem queda da velocidade obtida na direção paralela.

Os transdutores exponenciais apresentaram aumento das velocidades na direção perpendicular e divergência no comportamento na paralela.

Tabela 5.48 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Monzonito Preto Piracaia submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Imersão Parcial	54 kHz	CP 07	4,61	4,67	4,77	4,84
		CP 08	4,57	4,78	4,71	4,98
		CP 09	5,11	5,18	4,88	4,75
		CP 10	5,13	5,02	4,79	4,70
	150 kHz	CP 07	4,58	4,73	4,80	4,80
		CP 08	4,48	4,75	4,68	4,98
		CP 09	5,11	5,22	4,57	4,81
		CP 10	5,13	5,06	4,76	4,73
	Exponencial	CP 07	4,22	3,99	4,08	4,17
		CP 08	3,68	4,05	4,15	4,05
		CP 09	4,06	4,50	4,19	4,17
		CP 10	4,43	5,15	4,17	4,35

A Figura 5.78 mostra os valores das variações das velocidades obtidas antes e após a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, onde percebe-se o comportamento mais estável dos transdutores de 150 kHz.

Figura 5.78 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina nos corpos de Monzonito Preto Piracaia.

Os corpos alterados por choque térmico apresentam redução das velocidades nas duas direções de leitura com os três pares de transdutores, sendo que novamente os transdutores de 54 e 150 kHz apresentam resultados similares, enquanto ocorre maior distanciamento dos valores obtidos com os exponenciais (Tabela 5.49).

Tabela 5.49 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Monzonito Preto Piracaia submetidos à alteração por choque térmico.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	54 kHz	CP 11	4,62	4,29	4,66	4,54
		CP 12	4,62	4,46	4,70	4,55
		Média	4,62	4,37	4,68	4,54
		C. V.	0,00	0,03	0,01	0,00
	150 kHz	CP 11	4,65	4,21	4,60	4,35
		CP 12	4,62	4,32	4,67	4,43
		Média	4,63	4,26	4,63	4,39
		C. V.	0,00	0,02	0,01	0,01
	Exponencial	CP 11	3,917	2,813	3,767	2,511
		CP 12	4,053	4,146	4,093	3,997
		Média	3,99	3,48	3,93	3,25
		C. V.	0,02	0,27	0,06	0,32

A Figura 5.79 mostra as variações das velocidades adquiridas nos corpos alterados por choque térmico. Observa-se a melhor estabilidade e aproximação dos valores obtidos com os transdutores de 54 e 150 kHz nas duas direções de avaliação.

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -0,15 e -0,33 km/s na direção perpendicular e -0,12 a -0,15 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -0,30 e -0,43 km/s na direção perpendicular e de -0,23 a -0,25 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre -1,10 e 0,09 km/s na direção perpendicular e -1,26 e -0,10 km/s na paralela.

Figura 5.79 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após alteração por choque térmico nos corpos de Monzonito Preto Piracaia.

5.3.8 Resistência superficial por esclerometria

As Tabelas 5.50 a 5.53 apresentam os resultados médios, valores máximos e mínimos obtidos na determinação da resistência superficial com o martelo de Schmidt para os corpos do Monzonito Preto Piracaia alterados por névoa salina, SO_2 , imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, e choque térmico, respectivamente.

Nessas tabelas é possível visualizar que os resultados obtidos na amostra de referência, não alterada, apresentaram-se em todos os casos superiores aos corpos de prova submetidos a ensaios de alteração.

As Figuras 5.80 a 5.83 mostram, na mesma ordem, gráficos com todos os valores adquiridos em ordem crescente, onde observa-se o comportamento de cada corpo de prova frente à amostra de referência.

Tabela 5.50 – Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia expostos à névoa salina.

Resistência	Referência	CP01	CP02	CP03
Média (MPa)	35,0	20,9	15,8	19,5
Máximo (MPa)	43,3	28,4	25,7	32,5
Mínimo (MPa)	29,8	14,9	10,8	8,1

Figura 5.80 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Monzonito Preto Piracaia expostos à névoa salina.

Tabela 5.51 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia expostos à câmara de SO₂.

Resistência	Referência	CP04	CP05	CP06
Média (MPa)	35,0	15,8	12,8	25,5
Máximo (MPa)	43,3	23,0	27,1	33,8
Mínimo (MPa)	29,8	8,1	8,1	18,9

Figura 5.81 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Monzonito Preto Piracaia expostos à câmara de SO₂.

Tabela 5.52 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Resistência	Referência	CP07	CP08	CP09	CP 10
Média (MPa)	35,0	25,2	23,1	25,2	21,5
Máximo (MPa)	43,3	31,1	33,8	35,2	27,0
Mínimo (MPa)	29,8	16,2	8,1	10,8	15,0
OBS: CP nº- Solução: CP 07 = H ₂ SO ₄ , CP 08 = HCl, CP 09 = HNO ₃ , CP 10 = NaOH

Figura 5.82 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Monzonito Preto Piracaia submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.53 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia expostos à alteração por choque térmico.

Resistência	Referência	CP11	CP12
Média (MPa)	35,0	25,5	12,0
Máximo (MPa)	43,3	33,8	17,6
Mínimo (MPa)	29,8	18,9	8,1

Figura 5.83 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Monzonito Preto Piracaia submetidos à alteração por choque térmico.

5.3.9 Determinação da cor por espectrofotometria

A Figura 5.84 mostra imagens obtidas com auxílio de scanner antes e após exposição à névoa salina. Observa-se aparente amarelamento da amostra 3.

A Figura 5.85 mostra imagens obtidas com scanner antes e após exposição ao SO_2 . Neste caso não é possível a detecção visual de alterações.

A Figura 5.86 mostra imagens obtidas com scanner antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Neste caso foi controlada a alteração da face de referência, previamente determinada, e registrado o aspecto de uma das laterais do corpo, onde a base da imagem corresponde a região totalmente imersa em solução e o topo a região de ascensão capilar.

Todas as faces de referência apresentaram clareamento nos corpos submetidos a soluções ácidas, e o corpo imerso em solução alcalina apresentou sutil escurecimento.

A maior diferença de coloração ocorreu nas laterais dos corpos. O corpo 7, imerso em ácido sulfúrico, mostra perda de coloração no topo e não se altera expressivamente na base. Nesse mesmo corpo ocorreu o surgimento de uma faixa no centro da face com amarelamento muito evidente.

O corpo 8, imerso em ácido clorídrico, apresentou região mais clara no topo e mais escura na base.

O corpo de prova 9, imerso em ácido nítrico, apresentou coloração mais clara no topo e mais escura na base. Observou-se a formação de uma faixa de cor amarela mais marcada que acompanhava a altura de ascensão capilar da solução na amostra.

No corpo 10 não foi possível observar alterações cromáticas.

A Figura 5.87 mostra imagens obtidas com scanner antes e após choque térmico. Neste caso também se observou aspecto mais escuro das amostras após ensaio de alteração.

Figura 5.84 – Coloração apresentada pelos corpos 1 a 3 do Monzonito Piracaia antes e após exposição à névoa salina.

Figura 5.85 - Coloração apresentada pelos corpos 4 a 6 do Monzonito Piracaia antes e após exposição ao SO₂.

Figura 5.86 - Coloração apresentada pelos corpos 7 a 10 do Monzonito Piracaia antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Esquerda, face antes da imersão; centro, face imersa na solução; direita, face lateral do corpo ao final do período de imersão. A base da imagem refere-se à zona imersa e o topo à zona de capilaridade.

Figura 5.87 - Coloração apresentada pelos corpos 11 e 12 do Monzonito Piracaia antes e após choque térmico.

A Figura 5.88 mostra a dispersão no plano a^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia submetidos às alterações por névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Observando os pontos relativos às leituras efetuadas após ensaio de névoa salina, SO_2 e choque térmico, constatou-se que a alteração ocorrida em relação à avaliação inicial, ocorreu no parâmetro b^* , apresentando poucos pontos com variações no parâmetro a^* .

A Figura 5.89 apresenta a mesma dispersão para as áreas avaliadas nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Desses corpos, o que apresentou menor alteração cromática foi o imerso em hidróxido de sódio, com valores de a^* um pouco acima dos iniciais, e apresentando maior variação em b^* .

Dos corpos submetidos aos ácidos, as faces de referência apresentaram valores muito aproximados com os dos corpos não alterados. A maior variação ocorreu nas leituras efetuadas nas laterais, onde o corpo exposto ao ácido sulfúrico e a faixa ocorrida na amostra do ácido nítrico, foram os que mais se alteraram em b^* , apresentando aumento dos valores deste parâmetro. Em a^* a variação é sutil para a maioria dos corpos, sendo mais evidente na zona emersa do corpo alterado por ácido sulfúrico.

Figura 5.88 - Dispersão no plano a*b* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia submetidos à névoa salina, SO₂ e choque térmico.

Figura 5.89 - Dispersão no plano a*b* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

A Figura 5.90 mostra a dispersão no plano L*b* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia expostos à névoa salina, SO₂ e

choque térmico, para estes ensaios os valores de L^* obtidos apresentaram-se muito próximos à avaliação inicial.

Figura 5.90 - Dispersão no plano L^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia submetidos aos ensaios de névoa salina, SO_2 e choque térmico para observação da variação do parâmetro L^* .

A Figura 5.91 mostra a mesma dispersão para os corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, onde destacou-se o clareamento ocorrido com o corpo submetido ao ácido sulfúrico.

A Tabela 5.54 apresenta o resultado dos cálculos do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado nos corpos do Monzonito Preto Piracaia, mostrando a alteração cromática ocorrida nos corpos em cada região analisada.

Figura 5.91 - Dispersão no plano L*b* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do Monzonito Preto Piracaia submetidos ao ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para observação da variação do parâmetro L*.

Tabela 5.54 – Valores médios de L* a* e b* e cálculo do ΔE, efetuados antes e após ensaios de alteração nas áreas avaliadas dos corpos de Monzonito Preto Piracaia.

Agente de alteração/área avaliada	Inicial			Final			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
Névoa Salina				52,9	-1,3	1,0	1,0
SO ₂				54,2	-1,5	2,2	2,8
Choque Térmico				53,5	-1,2	1,6	1,9
H ₂ SO ₄ Referência				60,5	-1,3	3,1	8,7
H ₂ SO ₄ Zona Imersa				64,6	-1,2	4,7	13,1
H ₂ SO ₄ Faixa				48,5	-1,5	3,5	5,2
H ₂ SO ₄ Zona Emersa				61,7	-0,8	9,3	13,1
HCl Referência				54,6	-1,5	2,4	3,2
HCl Zona Imersa	52,4	-1,4	0,1	56,5	-1,4	2,3	4,6
HCl Zona Emersa				49,1	-1,7	1,6	3,6
HNO ₃ Referência				55,5	-1,2	2,2	3,8
HNO ₃ Zona Imersa				58,4	-1,1	2,8	6,6
HNO ₃ Faixa				56,2	-1,4	10,8	11,4
HNO ₃ Zona Emersa				52,1	-1,2	1,1	1,1
NaOH Referência				48,3	-1,1	0,7	4,1
NaOH Zona Imersa				46,6	-1,1	1,0	5,9
NaOH Zona Emersa				50,5	-1,2	0,8	2,0

5.4 Gnaiss Facoidal

5.4.1 Alterações constatadas durante os ensaios

Na observação em lupa dos corpos expostos à névoa salina, observou-se que ocorreu acúmulo de sal na superfície dos corpos. Na figura 5.92 é possível visualizar cristais de NaCl na superfície das biotitas.

Os corpos submetidos ao SO₂ não apresentaram alterações detectáveis visualmente após os ciclos de exposição.

Figura 5.92 - Acúmulo de sal na superfície, destacando-se biotita em corpo do Gnaiss Facoidal exposto à névoa salina.

Na imersão parcial em soluções ácidas e alcalina ocorreu a formação superficial de eflorescências nos corpos em contato com o ácido sulfúrico e hidróxido de sódio (Figura 5.93).

Os materiais das eflorescências foram coletados e submetidos à análise de difratometria de raios X para determinação composicional.

A reação do ácido sulfúrico com o Gnaiss Facoidal (Figura 5.94) gerou eflorescências de halotriquita ($\text{FeAl}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$), rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A formação da halotriquita e da gipsita ocorre a partir da reação da solução com biotita e

plagioclásio. A rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) foi gerada pela disponibilidade de ferro presente em biotita e anfibólio.

Figura 5.93 - Formação superficial de sais nas amostra do Gnaiss Facoidal expostas ao ácido sulfúrico (esquerda) e hidróxido de sódio (direita).

Figura 5.94 - Difratoograma das eflorescências formadas no Gnaiss Facoidal durante imersão parcial em ácido sulfúrico.

A reação com o hidróxido de sódio com o CO_2 atmosférico gerou carbonatos: thermonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) - Figura 5.95.

No ensaio de choque térmico não foram visualizadas alterações nos corpos de Gnaiss Facoidal.

Figura 5.95 - Difratograma das eflorescências formadas no Gnaiss Facoidal durante imersão parcial em hidróxido de sódio.

5.4.2 Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico

Das lâminas do Gnaiss Facoidal preparadas para observação das alterações, apenas a referente ao ensaio de choque térmico apresentou alterações detectáveis e passíveis de serem atribuídas ao procedimento.

As Figuras 5.96 e 5.97 mostram o fraturamento formado em cristais de quartzo, ocorridos principalmente nos contatos com outros minerais.

Figura 5.96 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do Gnaiss Facoidal (polarizadores descruzados).

Figura 5.97 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico nos cristais de quartzo (Qtz) em amostra do Gnaiss Facoidal (polarizadores descruzados).

5.4.3 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 5.55 apresenta os resultados obtidos de densidade, porosidade e absorção de água das amostras expostas à névoa salina. Observa-se divergência do comportamento entre os corpos quanto à porosidade e absorção de água. Os valores da densidade se alteraram muito pouco, sendo considerado desprezível o aumento de 0,1% ocorrido nos corpos 1 e 2.

Na porosidade e absorção de água ocorreu aumento de 4% nos dois índices para a amostra 1, e queda de 4% e 19% nos corpos 2 e 3, respectivamente.

Tabela 5.55 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Gnaiss Facoidal antes e após exposição à névoa salina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	CP 01	2682	2684	0,68	0,71	0,25	0,26
	CP 02	2694	2697	0,67	0,65	0,25	0,24
	CP 03	2675	2675	0,74	0,60	0,28	0,23
Máximo		2694	2697	0,74	0,71	0,28	0,26
Mínimo		2675	2675	0,67	0,60	0,25	0,23
Média		2684	2685	0,70	0,65	0,26	0,24
Coeficiente de Variação		0,003	0,004	0,05	0,08	0,06	0,08

Nos corpos expostos ao SO₂ ocorreu aumento da densidade em 1% para a amostra 6, enquanto os demais corpos não mostraram alterações relevantes (Tabela 5.56).

Porosidade e absorção de água do corpo 4 não apresenta alterações, enquanto os corpos 5 e 6 têm redução nos dois índices de 7 e 13% respectivamente.

Nos corpos de prova alterados pela imersão parcial em soluções ácidas e alcalina ocorreu diminuição da densidade em todas as amostras, sendo que nas submetidas aos ácidos sulfúrico, clorídrico e nítrico, essa alteração foi desprezível, e 1% na amostra imersa em hidróxido de sódio (Tabela 5.57).

A porosidade e absorção de água obtiveram acréscimo para o corpo alterado por ácido sulfúrico de 8% nos dois índices, enquanto os demais apresentaram redução, 15% para o ácido clorídrico, 3% para o ácido nítrico e 17% para o hidróxido de sódio.

Nos corpos alterados por choque térmico ocorreu redução da densidade de 0,2% para os dois corpos de prova avaliados (Tabela 5.58). Os resultados da porosidade e absorção de água apresentaram aumento de 26% e 25%, respectivamente, para a amostra 11, e de 25% nos dois índices para a amostra 12.

Tabela 5.56 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Gnaiss Facoidal antes e após exposição à atmosfera saturada de SO₂.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	CP 04	2696	2695	0,62	0,62	0,23	0,23
	CP 05	2706	2706	0,74	0,69	0,28	0,26
	CP 06	2672	2699	0,74	0,65	0,28	0,24
Máximo		2706	2706	0,74	0,69	0,28	0,26
Mínimo		2672	2695	0,62	0,62	0,23	0,23
Média		2691	2700	0,70	0,65	0,26	0,24
Coeficiente de Variação		0,006	0,002	0,10	0,06	0,11	0,05

Tabela 5.57 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Gnaiss Facoidal antes e após ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
H ₂ SO ₄	CP 07	2704	2698	0,65	0,70	0,24	0,26
HCl	CP 08	2684	2683	0,71	0,60	0,26	0,23
HNO ₃	CP 09	2697	2693	0,87	0,85	0,32	0,31
NaOH	CP 10	2701	2682	0,63	0,52	0,23	0,19

Tabela 5.58 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água para o Gnaisse Facoidal antes e após ensaio de choque térmico.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	CP 11	2697	2692	0,66	0,83	0,25	0,31
	CP 12	2695	2689	0,76	0,95	0,28	0,35
Média		2696	2690	0,71	0,89	0,26	0,33
Coeficiente de Variação		0,001	0,001	0,10	0,09	0,10	0,10

5.4.4 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade da exposição à névoa salina apresentou aumento em todas as amostras avaliadas, obtendo média de 38% de variação. Individualmente os corpos apresentaram aumento de 39%, 40% e 35%, respectivamente (Tabela 5.59).

A Figura 5.98 apresenta o gráfico da absorção de água por capilaridade, onde é possível observar o comportamento semelhante da absorção de água nas amostras ao longo do tempo de ensaio.

Tabela 5.59 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após exposição à névoa salina para o Gnaisse Facoidal.

Corpo	Absorção de Água (g/m²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 01 - Antes	94,0	94,0	112,8	150,3	244,3	319,5	338,3
CP 01 - Depois	133,0	171,0	171,0	228,0	361,0	418,0	475,0
CP 02 - Antes	57,2	76,3	95,4	133,5	209,9	267,1	286,2
CP 02 - Depois	57,6	96,1	96,1	134,5	269,0	345,8	403,4
CP 03 - Antes	76,8	96,1	134,5	153,7	249,7	307,4	326,6
CP 03 - Depois	94,0	131,5	131,5	169,1	338,2	394,6	432,2

Figura 5.98 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de Gnaiss Facoidal antes e após exposição à névoa salina.

Da mesma forma que na exposição à nevoa salina, os corpos submetidos à alteração por SO_2 também apresentam acréscimo da absorção de água por capilaridade após as 72 horas de ensaio. A variação média da absorção foi de 58%, enquanto os resultados individuais para os corpos 4, 5 e 6 foram respectivamente 57%, 60% e 56% (Tabela 5.60).

A Figura 5.99 mostra o comportamento da absorção de água por capilaridade nos corpos 4, 5 e 6, onde é visível o comportamento similar das amostras antes e após alteração por SO_2 .

Tabela 5.5.60 - Valores da absorção de água em g/m^2 obtidos antes e após exposição câmara de SO_2 para o Gnaiss Facoidal.

Corpo	Absorção de Água (g/m^2)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 04 - Antes	76,0	95,0	114,0	133,0	209,0	247,0	266,0
CP 04 - Depois	114,0	114,0	133,0	190,0	285,0	323,0	418,0
CP 05 - Antes	96,1	134,5	153,7	172,9	230,5	288,2	288,2
CP 05 - Depois	76,8	115,3	134,5	153,7	269,0	403,4	461,1
CP 06 - Antes	75,2	112,7	112,7	169,1	225,5	300,7	300,7
CP 06 - Depois	94,0	112,7	131,5	187,9	338,2	451,0	469,8

Figura 5.99 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo (s^{1/2}) dos corpos de Gnaiss Facoidal antes e após exposição à câmara saturada de SO₂.

Dos corpos de prova submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, apresentaram aumento da absorção de água por capilaridade os imersos em ácido sulfúrico, ácido clorídrico e hidróxido de sódio, apresentando variação de 41%, 7% e 43% respectivamente, o único que apresentou redução da absorção foi o exposto ao ácido nítrico que variou em 12% (Tabela 5.61).

A Figura 5.100 mostra o comportamento da absorção de água por capilaridade nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.61 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para o Gnaiss Facoidal.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 07 - Antes	94,2	113,1	131,9	169,6	226,1	301,5	320,3
CP 07 - Depois	169,6	150,7	207,3	263,8	414,5	433,4	452,2
CP 08 - Antes	76,5	95,7	95,7	133,9	229,6	267,8	287,0
CP 08 - Depois	133,9	133,9	172,2	172,2	248,7	267,8	306,1
CP 09 - Antes	172,7	211,0	249,4	326,1	479,6	498,8	498,8
CP 09 - Depois	172,7	230,2	249,4	326,1	422,0	441,2	441,2
CP 10 - Antes	56,7	75,6	113,4	132,3	188,9	245,6	264,5
CP 10 - Depois	94,5	113,4	151,2	207,8	321,2	359,0	377,9

Figura 5.100 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo (s^{1/2}) dos corpos de Gnaiss Facoidal antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalinas.

Os corpos alterados por choque térmico apresentaram absorção de água por capilaridade expressiva, apresentando variação de 94% na amostra 11 e 48% na 12 (Tabela 5.62)

A Figura 1.101 mostra o gráfico do comportamento da absorção de água por capilaridade nos corpos 11 e 12, onde é notado que a absorção máxima após alteração é muito próxima entre amostras.

Tabela 5.62 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após choque térmico para o Gnaiss Facoidal.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 11 - Antes	80,5	120,8	120,8	161,0	241,5	301,9	322,0
CP 11 - Depois	181,1	261,6	342,1	422,6	623,9	623,9	623,9
CP 12 - Antes	115,4	134,7	173,1	230,8	327,0	404,0	442,4
CP 12 - Depois	153,9	211,6	250,1	288,5	596,3	634,8	654,0

Figura 5.101 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo (s¹/²) dos corpos de Gnaiss Facoidal antes e após choque térmico.

5.4.5 Índice de resistência ao carregamento pontual (*Point load test*)

A Tabela 5.63 apresenta os resultados do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Gnaiss Facoidal em duas direções de análise, perpendicular e paralela ao bandamento da rocha.

Verificou-se menor resistência média na direção perpendicular para os corpos expostos à nevoa salina, apresentando redução de 0,3 MPa (38%) em relação à média dos corpos não submetidos à alteração.

No entanto nessa direção de análise, as avaliações contaram apenas com três corpos, dois sem alteração e um exposto à névoa salina, o que não permitiu aquisição de dados representativos para a análise. A mesma foi executada apenas para visualização dos resultados.

Tabela 5.63 - Resultados obtidos na determinação do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Gnaiss Facoidal. Comparativo das amostras não alteradas com as expostas à névoa salina nas direções paralelas e ortogonais à foliação.

Amostra	Índice de Resistência - $I_{s(50)}$ (Mpa)			
	Direção	Não alteradas	Direção	Expostas à Névoa Salina
1	Perpendicular	1,0	Paralela	0,7
2	Paralela	0,4	Perpendicular	0,5
3	Perpendicular	0,6	Paralela	0,4
4	Paralela	0,6	Paralela	0,6
5	Paralela	0,6	Paralela	0,7
6	Paralela	0,6	Paralela	0,6
7	Paralela	0,9	Paralela	0,4
Perpendicular	Média	0,8		0,5
	Máximo	1,0		0,5
	Mínimo	0,6		0,5
	Desv. Padrão	0,2		0
	C. Variação	0,3		0
Paralelo	Média	0,6		0,6
	Máximo	0,9		0,7
	Mínimo	0,4		0,4
	Desv. Padrão	0,2		0,1
	C. Variação	0,3		0,2

A amostragem mais representativa foi realizada na direção paralela, onde a resistência média adquirida nas duas etapas foi a mesma, 0,6 MPa.

Os valores máximos adquiridos mostraram redução de 0,2 MPa (29%) e os mínimos apresentaram valores idênticos.

Os valores do desvio padrão e coeficiente de variação são mais representativos na avaliação após alteração.

5.4.6 Absorção de água por tubo de Karsten

A absorção de água por tubo de Karsten dos corpos de prova expostos à nevoa salina mostrou redução nas amostras 1 e 2, variando 40% e 33%, respectivamente. O corpo de prova 3 não apresentou alteração na absorção entre a avaliação inicial e final (Figura 5.102).

As amostras submetidas à alteração por SO₂ apresentaram redução da absorção de água por tubo de Karsten nos corpos de prova 5 e 6, variando 50% e 40% respectivamente. O corpo de prova 4 não apresentou alteração na absorção entre a avaliação inicial e final (Figura 5.103).

Figura 5.102 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à névoa salina em corpos do Gnaiss Facoidal.

Figura 5.103 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à câmara de SO_2 em corpos do Gnaiss Facoidal.

As amostras submetidas à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina não apresentaram alterações nas absorções de água adquiridas pelo ensaio do tubo de Karsten,

apresentando em todos os casos os mesmos valores, tanto nas avaliações prévias, quanto nas posteriores ao ensaio de alteração (Figura 5.104).

Os corpos de prova alterados por choque térmico foram os que obtiveram a maior variação na absorção de água por tubo de Karsten, 300% em ambas as amostras, embora tenham apresentado absorções iniciais distintas (Figura 5.105).

Figura 5.104 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina em corpos do Gnaiss Facoidal.

Figura 5.105 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após choque térmico em corpos do Gnaiss Facoidal.

5.4.7 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A Tabela 5.64 apresenta os resultados obtidos na determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas direções perpendicular e paralela à foliação da rocha para os corpos do Gnaiss Facoidal expostos à névoa salina.

Os transdutores de 150 kHz apresentaram redução das velocidades em todos os corpos nas duas direções de avaliação, enquanto os transdutores de 54 kHz e exponenciais adquiriram valores positivos e negativos.

Observa-se também expressiva diferença entre os resultados obtidos entre as direções de análise, fator justificado pela orientação evidente do Gnaiss Facoidal, conferindo às amostras comportamento anisotrópico.

A Figura 5.106 apresenta as variações das velocidades adquiridas em cada corpo de prova, onde é observado o melhor comportamento do transdutor de 150 kHz

As variações das velocidades determinadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -0,26 e 0,16 km/s na direção perpendicular e -0,09 a 0,16 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -0,46 e -0,16 km/s na direção perpendicular e de -0,55 a -0,16 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre -0,10 e 0,69 km/s na direção perpendicular e 0,00 e 1,37 km/s na paralela.

Na Tabela 5.65 são apresentados os resultados obtidos nas avaliações efetuadas nos corpos de prova expostos ao SO₂. Os transdutores de 54 kHz e de 150 kHz apresentam resultados médios relativamente próximos antes de serem submetidos à alteração. No entanto, ocorre aumento dos valores das médias das velocidades para os transdutores de 54 kHz nas duas direções. Nas leituras com os transdutores de 150 kHz e exponenciais ocorre o oposto, ocasionando em redução das médias das velocidades.

A Figura 5.107 mostra as variações das velocidades adquiridas em cada corpo de prova, onde é possível visualizar o comportamento de aumento das velocidades nas avaliações efetuadas com os transdutores de 54 kHz e a redução com os demais pares de transdutores.

Tabela 5.64 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Gnaisse Facoidal expostos à névoa salina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	54 kHz	CP 01	3,51	3,26	4,03	3,94
		CP 02	3,35	3,09	3,93	3,91
		CP 03	3,30	3,46	3,74	3,90
		Máximo	3,51	3,46	4,03	3,94
		Mínimo	3,30	3,09	3,74	3,90
		Média	3,39	3,27	3,90	3,92
		C. V.	0,03	0,06	0,04	0,01
	150 kHz	CP 01	3,56	3,10	4,45	3,90
		CP 02	3,23	2,97	3,91	3,58
		CP 03	3,53	3,36	3,90	3,61
		Máximo	3,56	3,36	4,45	3,90
		Mínimo	3,23	2,97	3,90	3,58
		Média	3,44	3,15	4,09	3,70
		C. V.	0,05	0,06	0,08	0,05
	Exponencial	CP 01	2,76	2,65	3,13	3,88
		CP 02	1,67	2,37	3,19	3,19
		CP 03	2,86	2,78	1,80	3,17
		Máximo	2,86	2,78	3,19	3,88
		Mínimo	1,67	2,37	1,80	3,17
		Média	2,43	2,60	2,71	3,41
		C. V.	0,27	0,08	0,29	0,12

Figura 5.106 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à névoa salina nos corpos de Gnaiss Facoidal.

Tabela 5.65 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Gnaiss Facoidal expostos à câmara de SO₂.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	54 kHz	CP 04	3,55	3,64	4,20	4,22
		CP 05	3,14	3,38	3,81	3,91
		CP 06	3,47	3,81	3,84	4,12
		Máximo	3,55	3,81	4,20	4,22
		Mínimo	3,14	3,38	3,81	3,91
		Média	3,39	3,61	3,95	4,09
		C. V.	0,06	0,06	0,05	0,04
	150 kHz	CP 04	3,62	3,51	4,35	4,35
		CP 05	3,10	3,09	4,02	3,89
		CP 06	3,45	3,39	4,01	3,69
		Máximo	3,62	3,51	4,35	4,35
		Mínimo	3,10	3,09	4,01	3,69
		Média	3,39	3,33	4,13	3,97
		C. V.	0,08	0,07	0,05	0,08
	Exponencial	CP 04	3,15	2,45	3,31	2,85
		CP 05	1,66	2,33	3,66	3,56
		CP 06	3,14	2,79	3,49	3,06
		Máximo	3,15	2,79	3,66	3,56
		Mínimo	1,66	2,33	3,31	2,85
		Média	2,65	2,52	3,49	3,16
		C. V.	0,32	0,09	0,05	0,11

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre 0,09 e 0,34 km/s na direção perpendicular e 0,02 a 0,28 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -0,11 e -0,01 km/s na direção perpendicular e de -0,32 a 0,00 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre -0,70 e 0,68 km/s na direção perpendicular e -0,46 e -0,11 km/s na paralela.

A Tabela 5.66 apresenta os resultados das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Figura 5.107 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à câmara de SO₂ nos corpos de Gnaiss Facoidal.

Os resultados adquiridos nos corpos de prova imersos em ácido sulfúrico e hidróxido de sódio apresentaram redução da velocidade nas avaliações efetuadas com os três pares de transdutores nas duas direções de análise. Os demais corpos mostraram comportamentos variados entre os transdutores e direções, gerando inconsistência nos dados.

A Figura 5.108 mostra os valores da variação das velocidades obtidas antes e após a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para cada corpo de prova.

Tabela 5.66 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidas nos corpos de prova Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Imersão Parcial	54 kHz	CP 07	3,45	3,24	4,02	3,91
		CP 08	3,49	3,72	3,87	4,00
		CP 09	2,75	2,80	3,19	3,27
		CP 10	3,35	3,27	3,91	3,91
	150 kHz	CP 07	3,47	3,16	3,93	3,75
		CP 08	3,83	3,70	3,94	3,91
		CP 09	2,75	2,57	3,31	3,21
		CP 10	3,38	3,22	3,85	3,60
	Exponencial	CP 07	3,00	2,66	3,68	3,11
		CP 08	3,22	3,28	3,69	3,41
		CP 09	2,47	2,27	2,92	2,94
		CP 10	2,85	2,65	3,54	3,11

Figura 5.108 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina nos corpos de Gnaiss Facoidal.

Os corpos alterados por choque térmico apresentam redução das velocidades nas duas direções de leitura e para os três pares de transdutores, os transdutores de 54 e 150 kHz apresentam resultados aproximados, enquanto ocorre maior discrepância na obtenção dos dados com os transdutores exponenciais (Tabela 5.67).

As variações das velocidades tomadas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -0,73 e -0,44 km/s na direção perpendicular e -0,61 a -0,23 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -1,46 e -0,29 km/s na direção perpendicular e de -1,12 a -0,51 km/s na paralela. A maior discrepância ocorreu com os transdutores exponenciais com variações entre -1,24 e 0,54 km/s na direção perpendicular e -1,27 e -1,08 km/s na paralela (Figura 1.109).

Tabela 5.67 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de Gnaisse Facoidal submetidos à alteração por choque térmico.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	54 kHz	CP 11	3,51	2,78	4,01	3,40
		CP 12	2,76	2,32	3,26	3,03
		Média	3,13	2,55	3,63	3,21
		C. V.	0,17	0,13	0,14	0,08
	150 kHz	CP 11	3,75	2,29	4,20	3,08
		CP 12	2,62	2,32	3,34	2,83
		Média	3,18	2,31	3,77	2,95
		C. V.	0,25	0,01	0,16	0,06
	Exponencial	CP 11	3,304	2,065	3,863	2,779
		CP 12	2,277	2,813	2,618	1,350
		Média	2,79	2,44	3,24	2,06
		C. V.	0,26	0,22	0,27	0,49

Figura 5.109 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após alteração por choque térmico nos corpos de Gnaisse Facoidal.

5.4.8 Resistência superficial por esclerometria

A resistência superficial do Gnaisse Facoidal foi efetuada em duas direções, perpendicular e paralelamente à foliação, considerando que a rocha apresenta anisotropia.

As Tabelas 5.68 e 5.69 apresentam a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à névoa salina nas direções perpendicular e paralela, respectivamente.

Das três amostras avaliadas, duas apresentaram valores médios de resistência inferiores aos da amostra de referência, apenas o corpo 1 apresentou valores mais elevados em ambas as direções. Nas avaliações na direção perpendicular só foi possível realizar uma única leitura para os corpos 2 e 3, pois a resistência superficial nos outros pontos foi inferior ao mínimo da capacidade de leitura do equipamento. Nas leituras efetuadas na direção paralela também ocorreu a impossibilidade de leitura em alguns pontos nos corpos 2 e 3 pelo mesmo motivo.

Tabela 5.68 – Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Gnaiss Facoidal expostos à névoa salina, avaliados na direção perpendicular.

Resistência	Referência	CP01	CP02	CP03
Média (MPa)	15,1	17,3	9,5	8,1
Máximo (MPa)	20,3	18,9	9,5	8,1
Mínimo (MPa)	9,5	13,5	9,5	8,1

Tabela 5.69 – Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Gnaiss Facoidal expostos à névoa salina, avaliados na direção paralela.

Resistência	Referência	CP01	CP02	CP03
Média (MPa)	15,9	19,0	11,8	10,4
Máximo (MPa)	23,0	25,7	20,3	14,9
Mínimo (MPa)	9,5	9,5	8,1	8,1

As Figuras 5.110 e 5.111 apresentam gráficos com os valores obtidos na resistência superficial por esclerometria nas direções perpendicular e paralela, respectivamente, em ordem crescente, onde é possível observar o comportamento dos corpos expostos à névoa salina.

Figura 5.110 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Gnaiss Facoidal expostos à névoa salina, avaliados na direção perpendicular.

Figura 5.111 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Gnaiss Facoidal expostos à nevoa salina, avaliados na direção paralela.

As Tabelas 5.70 e 5.71 apresentam a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à câmara de SO₂, nas direções perpendicular e paralela, respectivamente. Observa-se que o corpo de prova 4 apresenta valores superiores ao da amostra de referência nas duas direções de avaliação.

As Figuras 5.112 e 5.113 apresentam gráficos com os valores obtidos na resistência superficial por esclerometria nas direções perpendicular e paralela, respectivamente, em ordem crescente, onde é possível observar o comportamento dos corpos submetidos à câmara de SO₂.

Tabela 5.70 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Gnaiss Facoidal expostos à câmara de SO₂, avaliados na direção perpendicular.

Resistência	Referência	CP04	CP05	CP06
Média (MPa)	15,1	18,8	10,8	10,8
Máximo (MPa)	20,3	28,4	10,8	13,5
Mínimo (MPa)	9,5	13,5	10,8	9,5

Tabela 5.71 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Gnaiss Facoidal expostos à câmara de SO₂, avaliados na direção paralela.

Resistência	Referência	CP04	CP05	CP06
Média (Mpa)	15,9	20,3	9,5	14,5
Máximo (Mpa)	23,0	25,7	10,8	27,1
Mínimo (Mpa)	9,5	12,2	8,1	8,1

Figura 5.112 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Gnaiss Facoidal expostos à câmara de SO₂, avaliados na direção perpendicular.

As Tabelas 5.72 e 5.73 apresentam a resistência superficial média e os valores máximos e mínimos obtidos pelo método de esclerometria usando o martelo de Schmidt dos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, nas direções perpendicular e paralela, respectivamente. Destes corpos de prova o de número 7, submetido à alteração por ácido sulfúrico, apresenta média muito próxima à referência nas duas direções de avaliação. Já a amostra 9, exposta a ácido nítrico, apresentou expressiva redução da resistência superficial nas faces da direção perpendicular, onde foi impossível registrar qualquer valor, na direção paralela foi possível determinar apenas um ponto de leitura. Os demais corpos apresentaram resistências em sua maioria inferiores às da referência

Figura 5.113 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Gnaiss Facoidal expostos à câmara de SO₂, avaliados na direção paralela.

As Figuras 5.114 e 5.115 apresentam gráficos com os valores obtidos na resistência superficial por esclerometria nas direções perpendicular e paralela, respectivamente, em ordem crescente, onde é possível observar o comportamento dos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

As avaliações dos corpos de prova alterados por choque térmico não geraram resultados por impossibilidade de aquisição da resistência.

Tabela 5.72 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, avaliados na direção perpendicular.

Resistência	Referência	CP07	CP08	CP09	CP 10
Média (MPa)	15,1	14,9	13,7		9,5
Máximo (MPa)	20,3	20,3	17,6		12,0
Mínimo (MPa)	9,5	10,8	9,5		6,0
OBS: CP nº- Solução: CP 07 = H ₂ SO ₄ , CP 08 = HCl, CP 09 = HNO ₃ , CP 10 = NaOH					

Tabela 5.73 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, avaliados na direção paralela.

Resistência	Referência	CP07	CP08	CP09	CP 10
Média (MPa)	15,9	14,4	14,0	10,8	10,8
Máximo (MPa)	23,0	27,1	18,9	10,8	19,0
Mínimo (MPa)	9,5	9,5	9,5	10,8	6,0

OBS: CP nº- Solução: CP 07 = H₂SO₄, CP 08 = HCl, CP 09 = HNO₃, CP 10 = NaOH

Figura 5.114 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, avaliados na direção perpendicular.

Figura 5.115 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, avaliados na direção paralela.

5.4.9 Determinação da cor por espectrofotometria

As Figuras 5.116 e 5.117 mostram imagens obtidas com auxílio de scanner antes e após exposição à névoa salina e ao SO₂. Em análise visual das imagens não foi possível perceber alterações cromáticas das amostras.

A Figura 5.118 mostra imagens obtidas com scanner antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Neste caso foi controlada a alteração da face de referência, previamente determinada, e registrado o aspecto de uma das laterais do corpo, onde a base da imagem corresponde a região totalmente imersa em solução e o topo a região de ascensão capilar.

Nas faces de referência não foi possível observar alterações visuais em nenhum dos corpos. As diferenças de coloração foram notadas nas laterais dos corpos.

O corpo 7, imerso em ácido sulfúrico, não mostrou alterações visíveis na base, e no topo ocorreu amarelamento bem pronunciado.

O corpo 8, imerso em ácido clorídrico, apresentou amarelamento no topo, fator que não ocorreu na base.

Figura 5.116 – Coloração apresentada pelos corpos 1 a 3 do Gnaiss Facoidal antes e após exposição à névoa salina.

Figura 5.117 - Coloração apresentada pelos corpos 4 a 6 do Gnaiss Facoidal antes e após exposição ao SO_2 .

Figura 5.118 - Coloração apresentada pelos corpos 7 a 10 do Gnaiss Facoidal antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Esquerda, face antes da imersão; centro, face imersa na solução; direita, face lateral do corpo ao final do período de imersão. A base da imagem refere-se à zona imersa e o topo à zona de capilaridade.

O corpo de prova 9, imerso em ácido nítrico, apresentou amarelamento mais evidente no topo e centro, com baixa alteração de cor na base. Observou-se a formação de uma faixa de cor amarela mais marcada que acompanhava a altura de ascensão capilar da solução na amostra.

No corpo 10, imerso em hidróxido de sódio, não foram observadas alterações.

A Figura 1.119 mostra imagens obtidas com scanner antes e após choque térmico. Neste caso foram observadas poucas alterações na cor das amostras, destacam-se nas imagens o surgimento de manchas alaranjadas em alguns pontos dos corpos oriundas de contato com superfícies oxidadas da estufa, portanto não atribuídas a alterações do ensaio.

Figura 5.119 - Coloração apresentada pelos corpos 11 e 12 do Gnaiss Facoidal antes e após choque térmico.

A análise dos corpos do Gnaiss Facoidal por espectrofotometria solicitou a divisão dos pontos em dois grupos de análise. Dessa forma foram avaliados separadamente os porfiroclastos de microclínio dos demais minerais que compõem a rocha.

A Figura 5.120 mostra a dispersão no plano a^*b^* dos valores obtidos por espectrofotometria na análise dos porfiroclastos de Gnaiss Facoidal nos corpos submetidos às alterações por névoa salina, SO_2 e choque térmico.

As leituras efetuadas após os ensaios apresentaram resultados pouco mais elevados em b^* , e no eixo a^* não ocorreram alterações significativas, salvo alguns pontos que se distanciaram consideravelmente.

A Figura 5.121 apresenta a mesma dispersão para as áreas avaliadas nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Desses corpos o que apresentou menor alteração cromática foi o imerso em hidróxido de sódio, com valores muito similares aos iniciais.

Nos corpos submetidos aos ácidos ocorreu o amarelamento, ou seja, aumento do parâmetro b^* , ocorrendo principalmente nas zonas emersas dos corpos submetidos aos ácidos clorídrico e sulfúrico, assim como na faixa apresentada pelo corpo imerso em ácido nítrico.

A maior variação do parâmetro a^* ocorreu na zona emersa do corpo referente ao ácido clorídrico.

A Figura 5.122 mostra a dispersão no plano L^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria sobre os porfiroclastos dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos aos ensaios de névoa salina, SO_2 e choque térmico, onde observa-se que alguns pontos da exposição ao SO_2 apresentam valores pouco mais elevados que os iniciais em L^* , fator que não ocorre nas outras duas alterações.

A maior variação do parâmetro L^* ocorreu com alguns dos pontos de leitura efetuados sobre a faixa no corpo exposto ao ácido nítrico (Figura 5.123). Ocorrem leituras dispersas da área principal, mas são exceções, a maioria dos valores ocorre com similaridade aos valores iniciais.

Figura 5.120 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre os porfiroclastos dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos à névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Figura 5.121 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre os porfiroclastos dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Figura 5.122 - Dispersão no plano L*a*b* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre os porfiroclastos dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos aos ensaios de névoa salina, SO₂ e choque térmico para observação da variação do parâmetro L*.

Figura 5.123 - Dispersão no plano L*a*b* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre os porfiroclastos dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para observação da variação do parâmetro L*.

A Tabela 5.74 apresenta o resultado dos cálculos do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado sobre os porfiroclastos dos corpos de Gnaiss Facoidal, mostrando a alteração cromática ocorrida nos corpos em cada região analisada.

Tabela 5.74 – Valores médios de L^* , a^* e b^* e cálculo do ΔE , efetuados antes e após ensaios de alteração nas áreas avaliadas dos porfiroclastos dos corpos de Gnaiss Facoidal.

Agente de alteração/área avaliada	Inicial			Final			ΔE
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	
Névoa Salina				72,3	1,5	6,1	1,5
SO₂				76,8	1,7	6,1	5,6
Choque Térmico				74,8	1,9	6,6	3,9
H₂SO₄ Referência				70,5	0,4	8,1	3,2
H₂SO₄ Zona Imersa				73,5	1,1	8,0	3,6
H₂SO₄ Zona Emersa				66,8	1,9	14,7	10,5
HCl Referência				69,1	1,5	7,8	3,3
HCl Zona Imersa	71,2	1,6	5,2	73,0	2,4	8,6	4,0
HCl Zona Emersa				69,1	4,9	21,1	16,4
HNO₃ Referência				70,8	0,8	7,1	2,1
HNO₃ Zona Imersa				73,4	2,1	11,7	6,9
HNO₃ Faixa/z. emersa				63,3	1,1	11,0	9,9
NaOH Referência				66,5	2,5	8,1	5,7
NaOH Zona Imersa				66,4	2,2	6,8	5,2
NaOH Zona Emersa				65,6	1,6	5,6	5,7

A Figura 5.124 mostra a dispersão no plano a^*b^* dos valores obtidos por espectrofotometria na análise da matriz do Gnaiss Facoidal nos corpos submetidos às alterações por névoa salina, SO₂ e choque térmico.

As leituras efetuadas após os ensaios apresentaram resultados em média muito próximos aos valores iniciais para os corpos expostos à névoa salina e SO₂. A maior alteração ocorre nos corpos submetidos ao choque térmico, onde ocorre aumento dos valores de a^* e b^* .

A Figura 5.125 apresenta dispersão para as áreas avaliadas nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Ocorreu maior alteração nas zonas emersas dos corpos alterados pelos ácidos sulfúrico e clorídrico, assim como na faixa presente no corpo exposto ao ácido nítrico. As alterações desses corpos apresentaram maior distanciamento com os valores iniciais no eixo b^* , sendo menores no eixo a^* .

Figura 5.124 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre a matriz dos corpos de Gnaiss Facoidal submetidos à névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Figura 5.125 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre a matriz dos corpos de Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

A Figura 5.126 mostra a dispersão no plano L^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria sobre a matriz dos corpos do Gnaiss Facoidal expostos à névoa salina,

SO₂ e choque térmico. Observa-se que alguns valores de L* obtidos nos corpos expostos à névoa salina e SO₂ são mais elevados que a média. 127 mostra a dispersão no plano L*b* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria sobre a matriz dos corpos do Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, onde visualiza-se valores de L* similares aos dos valores das amostras não alteradas, ocorrendo poucos pontos com valores menores ou maiores à região principal.

A Tabela 5.75 apresenta o resultado dos cálculos do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado na matriz dos corpos de Gnaiss Facoidal, mostrando a alteração cromática ocorrida nos corpos em cada região analisada.

Figura 5.126 - Dispersão no plano L*b* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre a matriz dos corpos de Gnaiss Facoidal submetidos aos ensaios de névoa salina, SO₂ e choque térmico para observação da variação do parâmetro L*.

Figura 5.127 - Dispersão no plano L^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria sobre a matriz dos corpos de Gnaiss Facoidal submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para observação da variação do parâmetro L^* .

Tabela 5.75 – Valores médios de L^* , a^* e b^* e cálculo do ΔE , efetuados antes e após ensaios de alteração nas áreas avaliadas sobre a matriz dos corpos de Gnaiss Facoidal.

Agente de alteração/área avaliada	Inicial			Final			ΔE
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	
Névoa Salina				64,9	-0,4	2,0	2,5
SO ₂				68,0	-0,5	1,8	5,6
Choque Térmico				61,6	0,5	4,8	3,2
H ₂ SO ₄ Referência				58,9	0,5	5,1	4,9
H ₂ SO ₄ Zona Imersa				66,4	0,3	6,7	6,4
H ₂ SO ₄ Zona Emersa				62,5	0,8	13,1	11,4
HCl Referência				60,4	0,4	4,4	3,4
HCl Zona Imersa	62,4	-0,3	1,8	62,6	-0,1	4,1	2,4
HCl Zona Emersa				58,8	0,2	11,0	9,9
HNO ₃ Referência				57,1	0,1	4,7	6,1
HNO ₃ Zona Imersa				62,5	-0,3	4,5	2,7
HNO ₃ Faixa/Z. Emersa				63,3	1,1	11,0	9,4
NaOH Referência				53,4	0,0	3,4	9,1
NaOH Zona Imersa				61,6	-0,1	2,4	1,0
NaOH Zona Emersa				61,8	-0,1	2,5	1,0

5.5 Mármore

5.5.1 Alterações constatadas durante os ensaios

Na exposição à névoa salina, foi notado o acúmulo de sal nas arestas inferiores das amostras, ocorrida pelo escoamento da solução pelo corpo (Figura 5.128).

Os corpos submetidos ao SO_2 não apresentaram alterações detectáveis visualmente após os ciclos de exposição, com exceção dos parâmetros cromáticos.

Na imersão parcial em soluções ácidas e alcalina ocorreu a formação superficial de eflorescências nos corpos em contato com o ácido sulfúrico e hidróxido de sódio (Figuras 5.129).

Os materiais das eflorescências foram coletados e submetidos à difratometria de raios X para determinação composicional.

A reação do ácido sulfúrico com o mármore (Figura 5.130) gerou eflorescências de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e baixas quantidades wattervilleíta ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). A formação de gipsita ocorreu pela provável reação entre a solução ácida com cristais de calcita e dolomita, gerada pela lixiviação durante a capilaridade da solução no corpo. A formação da epsomita ocorreu pela reação da solução ácida com a dolomita. Apesar da indicação de wattervilleíta no difratograma de raios X, sua ocorrência é improvável já que não há disponibilidade de sódio na rocha.

A reação com o hidróxido de sódio (Figura 5.131) gerou os carbonatos thermonatrita ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) e trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A formação desses sais ocorre pela reação da solução com os carbonatos presentes na rocha ou com o CO_2 do ambiente.

O ataque ácido ocasionou também corrosão superficial da região imersa, onde durante o tempo de imersão notou-se desagregação de fragmentos de rocha que se depositaram no fundo dos recipientes. Essa ocorrência foi mais agressiva nos corpos em contato com o ácido sulfúrico e clorídrico.

No ensaio de choque térmico não foram visualizadas alterações nos corpos de mármore.

Figura 5.128 - Acúmulo superficial de sal na aresta inferior de corpo de prova do mármore exposto à névoa salina.

Figura 5.129 - Formação superficial de sais nas amostras do mármore expostas ao ácido sulfúrico (esquerda) e hidróxido de sódio (direita).

Figura 5.130 - Difratoograma das eflorescências formadas no mármore durante imersão parcial em ácido sulfúrico.

Figura 5.131 - Difratoograma das eflorescências formadas no mármore durante imersão parcial em hidróxido de sódio.

5.5.2 Análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico

Das lâminas do mármore preparadas para observação das alterações ocorridas nos ensaios de alteração ao microscópio petrográfico, somente a referente ao ensaio de choque térmico apresentou alterações detectáveis pelo procedimento.

Observou-se na análise petrográfica da amostra submetida ao choque térmico fraturamento ocorrido em cristais de carbonato, acompanhando os planos de clivagem (Figuras 5.132).

Figura 5.132 - Fotomicrografia mostrando o fraturamento ocorrido no ensaio de choque térmico em amostra do mármore (polarizadores cruzados).

5.5.3 Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água

A Tabela 5.76 mostra os resultados obtidos de densidade, porosidade e absorção de água das amostras expostas à névoa salina. A alteração da densidade aumentou em menos de 1%.

O comportamento apresentado pelas amostras na determinação da porosidade e absorção de água foi variado, sendo que os corpos 1 e 3 tiveram aumento dessas características na ordem de 10% aproximadamente, enquanto a amostra 2 teve redução também de aproximados 10% tanto para a porosidade quanto para a absorção de água.

Dos corpos submetidos à câmara de SO_2 apenas o corpo 5 apresentou alteração da densidade, tendo a densidade aumentado em 3%.

Nas aquisições de porosidade e absorção de água, os três corpos apresentaram redução. As amostras 4 e 6 tiveram queda de aproximadamente 20% e 30% nos dois índices,

respectivamente, enquanto o corpo 5 obteve diminuição de 9% na porosidade e 11% na absorção de água (Tabela 5.77).

Tabela 5.76 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água no mármore antes e após exposição à névoa salina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	CP 01	2858	2859	0,26	0,29	0,09	0,10
	CP 02	2853	2855	0,27	0,24	0,09	0,08
	CP 03	2852	2862	0,27	0,30	0,09	0,10
Máximo		2858	2862	0,27	0,30	0,09	0,10
Mínimo		2852	2855	0,26	0,24	0,09	0,08
Média		2854	2859	0,27	0,28	0,09	0,10
Coeficiente de Variação		0,001	0,001	0,01	0,11	0,01	0,11

Tabela 5.77 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água no mármore antes e após exposição à atmosfera saturada de SO₂.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	CP 04	2857	2856	0,27	0,21	0,09	0,07
	CP 05	2786	2863	0,24	0,22	0,09	0,08
	CP 06	2857	2857	0,26	0,19	0,09	0,06
Máximo		2857	2863	0,27	0,22	0,09	0,08
Mínimo		2786	2856	0,24	0,19	0,09	0,06
Média		2833	2859	0,26	0,21	0,09	0,07
Coeficiente de Variação		0,015	0,001	0,05	0,09	0,04	0,09

Nos corpos submetidos às soluções ácidas e alcalina observou-se diminuição da densidade na amostra exposta ao ácido sulfúrico, 1%, os demais variam menos de 1% para

mais ou para menos (Tabela 5.78). A porosidade não se alterou no corpo submetido ao ácido sulfúrico, variou negativamente nos corpos imersos em ácido clorídrico e hidróxido de sódio, sendo a redução de 8% e 11%, respectivamente, e a amostra exposta em ácido nítrico apresentou incremento de 9%. Na absorção de água, o corpo em contato com ácido sulfúrico não apresentou alteração, na exposição ao ácido nítrico ocorreu aumento de 10%, as amostras submetidas ao ácido clorídrico e hidróxido de sódio apresentaram redução de 8% e 10%.

Os corpos alterados pelo choque térmico apresentam reduções da densidade inferiores a 1%. Os valores de porosidade e absorção de água alteraram-se significativamente na ordem de 140% no corpo 11 e 160% no 12, em ambos os índices avaliados (Tabela 5.79).

Tabela 5.78 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água no mármore antes e após ensaio de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
H₂SO₄	CP 07	2849	2818	0,29	0,29	0,10	0,10
HCl	CP 08	2849	2846	0,32	0,29	0,11	0,10
HNO₃	CP 09	2851	2839	0,29	0,32	0,10	0,11
NaOH	CP 10	2848	2858	0,23	0,21	0,08	0,07

Tabela 5.79 - Resultados comparativos obtidos no ensaio de determinação da densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água no mármore antes e após ensaio de choque térmico.

Exposição	Corpo	Densidade Aparente		Porosidade Aparente		Absorção de água	
		(kg/m ³)		(%)		(%)	
		Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	CP 11	2851	2844	0,27	0,66	0,10	0,23
	CP 12	2852	2838	0,27	0,70	0,09	0,25
Média		2851	2841	0,27	0,68	0,10	0,24
Coeficiente de Variação		0,000	0,001	0,01	0,05	0,01	0,05

5.5.4 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 5.80 apresenta os resultados da absorção de água por capilaridade das amostras expostas à nevoa salina durante as 72 horas de ensaio. O corpo de prova 1 praticamente não apresenta variação entre a avaliação prévia e posterior à alteração. As amostras 2 e 3 apresentam aumento da absorção de 11 e 25%, respectivamente.

A Figura 5.133 apresenta o gráfico da absorção de água por capilaridade, onde é possível observar o comportamento da absorção de água ao longo do tempo de ensaio. As curvas da absorção prévia e após alteração apresentam comportamento muito semelhante, com menor absorção capilar nas primeiras horas, atingindo valores finais muito próximos dos iniciais.

Tabela 5.80 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após exposição à névoa salina do mármore.

Corpo	Absorção de Água (g/m ²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 01 - Antes	75,7	94,6	94,6	132,4	170,3	170,3	170,3
CP 01 - Depois	57,9	77,2	77,2	96,5	135,0	135,0	173,6
CP 02 - Antes	58,0	77,4	96,7	154,8	174,1	174,1	174,1
CP 02 - Depois	58,1	77,5	77,5	116,2	135,6	174,3	193,7
CP 03 - Antes	38,1	76,2	95,3	114,3	152,4	152,4	152,4
CP 03 - Depois	57,2	76,2	76,2	95,3	152,4	171,5	190,5

Na avaliação dos corpos expostos na câmara de SO₂ não ocorrem variações da absorção de água após 72 horas de ensaio (Tabela 5.81).

A análise gráfica mostra que as curvas de absorção após alteração apresentam comportamento de absorção mais lenta nas primeiras horas de ensaio, embora atinjam os mesmos valores adquiridos na etapa inicial após 72 horas de ensaio (Figura 5.134).

A avaliação da absorção de água por capilaridade efetuada nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina apresentou comportamentos distintos entre as amostras. No corpo 7, alterado em ácido sulfúrico, constatou-se incremento de 9%. Os corpos 8 e 10, expostos em ácido clorídrico e hidróxido de sódio, tiveram queda de 17 e 36% na absorção, respectivamente. O corpo de prova 9, imerso em ácido nítrico, não apresentou alteração da absorção ao final das 72 horas (Tabela 5.82).

A análise gráfica mostra o comportamento da absorção de água das amostras, onde percebe-se o comportamento de estabilidade da absorção, antes e após alteração, passadas 24 horas de ensaio (Figura 5.135).

Figura 5.133 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de mármore antes e após exposição à névoa salina.

Tabela 5.81 - Valores da absorção de água em g/m^2 obtidos antes e após exposição à câmara de SO_2 no mármore.

Corpo	Absorção de Água (g/m^2)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 04 - Antes	57,9	96,5	135,0	135,0	173,6	173,6	173,6
CP 04 - Depois	57,9	77,2	77,2	96,5	154,3	154,3	173,6
CP 05 - Antes	38,7	58,1	77,5	96,9	155,0	155,0	155,0
CP 05 - Depois	38,7	58,1	77,5	96,9	116,2	155,0	155,0
CP 06 - Antes	57,2	76,2	114,3	114,3	152,4	152,4	152,4
CP 06 - Depois	76,2	76,2	76,2	114,3	133,4	152,4	152,4

Figura 5.134 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de mármore antes e após exposição à câmara saturada de SO_2 .

Tabela 5.82 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina no mármore.

Corpo	Absorção de Água (g/m²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 07 - Antes	77,1	115,6	154,1	173,4	173,4	192,6	211,9
CP 07 - Depois	77,1	115,6	154,1	211,9	231,2	231,2	231,2
CP 08 - Antes	97,3	116,7	136,2	175,1	214,0	214,0	233,5
CP 08 - Depois	58,4	77,8	97,3	175,1	194,6	194,6	194,6
CP 09 - Antes	57,3	76,4	95,5	133,7	171,9	171,9	191,0
CP 09 - Depois	57,3	95,5	114,6	171,9	171,9	191,0	191,0
CP 10 - Antes	75,5	94,3	113,2	132,1	188,7	188,7	207,6
CP 10 - Depois	37,7	75,5	75,5	113,2	132,1	132,1	132,1

A absorção de água por capilaridade dos corpos alterados por choque térmico apresentou aumento médio de 195%, onde a variação dos corpos foi de 213% para a amostra 11 e 178% para a 12, confirmando alteração significativa dos corpos de prova para este ensaio (Tabela 5.83).

A Figura 5.136 mostra o comportamento da absorção de água por capilaridade nos corpos 11 e 12, onde é visível o comportamento similar nas duas etapas e a expressiva absorção de água na avaliação final ocorrida ainda nos primeiros minutos de ensaio.

Figura 5.135 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m² em função da raiz do tempo (s^{1/2}) dos corpos de mármore antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Tabela 5.83 - Valores da absorção de água em g/m² obtidos antes e após choque térmico no mármore.

Corpo	Absorção de Água (g/m²)						
	60 min.	120 min.	180 min.	300 min.	1440 min.	2880 min.	4320 min.
CP 11 - Antes	59,2	78,9	78,9	98,7	157,9	157,9	157,9
CP 11 - Depois	434,1	434,1	434,1	434,1	493,3	493,3	493,3
CP 12 - Antes	38,8	77,6	97,0	116,4	155,2	155,2	174,6
CP 12 - Depois	426,8	426,8	446,2	446,2	465,6	465,6	485,0

Figura 5.136 - Gráfico da absorção de água por capilaridade em g/m^2 em função da raiz do tempo ($s^{1/2}$) dos corpos de mármore antes e após choque térmico.

5.5.5 Índice de resistência ao carregamento pontual (*Point load test*)

A Tabela 5.84 apresenta os resultados do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos de mármore.

Verificou-se menor resistência média para os corpos expostos à nevoa salina, apresentando redução de 0,1 MPa (14%) em relação à média dos corpos não submetidos à alteração.

Os valores máximos adquiridos mostraram redução de 0,1 MPa (11%) e os mínimos também apresentaram queda de 0,1 MPa (20%).

Os valores do desvio padrão foram idênticos nas duas avaliações, o coeficiente de variação apresentou melhores resultados nas amostras sem alteração.

Tabela 5.84 - Resultados obtidos na determinação do índice de resistência ao carregamento pontual dos fragmentos do Mármore. Comparativo das amostras não alteradas com as expostas à névoa salina.

Amostra	Índice de Resistência - $I_{s(50)}$ (Mpa)	
	Não alteradas	Expostas à névoa salina
1	0,9	0,8
2	0,6	0,4
3	0,6	0,6
4	0,7	0,7
5	0,5	0,7
6	0,7	0,6
7	0,7	0,6
8	0,8	0,5
9	0,8	0,4
10	0,6	0,5
Média	0,7	0,6
Máximo	0,9	0,8
Mínimo	0,5	0,4
Desvio Padrão	0,1	0,1
Coefficiente de Variação	0,17	0,21

5.5.6 Absorção de água por tubo de Karsten

A absorção de água por tubo de Karsten dos corpos expostos à névoa salina apresentou aumento significativo em todas as amostras. Os corpos de prova 1 e 2 tiveram aumento de 0,15 ml ou 300% de variação, o corpo 3 também teve aumento de 0,15 ml não sendo possível determinar a variação percentual, considerando que este não apresentou absorção na avaliação inicial (Figura 5.137).

Nos corpos alterados por SO₂ também ocorreu aumento significativo em todas as amostras, sendo que o corpo 4 teve acréscimo de 300% e os corpos 2 e 3 obtiveram aumento de 100% na absorção (Figura 5.138).

Os corpos imersos parcialmente em ácido sulfúrico, ácido clorídrico e ácido nítrico apresentaram incremento na absorção de água de 800%, 400% e 200%, respectivamente. O corpo de prova exposto ao hidróxido de sódio não apresentou alteração na absorção após 5 horas de ensaio (Figura 5.139).

A maior diferença obtida na absorção de água por tubo de Karsten ocorreu na avaliação dos corpos alterados no choque térmico, onde obteve-se variação média da absorção de água de 7000%, as alterações individuais foram de 7100% na amostra 11, variando de 0,05 ml para 3,6 ml e 6900% na amostra 12 partindo de 0,05ml para 3,5 ml (Figura 5.140).

Figura 5.137 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à névoa salina em corpos do mármore.

Figura 5.138 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após exposição à câmara de SO₂ em corpos do mármore.

Figura 5.139 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina em corpos do mármore.

Figura 5.140 - Absorção de água por tubo de Karsten efetuada antes e após choque térmico em corpos do mármore.

5.5.7 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A Tabela 5.85 apresenta os resultados obtidos na determinação da velocidade de onda ultrassônica, nas direções perpendicular e paralela à foliação da rocha, para os corpos do mármore expostos à névoa salina.

Nas avaliações efetuadas com os três pares de transdutores ocorre diminuição das velocidades adquiridas nas duas direções de análise, onde as velocidades previamente à alteração realizadas com os transdutores de 54 e 150 kHz são muito similares, fator que não ocorre com os transdutores exponenciais.

Tabela 5.85 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de mármore expostos à névoa salina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Névoa Salina	54 kHz	CP 01	5,93	4,69	6,21	5,05
		CP 02	5,81	4,68	6,16	5,00
		CP 03	6,01	4,54	6,25	4,96
		Máximo	6,01	4,69	6,25	5,05
		Mínimo	5,81	4,54	6,16	4,96
		Média	5,92	4,64	6,21	5,00
		C. V.	0,02	0,02	0,01	0,01
	150 kHz	CP 01	6,08	4,01	6,38	4,28
		CP 02	5,90	3,95	6,38	4,26
		CP 03	6,11	4,22	6,42	4,83
		Máximo	6,11	4,22	6,42	4,83
		Mínimo	5,90	3,95	6,38	4,26
		Média	6,03	4,06	6,39	4,45
		C. V.	0,02	0,04	0,00	0,07
	Exponencial	CP 01	5,19	3,73	5,18	4,10
		CP 02	4,89	4,09	5,36	4,30
		CP 03	4,48	3,87	5,12	4,32
		Máximo	5,19	4,09	5,36	4,32
		Mínimo	4,48	3,73	5,12	4,10
		Média	4,85	3,90	5,22	4,24
		C. V.	0,07	0,05	0,02	0,03

A Figura 5.141 mostra as variações das velocidades adquiridas em cada corpo de prova, onde se observa maior variação obtida pelos transdutores de 150 kHz entre as avaliações iniciais e finais.

As variações das velocidades obtidas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -1,46 e -1,12 km/s na direção perpendicular e -1,29 a -1,16 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -2,07 e -1,89 km/s na direção perpendicular e de -2,10 a -1,59 km/s na paralela. Os transdutores exponenciais obtiveram variações entre -1,46 e -0,61 km/s na direção perpendicular e -1,08 e -0,80 km/s na paralela.

Figura 5.141 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à névoa salina nos corpos de mármore.

Na Tabela 5.86 são apresentados os resultados obtidos nas avaliações efetuadas nos corpos de prova expostos ao SO₂. Novamente ocorreu redução das velocidades nas duas direções para os três pares de transdutores.

Observou-se que os resultados obtidos nas duas direções de avaliação apresentam valores quase idênticos quando adquiridos com os transdutores de 54 e 150 kHz, o que configura o material como isotrópico.

A Figura 5.142 mostra as variações das velocidades adquiridas em cada corpo de prova, onde os transdutores de 150 kHz apresentam novamente a maior variação entre as avaliações iniciais e finais.

As variações das velocidades obtidas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -1,38 e -0,98 km/s na direção perpendicular e -1,45 a -0,88 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -2,03 e -1,88 km/s na direção perpendicular e de -1,97 a -1,76 km/s

na paralela. Os transdutores exponenciais obtiveram variações entre -1,12 e -0,16 km/s na direção perpendicular e -0,98 e -0,70 km/s na paralela.

Tabela 5.86 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de mármore expostos à câmara de SO₂.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
SO ₂	54 kHz	CP 04	6,16	4,81	6,15	4,70
		CP 05	5,98	4,91	6,20	5,32
		CP 06	6,20	5,22	5,99	5,03
		Máximo	6,20	5,22	6,20	5,32
		Mínimo	5,98	4,81	5,99	4,70
		Média	6,11	4,98	6,11	5,02
		C. V.	0,02	0,04	0,02	0,06
	150 kHz	CP 04	6,32	4,42	6,25	4,49
		CP 05	6,13	4,10	6,31	4,48
		CP 06	6,36	4,48	6,09	4,12
		Máximo	6,36	4,48	6,31	4,49
		Mínimo	6,13	4,10	6,09	4,12
		Média	6,27	4,33	6,22	4,37
		C. V.	0,02	0,05	0,02	0,05
	Exponencial	CP 04	5,10	3,97	4,94	4,24
		CP 05	4,64	3,97	5,27	4,28
		CP 06	4,89	4,73	5,06	4,21
		Máximo	5,10	4,73	5,27	4,28
		Mínimo	4,64	3,97	4,94	4,21
		Média	4,88	4,23	5,09	4,24
		C. V.	0,05	0,10	0,03	0,01

A Tabela 5.87 apresenta os resultados da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Em todas as avaliações ocorre redução dos valores das velocidades entre as avaliações iniciais e finais.

As variações mais expressivas são constatadas nos valores adquiridos com os transdutores de 150 kHz, e as velocidades mais discrepantes ocorrem no uso dos transdutores exponenciais (Figura 5.143).

Figura 5.142 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após exposição à câmara de SO₂ nos corpos de mármore.

Tabela 5.87 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de mármore submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Imersão Parcial	54 kHz	CP 07	5,93	4,00	6,08	4,26
		CP 08	5,89	4,01	5,87	3,94
		CP 09	5,97	4,16	6,22	4,43
		CP 10	6,02	4,43	6,34	4,67
	150 kHz	CP 07	6,14	3,66	6,19	3,77
		CP 08	6,03	3,90	6,02	3,66
		CP 09	6,07	3,94	6,33	3,88
		CP 10	6,22	4,40	6,51	4,58
	Exponencial	CP 07	4,78	3,41	4,78	3,44
		CP 08	4,36	3,79	4,43	3,49
		CP 09	3,95	4,33	3,27	4,11
		CP 10	3,35	4,10	3,72	4,01

Figura 5.143 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após imersão parcial em soluções ácidas e alcalina nos corpos de mármore.

Os corpos alterados por choque térmico apresentam redução das velocidades muito expressivas nas duas direções de leitura com os três pares de transdutores, sendo que novamente os transdutores de 54 e 150 kHz apresentam resultados aproximados, enquanto ocorre maior distanciamento com os valores obtidos com os exponenciais (Tabela 5.88).

As maiores variações entre as avaliações iniciais e finais assim como os resultados mais estáveis entre corpos de prova ocorrem com os transdutores de 150 kHz (Figura 5.144).

As variações das velocidades obtidas com os transdutores de 54 kHz ocorreram entre -3,82 e -3,44 km/s na direção perpendicular e -3,89 a -3,49 km/s na paralela. Os transdutores de 150 kHz variaram entre -4,18 e -4,16 km/s na direção perpendicular e de -4,30 a -4,19 km/s na paralela. Os transdutores exponenciais obtiveram variações entre -3,36 a -2,73 km/s na direção perpendicular e -3,34 e -2,61 km/s na paralela.

Tabela 5.88 - Velocidades de ondas ultrassônicas obtidos nos corpos de prova de mármore submetidos à alteração por choque térmico.

Exposição	Transdutores	Corpo	Velocidade km/s			
			Perpendicular		Paralelo	
			Antes	Depois	Antes	Depois
Choque Térmico	54 kHz	CP 11	5,91	2,47	6,00	2,51
		CP 12	5,84	2,02	6,12	2,23
		Média	5,87	2,24	6,06	2,37
		C. V.	0,01	0,14	0,01	0,08
	150 kHz	CP 11	6,11	1,93	6,10	1,91
		CP 12	5,98	1,83	6,33	2,03
		Média	6,05	1,88	6,22	1,97
		C. V.	0,01	0,04	0,03	0,04
	Exponencial	CP 11	4,495	1,770	4,389	1,778
		CP 12	5,114	1,754	5,255	1,918
		Média	2,25	0,88	2,19	0,89
		C. V.	1,41	1,41	1,41	1,41

Figura 5.144 - Gráfico demonstrativo das diferenças entre as velocidades ultrassônicas obtidas antes e após alteração por choque térmico nos corpos de mármore.

5.5.8 Resistência superficial por esclerometria

As Tabelas 5.89 a 5.91 apresentam os resultados médios, valores máximos e mínimos obtidos na determinação da resistência superficial com o martelo de Schmidt para os corpos do mármore alterados por névoa salina, SO₂ e imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, respectivamente.

Nessas tabelas é possível visualizar que os resultados obtidos na amostra de referência apresentaram-se em todos os casos superiores aos corpos de prova submetidos a ensaios de alteração.

A aquisição dos valores de resistência superficial nos corpos alterados por choque térmico não se fez possível, pois as avaliações não atingiram a carga mínima exigida pelo equipamento.

Tabela 5.89 – Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos de mármore expostos à névoa salina.

Resistência	Referência	CP01	CP02	CP03
Média (MPa)	18,1	12,9	10,6	17,1
Máximo (MPa)	25,7	25,7	14,9	23,0
Mínimo (MPa)	13,5	8,1	8,1	9,5

Tabela 5.90 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos de mármore expostos à câmara de SO₂.

Resistência	Referência	CP04	CP05	CP06
Média (MPa)	18,1	16,2	12,2	12,3
Máximo (MPa)	25,7	23,0	21,7	21,7
Mínimo (MPa)	13,5	9,5	8,1	6,8

Tabela 5.91 - Valores médios, máximos e mínimos da determinação da resistência superficial por esclerometria dos corpos de mármore expostos à alteração por choque térmico.

Resistência	Referência	CP07	CP08	CP09	CP 10
Média (MPa)	18,1	12,6	13,0	11,7	9,9
Máximo (MPa)	25,7	20,3	20,3	16,2	17,0
Mínimo (MPa)	13,5	8,1	8,1	8,1	7,0

OBS: CP nº- Solução: CP 07 = H₂SO₄, CP 08 = HCl, CP 09 = HNO₃, CP 10 = NaOH

As Figuras 5.145 a 5.147 mostram, na mesma ordem, gráficos com todos os valores adquiridos em ordem crescente, onde observam-se os comportamentos de cada corpo de prova frente à amostra de referência.

Figura 5.145 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de mármore expostos à nevoa salina.

Figura 5.146 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de mármore expostos à câmara de SO₂.

Figura 5.147 - Valores em ordem crescente da resistência superficial por esclerometria em MPa dos corpos de mármore submetidos a imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

5.5.9 Determinação da cor por espectrofotometria

As imagens do mármore obtidas com auxílio de scanner não apresentaram imagens que permitissem a análise visual entre as avaliações prévias e posteriores às alterações, pois a cor branca da rocha não permitiu controle do brilho sobre as imagens e percepção das mudanças cromáticas, sendo assim os resultados apresentados referem-se somente às avaliações efetuadas com o espectrofotômetro.

A Figura 5.148 mostra a dispersão no plano a^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos de mármore submetidos às alterações por névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Observando-se os pontos relativos às leituras efetuadas após ensaio de névoa salina e SO_2 ficou visível que a variação ocorrida em relação a avaliação inicial, em média, ocorre predominantemente no eixo b^* , com o aumento deste parâmetro. Nos corpos submetidos ao choque térmico ocorreu variação positiva no parâmetro b^* , mais evidente que nos dois outros ensaios, e também nos valores de a^* .

A Figura 5.149 apresenta a mesma dispersão para as áreas avaliadas nos corpos submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina. Observou-se que os valores de

a^* em todos os casos são muito similares aos adquiridos na avaliação inicial, com alguns pontos discrepantes.

No eixo b^* a maioria dos corpos e áreas avaliadas apresentaram valores superiores à avaliação inicial, com destaque para a zona emersa do corpo submetido ao ácido sulfúrico, onde os valores são muito maiores em relação aos demais.

A Figura 5.150 mostra a dispersão no plano L^*b^* dos valores obtidos na análise por espectrofotometria dos corpos de mármore expostos à névoa salina, SO_2 e choque térmico. Nos três casos ocorreram aumento dos valores de L^* , os corpos submetidos ao choque térmico foram os que mais se alteraram nesse parâmetro, seguidos pelos expostos em névoa salina e SO_2 , com resultados muito similares.

A Figura 5.151 mostra a mesma dispersão dos corpos de mármore submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina, onde ocorre aumento dos valores do parâmetro L^* em todas as análises. Observa-se também resultados muito similares entre os reagentes e as regiões analisadas. No entanto nota-se menor variação nos corpos imersos em soluções ácidas e alcalina se comparados às outras alterações.

A Tabela 5.92 apresenta o resultado dos cálculos do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado nos corpos de mármore, mostrando a alteração cromática ocorrida nos corpos em cada região analisada.

Figura 5.148 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do mármore submetidos à névoa salina, SO_2 e choque térmico.

Figura 5.149 - Dispersão no plano a^*b^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do mármore submetidos à imersão parcial em soluções ácidas e alcalina.

Figura 5.150 - Dispersão no plano Lb^* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos do mármore submetidos aos ensaios de névoa salina, SO_2 e choque térmico para observação da variação do parâmetro L^* .

Figura 5.151 - Dispersão no plano L*b* dos pontos analisados por espectrofotometria dos corpos de mármore submetidos aos ensaios de imersão parcial em soluções ácidas e alcalina para observação da variação do parâmetro L*.

Tabela 5.92 – Valores médios de L* a* e b* e cálculo do ΔE , efetuados antes e após ensaios de alteração nas áreas avaliadas dos corpos de mármore.

Agente de alteração/área avaliada	Inicial			Final			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
Névoa Salina				91,1	-1,4	0,7	14,1
SO ₂				90,5	-1,2	0,9	13,5
Choque Térmico				96,5	-0,2	5,1	20,6
H ₂ SO ₄ Referência				85,2	-1,1	0,9	8,5
H ₂ SO ₄ Zona Imersa				85,3	-1,1	1,2	8,8
H ₂ SO ₄ Zona Emersa				83,3	-1,1	8,8	12,8
HCl Referência				84,9	-1,0	0,9	8,3
HCl Zona Imersa	77,4	-1,1	-2,6	83,9	-1,2	1,3	7,5
HCl Zona Emersa				85,6	-1,1	1,3	9,0
HNO ₃ Referência				83,8	-1,2	0,1	6,9
HNO ₃ Zona Imersa				83,0	-1,2	1,0	6,6
HNO ₃ Zona Emersa				84,9	-1,2	0,8	8,2
NaOH Referência				83,4	-1,0	0,9	7,0
NaOH Zona Imersa				82,9	-1,3	0,9	6,5
NaOH Zona Emersa				83,3	-1,3	1,2	7,0

6 Discussão dos resultados

Os ensaios de caracterização e controle adotados nesta pesquisa buscaram adquirir a maior quantidade de dados, nas etapas prévias e posteriores às alterações artificiais empregadas, de uma mesma amostra, almejando assim determinar a suscetibilidade das rochas às distintas alterações.

A confiabilidade dos ensaios analíticos também foi um dos questionamentos ao qual se buscou respostas, considerando que a heterogeneidade, variações nas porosidades, densidades, resistências, entre outras características, podem inviabilizar ou não o uso de uma técnica analítica.

Portanto este capítulo apresenta a discussão dos resultados frente à suscetibilidade às alterações e a confiabilidade dos ensaios analíticos.

6.1 Absorção de água

As cinco rochas estudadas apresentam características similares de porosidade, uma vez que, por sua compacidade e formação geológica, apresentam porosidade por meios fraturados, fator que confere a esses tipos de rochas, geralmente, baixa porosidade.

Dos ensaios de absorção de água realizados, é importante ressaltar que estes avaliam esta característica em três mecanismos distintos. O método da parte 2 da norma ABNT NBR 15845:2015 determina a absorção de água em todo o corpo de prova, ou seja, a absorção total. O método de absorção de água por capilaridade determina a evolução capilar nos corpos. E o método do tubo de Karsten é realizado em uma pequena área superficial dos corpos.

Embora as técnicas apresentem essas diferenças, o esperado era que os resultados adquiridos obtivessem similaridade nas variações entre as etapas de avaliação, assim como estabilidade no sentido, positivo ou negativo, dessa variação, o que representa se houve aumento ou diminuição da característica.

A Tabela 6.1 apresenta a variação percentual da absorção de água entre as leituras prévias e posteriores aos processos de alteração. Os valores percentuais nela contidos representam a variação percentual em relação às absorções iniciais com os corpos não alterados, onde, por exemplo, uma variação de 10% representa uma diferença de 0,02% em uma absorção inicial de 0,20%.

De modo a auxiliar na visualização do comportamento de aumento e redução da absorção de água, os valores negativos, foram representados na cor vermelha, os positivos em verde e os que não variaram em preto.

Podemos observar que dentre as alterações realizadas, no ensaio de choque térmico foram obtidos valores positivos, aumento da absorção de água, em todas as avaliações efetuadas nas cinco rochas nos métodos analíticos.

Dois fatores são atribuídos a esse comportamento: o fato de tratar-se de alteração estritamente física, sem ação química capaz de formar novos minerais que de alguma forma pudessem obstruir a passagem da água; e a agressividade do método que gera aumento de fissuras, assim aumentando a absorção de água pelas rochas.

Esse aumento de fraturamento foi constatado nos resultados obtidos na análise de lâminas delgadas ao microscópio petrográfico, onde constatou-se surgimento de microfraturas em cristais de quartzo e feldspato nas rochas silicáticas e intensificação das fraturas nos planos de clivagem de carbonatos no mármore.

As variações obtidas na exposição à névoa salina apresentam discrepância de comportamento entre os métodos, pois corpos que apresentam redução da absorção em um método analítico comportam-se de forma oposta em outro.

Em análise dos valores médios vemos concordância comportamental nos corpos do mármore, que apresentam incremento de absorção nos três métodos. Observa-se também que os valores médios obtidos para o Granito Itaquera, o Granito Cinza Mauá e o Monzonito Preto Piracaia, mostram coerência no sentido da absorção entre os métodos da NBR 15845 e absorção de água por capilaridade, fato que não se repete no método do tubo de Karsten.

As variações obtidas para os corpos expostos ao SO₂ apresentaram redução da absorção de água pelo método da parte 2 da NBR 15845 em praticamente em todas as avaliações. Somente um corpo do Gnaisse Facoidal não apresentou variação.

Em análise dos valores médios vemos concordância nos três métodos apenas para o Granito Cinza Mauá, apresentando redução na absorção.

Apresentaram valores médios concordantes nos métodos da parte 2 e tubo de Karsten o Granito Itaquera, o Granito Cinza Mauá e o Gnaisse Facoidal, embora apresentando em grandezas discrepantes.

O comportamento mais instável na exposição ao SO₂ foi para os corpos de mármore que apresentaram redução no método da NBR 15845 parte 2, não se alteraram na capilaridade e tiveram aumento da absorção pelo tubo de Karsten.

As variações obtidas para os corpos submetidos às soluções ácidas e básica apresentaram redução da absorção de água pelos três métodos em todos os reagentes nos corpos do Granito Itaquera. Da mesma forma, o corpo de Granito Cinza Mauá submetido ao hidróxido de sódio apresentou redução nos três métodos.

Ocorreu concordância nas variações obtidas entre o método da NBR 15845 parte 2 e capilaridade:

- Nos corpos de Granito Cinza Mauá e mármore expostos ao ácido sulfúrico;
- Nos corpos de Granito Cinza Mauá, Monzonito Preto Piracaia e Mármore submetidos ao ácido clorídrico;
- Nos corpos de Granito Cinza Mauá, Monzonito Preto Piracaia e Gnaisse Facoidal submetidos ao ácido nítrico;
- E nos corpos de Granito Cinza Mauá, Monzonito Preto Piracaia e mármore submetidos ao hidróxido de sódio.

Observa-se também na Tabela 6.1 que todos os resultados obtidos com o tubo de Karsten no mármore apresentam variações positivas, com exceção do corpo submetido ao hidróxido de sódio, que não apresenta variação.

Baseado nos resultados de absorção de água apresentados no capítulo anterior e na análise da Tabela 6.1, pode-se concluir que:

- I. Os ensaios de alteração de caráter químico podem gerar ou não a redução da absorção de água, mas há um aumento da absorção em alterações de caráter físico;
- II. Favoreceram a identificação de obstruções devido à redução de absorção;
- III. Os métodos de absorção de água são mais indicados a serem realizados em rochas com porosidade mais alta do que as abordadas neste estudo;
- IV. As variações em uma mesma amostra, quanto ao aumento e redução da capacidade de absorção de água, podem configurar reações heterogêneas sobre as superfícies e faces dos corpos de prova, o que permite interpretar que as reações não alteram todo o corpo em seu volume, ocorrendo alteração apenas superficial;
- V. Dentre os métodos de absorção de água o mais indicado é o da ABNT NBR 15845, parte 2, considerando que sua avaliação é feita em todo o corpo;

- VI. O método do tubo de Karsten é impreciso, sendo indicado para determinações de absorção *in loco*, quando não é possível a extração de corpos para averiguação da absorção pelo método da NBR 15845 parte 2;
- VII. O método do tubo de Karsten mostrou-se muito eficiente em rocha quimicamente suscetível, o caso do mármore, que apresentou variações significativas em praticamente todas as avaliações;
- VIII. A absorção de água por capilaridade e absorção de água por tubo de Karsten são indicadas para averiguação das mudanças nas dinâmicas de absorção água e não para sua determinação;
- IX. De acordo com os percentuais apresentados nos ensaios de alteração, com exceção do choque térmico onde os resultados são mais elevados, é possível afirmar que os corpos passam por baixas modificações de suas características de absorção.

6.2 Densidade, perda de massa e porosidade

A densidade de alguns corpos avaliados no estudo apresentou variação entre as determinações prévias e após ensaios de alteração, decorrente da variação de massa e porosidade durante os processos de alteração.

A Tabela 6.2 apresenta as variações obtidas para as determinações da densidade aparente, massa e porosidade. De forma a auxiliar na visualização, os corpos que apresentaram aumento desta característica, estão representados em fonte de cor verde, as reduções representadas em vermelho e em preto aqueles que não se alteraram.

As planilhas com os cálculos da perda de massa constam no Anexo I.

É possível observar que a maior variação dos valores de densidade ocorreu nos corpos de prova 4, 10, 11 e 12 do Granito Itaquera, apresentando aumento dos valores da densidade entre 9 e 16%. Outros da mesma rocha, assim como das demais abordadas no estudo, apresentam variações de densidade, para mais ou para menos, de no máximo 3%.

O aumento de densidade apresentada pelos quatro corpos supracitados pode ser ratificado por meio da verificação da variação de massa e/ou porosidade, devido ao seu aumento ou redução, respectivamente.

Pela análise da Tabela 6.2, nota-se que nenhum dos quatro corpos apresentou variação de massa, e suas porosidades não passaram por reduções significativas. Os corpos do Granito Itaquera 4 e 10 tiveram pequena redução da porosidade, 5% e 2%,

respectivamente. Os corpos 11 e 12 apresentaram alterações de porosidade elevadas, com aumento de 47% e 44% respectivamente, fato que devia influenciar na redução da densidade. Assim, estas variações não são compatíveis.

Para os demais corpos que apresentaram densidades com variações de até 3%, considerou-se que estas estão inseridas dentro da faixa de precisão do ensaio, podendo variar sutilmente entre uma análise e outra de um mesmo corpo, considerando que os ensaios de alteração não foram suficientemente agressivos para alterar a massa.

Lima (2006) e Silva & Simão (2009) observam perda de massa em corpos de gnaisses expostos à névoa salina, fator que não se confirmou no presente estudo. A perda de massa ocorrida, independente do ensaio de alteração imposto às rochas, foi desprezível.

Silva & Simão (2009) comentam sobre a formação de cristais de NaCl na superfície dos corpos, evento constatado e observado em lupa nas rochas expostas à névoa salina.

Becerra (2009) observa aumento de massa em corpos expostos ao SO₂ e imersão parcial em soluções ácidas. Neste estudo não se observa aumento de massa relevante, no entanto, é constatado em alguns casos a redução da porosidade, o que pode configurar obstrução por minerais neo-formados.

Este mesmo autor observa formação de crostas negras após 21 dias de exposição ao SO₂, reação não ocorrida no presente estudo.

Tabela 6.2 - Variações percentuais adquiridas nas determinações de densidade aparente, massa e porosidade aparente entre as avaliações prévias e pós alterações.

Caracterização		Densidade Aparente					Massa					Porosidade Aparente					
		Variação (%)					Variação (%)					Variação (%)					
Alteração	Corpo	GI	GCM	MPP	GF	M	GI	GCM	MPP	GF	M	GI	GCM	MPP	GF	M	
Névoa Salina	CP 01	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	12	4	-23	4	10	
	CP 02	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-4	-9	-42	-4	-10	
	CP 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	0	-22	-18	11	
Média (%)		0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	-2	-29	-6	4	
Câmara SO ₂	CP 04	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	-5	-17	0	-20	
	CP 05	-2	0	-1	0	3	0	0	0	0	0	-20	-5	-37	-7	-9	
	CP 06	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-9	-5	-28	-13	-30	
Média (%)		4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-11	-5	-27	-7	-20	
Imersão Parcial	H ₂ SO ₄	CP 07	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	-1	-13	-21	0	8	0
	HCl	CP 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-29	-32	-7	-15	-8	
	HNO ₃	CP 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-5	-17	-15	-3	9	
	NaOH	CP 10	9	0	1	-1	0	0	0	0	0	-2	-14	-41	-17	-11	
Choque Térmico	CP 11	15	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	47	34	38	26	140	
	CP 12	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	28	27	25	159	
Média (%)		16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	31	33	25	149	

Siglas das Rochas: GI = Granito Itaquera; GCM = Granito Cinza Mauá; MPP = Monzonito Preto Piracaia; GF = Gnaisse Facoidal; e M = Mármore.

6.3 Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas contou com a utilização de três pares de transdutores, planos de 54 kHz e 150 kHz e exponenciais de 54 kHz, nas avaliações nas direções perpendicular e paralela à foliação das rochas.

Devido à inconsistência dos resultados e discrepância das variações obtidas com os transdutores exponenciais, esse par de transdutores foi desconsiderado das análises finais.

A Tabela 6.3 apresenta o percentual de variação obtido para cada corpo de prova entre as avaliações prévias e após ensaios de alteração com os transdutores planos 54 kHz e 150 kHz nas duas direções de análise. Para melhor visualização dos dados na tabela foi usada fonte vermelha nos valores que apresentaram redução da velocidade, verde nos que tiveram aumento e preta para variação nula.

Observa-se na tabela que os padrões das variações entre os transdutores são muito similares e, em sua grande maioria, condizente em um mesmo sentido nas análises realizadas entre corpos submetidos a um mesmo método de alteração.

A principal diferença ocorreu entre as análises do Gnaisse Facoidal, que, nas avaliações dos corpos submetidos ao SO₂, apresenta aumento das velocidades com o transdutor de 54kHz e redução com os de 150 kHz.

Nas demais avaliações, onde ocorreram entre os corpos submetidos a uma mesma alteração variações positivas e negativas, percebeu-se que não superavam 5%, sendo considerado aceitável diante das imprecisões do método analítico.

Tomando por base uma avaliação mais homogênea dos resultados considerou-se o transdutor de 150 kHz o mais indicado para as rochas avaliadas, sendo tomado como padrão para determinação dos graus de alteração. Este par de transdutores também é favorecido por apresentar dimensões de fácil utilização em corpos com as dimensões adotadas neste estudo.

Com base nas variações obtidas na análise de velocidade ultrassônica é proposto uma sistematização do grau de alteração em cada ensaio, tomando como base os percentuais de variação médios obtidos nas análises realizadas com os transdutores de 150kHz.

Tabela 6.3 - Variações percentuais obtidas nas cinco rochas abordadas no estudo nas determinações das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas. Utilizando os transdutores de 54 e 150 kHz nas direções paralela e perpendicular à foliação das rochas, antes e após exposição aos ensaios de alteração.

Transdutores		54 kHz Variação (%)										150 KHz Variação (%)									
Direção		Perpendicular					Paralela					Perpendicular					Paralela				
Alteração	CP	GI	GCM	MPP	GF	M	GI	GCM	MPP	GF	M	GI	GCM	MPP	GF	M	GI	GCM	MPP	GF	M
Névoa Salina	CP 01	-5	-4	7	-7	-21	-4	-3	4	-2	-19	-6	-5	9	-13	-34	-8	-7	7	-12	-33
	CP 02	-3	-4	1	-8	-19	0	-5	4	-1	-19	-4	-5	-5	-8	-33	-3	-2	6	-8	-33
	CP 03	-6	-4	6	5	-24	-3	-3	7	4	-21	-5	-3	3	-5	-31	-5	-4	6	-8	-25
Média (%)		-5	-4	5	-3	-21	-2	-4	5	0	-20	-5	-4	2	-9	-33	-5	-4	6	-9	-30
Câmara SO ₂	CP 04	6	1	6	3	-22	7	2	5	1	-24	4	1	6	-3	-30	3	1	6	0	-28
	CP 05	1	1	-1	7	-18	-1	1	-1	3	-14	2	1	-1	0	-33	-3	1	-1	-3	-29
	CP 06	2	1	2	20	-16	-1	1	3	7	-16	2	14	4	-2	-30	0	10	8	-8	-32
Média (%)		3	1	2	10	-19	2	1	2	4	-18	3	5	3	-2	-31	0	4	4	-4	-30
Imersão Parcial	H ₂ SO ₄ CP 07	3	0	1	-6	-33	-1	0	1	-3	-30	5	1	3	-9	-40	6	-2	0	-5	-39
	HCl CP 08	3	1	5	7	-32	2	1	6	3	-33	6	0	6	-4	-35	4	0	6	-1	-39
	HNO ₃ CP 09	3	1	1	2	-30	5	0	-3	2	-29	3	0	2	-6	-35	7	1	5	-3	-39
	NaOH CP 10	-1	1	-2	-2	-26	-1	1	-2	0	-26	3	0	-1	-5	-29	2	-1	-1	-6	-30
Choque Térmico	CP 11	-16	-23	-7	-21	-58	-16	-25	-3	-15	-58	-17	-27	-9	-39	-68	-27	-32	-5	-27	-69
	CP 12	-14	-23	-3	-16	-65	-15	-20	-3	-7	-64	-30	-29	-6	-11	-69	-31	-33	-5	-15	-68
Média (%)		-15	-23	-5	-18	-62	-16	-23	-3	-11	-61	-23	-28	-8	-25	-69	-29	-33	-5	-21	-68

Siglas das Rochas: GI = Granito Itaquerá; GCM = Granito Cinza Mauá; MPP = Monzonito Preto Piracaia; GF = Gnaiss Facoidal; e M = Mármore.

Esses graus de alteração foram divididos em seis níveis, conforme exemplificado na Tabela 6.4, sendo que variações entre 0 e 5% trata-se de alteração muito fraca, 6 a 10% fraca, 11 a 15% moderada, 16 a 30% média, 31 a 50% alta e maior que 50% muito alta. Não é considerado o sentido da alteração, ou seja, o valor percentual é expresso em módulo.

Tabela 6.4 - Proposta de graus de alteração a partir da variação percentual entre avaliações ultrassônicas.

Variação %	Grau de alteração
0 a 5	Muito Fraca
6 a 10	Fraca
11 a 15	Moderada
16 a 30	Média
31 a 50	Alta
Acima de 50	Muito Alta

Utilizando os valores da Tabela 6.4 é possível visualizar a suscetibilidade de cada litotipo aos ensaios de alteração (Tabela 6.5). Nota-se claramente que a rocha mais afetada é o mármore, que apresenta alterações médias a muito altas.

Tabela 6.5 - Graus de alteração obtidos com os transdutores planos de 150 KHz na avaliação da velocidade das cinco rochas abordadas no estudo, nos dois sentidos de avaliação.

Direção	Perpendicular					Paralela				
Alteração	GI	GCM	MPP	GF	M	GI	GCM	MPP	GF	M
Névoa Salina	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Fraca	Alta	Muito Fraca	Muito Fraca	Fraca	Fraca	Média
SO₂	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Alta	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Média
H₂SO₄	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Fraca	Alta	Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Alta
HCl	Fraca	Muito Fraca	Fraca	Muito Fraca	Alta	Muito Fraca	Muito Fraca	Fraca	Muito Fraca	Alta
HNO₃	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Fraca	Alta	Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Alta
NaOH	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Média	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Fraca	Média
Choque Térmico	Média	Média	Fraca	Média	Muito Alta	Média	Alta	Muito Fraca	Média	Muito Alta

Siglas das Rochas: GI = Granito Itaquera; GCM = Granito Cinza Mauá; MPP = Monzonito Preto Piracaia; GF = Gnaisse Facoidal; e M = Mármore.

Nas demais rochas nota-se que as alterações ocorrem de forma branda, muito fracas ou fracas, para a maioria dos ensaios, sendo o choque térmico o que mais as altera.

Percebe-se também que o Monzonito Preto Piracaia é o litotipo que menos se altera no choque térmico, de acordo com as análises de velocidade.

Grossi & Del Lama (2015) em avaliação das faces do Monumento a Ramos de Azevedo, construído em Granito Itaquera, optaram pela utilização dos transdutores de 54 kHz pela transmissão semidireta, obtendo resultados que variam 4,1 a 5,4 km/s, valores mais elevados que os obtidos neste estudo com o mesmo par de transdutores (4,1 a 4,7 km/s) para as amostras inalteradas.

Avaliações ultrassônicas do Granito Itaquera foram efetuadas por Kuzmickas & Del Lama (2014) na avaliação da escultura *O Sepultamento* de Victor Brecheret, onde efetuam avaliações com os transdutores planos de 54 e 150 kHz, obtendo resultados de 4,3 a 4,4 km/s com transdutores de 54 kHz e 3,1 a 4,3 km/s com os de 150 kHz. Os resultados obtidos pelas autoras com os transdutores de 54 kHz resultam em valores dentro da faixa obtida neste estudo.

Gimenez & Del Lama (2014) obtiveram no Granito Cinza Mauá do Monumento às Bandeiras velocidades de 4,8 km/s e 4,6 km/s para os transdutores de 54 kHz e 150 kHz, dentro da faixa obtida antes dos ensaios de alteração neste estudo (4,3 a 4,8 km/s).

A partir desses comparativos é possível estabelecer que os referidos monumentos não apresentam alterações, pois todas as avaliações feitas apresentaram resultados dentro da faixa de valores obtidos nas amostras inalteradas em laboratório.

6.4 Resistência superficial e índice de resistência por carregamento pontual

Os ensaios de resistência superficial, utilizando o martelo de Schmidt e o índice da resistência por carregamento pontual, permitiram estimar a alteração da resistência mecânica dos corpos analisados, sendo que o martelo de Schmidt avaliou as alterações na superfície enquanto o carregamento pontual obteve a resistência em uma seção diametral dos corpos ensaiados.

Embora o carregamento pontual tenha sido efetuado somente em corpos de prova submetidos à alteração por névoa salina, este nos permitiu efetuar uma análise comparativa com a resistência superficial.

6.4.1 Resistência superficial

O comparativo da resistência superficial antes e depois da realização dos ensaios de alteração, tomou como base os valores médios obtidos nas rochas inalteradas, em um único corpo de prova para cada litotipo, denominadas de valores de referência.

A Tabela 6.6 apresenta a variação percentual obtida na avaliação da resistência superficial entre os valores médios das amostras de referência e os corpos submetidos aos ensaios de alteração. As diminuições de resistência constam na tabela em fonte vermelha, os aumentos em verde, e sem variação em preto.

A maioria dos corpos expostos aos ensaios de alteração apresentou resistências médias inferiores às obtidas nas amostras de referência, em poucos casos ocorre o oposto, o que pode ser justificado pela heterogeneidade das amostras, onde as resistências, tanto prévia como pós alteração, são superiores aos obtidos nas amostras de referência.

Nas avaliações do Monzonito Preto Piracaia e do mármore os corpos apresentaram valores inferiores ou idênticos aos da amostra de referência após ensaios de alteração.

Foi proposta a definição de níveis de grau de alteração da resistência superficial, tendo como base a variação percentual entre os resultados dos corpos alterados e a amostra de referência.

A classificação do grau de alteração na determinação da resistência superficial segue os mesmos parâmetros estabelecidos anteriormente na Tabela 6.4, onde os graus de alteração variam de muito fraca a muito alta seguindo intervalos da variação percentual.

Seguindo essa definição é possível visualizar na Tabela 6.7 os graus de alteração apresentados pelos cinco litotipos para cada ensaio de alteração realizado.

O ensaio de choque térmico é o que mais altera a resistência superficial das rochas, obtendo níveis de alteração altos ou muito altos em todas as rochas.

O litotipo que mais apresentou perda da resistência superficial foi o Monzonito Preto Piracaia apresentando níveis altos de alteração na exposição à nevoa salina, SO_2 , hidróxido de sódio e choque térmico. Em contato com os ácidos apresentou pouca perda de resistência.

O ensaio de alteração que menos afetou a resistência superficial das rochas foi a imersão parcial em ácido sulfúrico, seguido do ácido clorídrico.

Tabela 6.7 - Grau de alteração apresentado para rocha na obtenção da resistência superficial a partir da variação média dos corpos alterados com a amostra de referência.

Alteração	Rocha / Direção					
	Granito Itaquera	Granito Cinza Mauá	Monzonito Preto Piracaia	Gnaiss Facoidal		Mármore
				Perpendicular	Paralela	
Névoa Salina	Fraca	Média	Alta	Moderada	Média	Média
SO_2	Média	Moderada	Alta	Fraca	Fraca	Média
H_2SO_4	Fraca	Média	Média	Muito Fraca	Fraca	Média
HCl	Moderada	Moderada	Alta	Fraca	Moderada	Média
HNO_3	Média	Muito Fraca	Média	Muito Alta	Alta	Alta
NaOH	Média	Média	Alta	Alta	Alta	Alta
Choque Térmico	Alta	Alta	Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta

6.4.2 Índice de resistência por carregamento pontual

A determinação do índice da resistência por carregamento pontual permitiu observar a variação entre os corpos rompidos antes e após a exposição à névoa salina.

Na maior parte dos casos, as variações percentuais ocorreram abaixo de 18%. Para esses casos, as alterações da resistência foram baixas, de muito fraca a média (Tabela 6.8).

Apenas a análise perpendicular do Gnaisse Facoidal, apresenta alteração classificada como alta, em função de redução da resistência em 38%, enquanto que na direção paralela a variação foi nula.

No entanto, na aquisição de dados do Gnaisse Facoidal na direção perpendicular, em específico, ocorreu com uma amostragem inferior, onde a avaliação da rocha não alterada contou com um único corpo de prova e a avaliação pós névoa salina com dois.

Embora o Monzonito Preto Piracaia tenha apresentado alteração de grau médio, este ocorreu no limite inferior da classificação.

Tabela 6.8 - Variação percentual e grau de alteração apresentados na determinação do índice de resistência por carregamento pontual para as rochas submetidas à alteração por névoa salina.

Caracterização	Índice de resistência ao carregamento pontual					
	Variação (%)					
	Granito Itaquera	Granito Cinza Mauá	Monzonito Preto Piracaia	Gnaisse Facoidal		Mármore
Ensaio de alteração				Perpendicular	Paralela	
Névoa Salina	-11	-6	-18	-38	0	-14
Grau de alteração	Moderada	Fraca	Média	Alta	Muito Fraca	Moderada

6.5 Cor

A espectrofotometria permitiu determinar a variação de cor das amostras com o cálculo do ΔE , que determina a distância entre dois pontos no espaço CIELab.

A Tabela 6.9 apresenta os valores de ΔE obtidos nos cinco litotipos em cada ensaio de alteração e região avaliada.

As avaliações colorimétricas do Gnaiss Facoidal requereram a divisão entre os porfiroclastos e a matriz da rocha, por apresentarem diferenças cromáticas significativas entre si.

Tabela 6.9 - Valores do ΔE obtidos em cada ensaio de alteração e região analisada das cinco rochas abordadas no estudo.

Caracterização		ΔE / Rocha						
Alteração		GI	GCM	MPP	GF		M	
					Pct.	Mtz.		
Névoa Salina		4,4	4,3	1,0	1,5	2,5	14,1	
Câmara SO ₂		5,1	4,9	2,8	5,6	5,6	13,5	
Imersão Parcial	H ₂ SO ₄	Face de referência	6,1	5,1	8,7	3,2	4,9	8,5
		Zona imersa	7,8	8,0	13,1	3,6	6,4	8,7
		Faixa	*	12,8	5,2	*	*	*
		Zona emersa	10,2	7,8	13,1	10,5	11,4	12,8
	HCl	Face de referência	6,0	7,1	3,2	3,3	3,4	8,3
		Zona imersa	13,8	6,8	4,6	4,0	2,4	7,5
		Zona emersa	22,6	17,2	3,6	16,4	9,9	9,0
	HNO ₃	Face de referência	4,4	6,3	3,8	2,1	6,1	6,9
		Zona imersa	8,1	7,7	6,6	6,9	2,7	6,6
		Faixa	13,2	13,9	11,4	9,9	9,4	*
		Zona emersa	2,7	3,6	1,1	**	**	8,2
	NaOH	Face de referência	2,4	5,1	4,1	5,7	9,1	7,0
		Zona imersa	1,6	2,5	5,9	5,2	1,0	6,5
		Zona emersa	2,1	2,2	2,0	5,7	1,0	7,0
Choque Térmico		8,1	4,4	1,9	3,9	3,2	20,5	

* Não ocorreu formação de faixa.

**A Zona emersa teve sua avaliação realizada juntamente com a análise da faixa, pois não era possível separá-la no momento das leituras.

Siglas das Rochas: GI = Granito Itaquera; GCM = Granito Cinza Mauá; MPP = Monzonito Preto Piracaia; GF = Gnaiss Facoidal (Pct = Porfiroclastos; Mtz = Matriz); e M = Mármore.

Observando os dados foi possível verificar que o mármore é a rocha que mais se altera nas exposições a névoa salina, SO₂ e choque térmico; apresentando valores, em

média, mais elevados que as demais rochas também em alguns casos de imersões parciais em soluções ácidas e alcalina.

Nas imersões em ácido sulfúrico e clorídrico, a maior alteração cromática obtida ocorreu nas zonas emersas dos corpos de Granito Itaquera, Gnaiss Facoidal e mármore, no Granito Cinza Mauá ocorreu alteração na imersão em ácido clorídrico.

O Monzonito Preto Piracaia apresenta alteração idêntica e elevada entre as zonas imersas e emersas no ácido sulfúrico e resultados aproximados e mais baixos no ácido clorídrico.

Na imersão em ácido nítrico, a maior alteração cromática nas cinco rochas ocorreu sobre a faixa formada pela ascensão capilar da solução nos corpos.

Para o hidróxido de sódio a maior alteração ocorreu nas faces de referência, com exceção do Monzonito Preto Piracaia, para o qual a alteração mais elevada ocorreu na zona imersa.

Com base nos limites de detecção do olho humano ($\Delta E = 3$) e os níveis de aceitação da variação da cor para rochas tratadas, sobretudo os valores apontados em Sasse & Snethlage (1997), foi proposta uma sistematização do grau de alteração cromática usando os valores obtidos no ΔE para criar os níveis dos graus de alteração.

Esses graus de alteração foram divididos em seis níveis de acordo com os valores obtidos na determinação do ΔE relacionando-os com a percepção visual, conforme exemplificado na Tabela 6.10, onde resultado entre 0 e 3,0% trata-se de alteração muito fraca, 3,1 a 5,0% fraca, 5,1 a 10,0% média, 10,1 a 15,0% alta e maior que 15,1% muito alta.

Tabela 6.10 - Proposta de graus de alteração a partir da variação cromática.

Variação ΔE	Grau de alteração
0 a 3,0	Muito Fraca
3,1 a 5,0	Fraca
5,1 a 10,0	Média
10,1 a 15,0	Alta
Acima de 15,1	Muito Alta

Na Tabela 6.11 pode-se observar a suscetibilidade cromática dos litotipos por grau de alteração, onde são ratificadas as alterações previamente apresentadas.

Tabela 6.11 - Graus de alteração de cor obtidos para as cinco rochas abordadas no estudo com base nos valores do ΔE para cada ensaio de alteração efetuado nas distintas áreas avaliadas.

Alteração			Rocha					
			Granito Itaquera	Granito Cinza Mauá	Monzonito Preto Piracaia	Gnaiss Facoidal		Mármore
						Porfiroclastos	Matriz	
Névoa Salina			Fraca	Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Alta
Câmara SO ₂			Média	Fraca	Muito Fraca	Média	Média	Alta
Imersão Parcial	H ₂ SO ₄	Face de referência	Média	Média	Média	Fraca	Fraca	Média
		Zona imersa	Média	Média	Alta	Fraca	Média	Média
		Faixa	*	Alta	Média	*	*	*
		Zona emersa	Alta	Média	Alta	Alta	Alta	Alta
	HCl	Face de referência	Média	Média	Fraca	Fraca	Fraca	Média
		Zona imersa	Alta	Média	Fraca	Fraca	Muito Fraca	Média
		Zona emersa	Muito Alta	Muito Alta	Fraca	Muito Alta	Média	Média
	HNO ₃	Face de referência	Fraca	Média	Fraca	Muito Fraca	Média	Média
		Zona imersa	Média	Média	Média	Média	Muito Fraca	Média
		Faixa	Alta	Alta	Alta	Média	Média	*
		Zona emersa	Muito Fraca	Fraca	Muito Fraca	**	**	Média
	NaOH	Face de referência	Muito Fraca	Média	Fraca	Média	Média	Média
		Zona imersa	Muito Fraca	Muito Fraca	Média	Média	Muito Fraca	Média
		Zona emersa	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca	Média	Muito Fraca	Média
Choque Térmico			Média	Fraca	Muito Fraca	Fraca	Fraca	Muito Alta

* Não ocorreu formação de faixa

**A Zona emersa teve sua avaliação realizada juntamente com a análise da faixa, pois não era possível separá-la no momento das leituras.

Torquato *et al.* (2009) observam a ocorrência de alteração de cor de três rochas graníticas expostas ao SO₂ para tons mais amarelados. Esse mesmo comportamento foi ratificado nas rochas silicáticas abordadas neste estudo e não somente nas exposições ao SO₂ como nas submetidas aos ácidos sulfúrico, clorídrico e nítrico, e de forma menos expressiva nas expostas à nevoa salina.

Hutchinson *et al.* (1992) constataam que o HCl quando já depositado na superfície da rocha tende a ser absorvido mais rapidamente que o SO₂ em situações de umedecimento devido à maior solubilidade. Na imersão parcial observou-se que o HCl altera fortemente a superfície das rochas, desencadeando expressivas alterações cromáticas, fator que não ocorre com o SO₂.

6.6 Contribuição dos métodos analíticos

Os métodos analíticos utilizados para a caracterização de desempenho das rochas inalteradas e quantificação das alterações ocorridas contribuíram na interpretação dos comportamentos dos litotipos abordados em cada situação aos quais foram submetidos.

Cada método teve sua contribuição, fornecendo informações úteis para a determinação das suscetibilidades das rochas. No entanto, deve-se ressaltar que parte dos métodos é aplicável apenas em ambientes laboratoriais.

Os métodos destinados unicamente a análises em laboratório e/ou destrutivos são: análise petrográfica em lâminas delgadas; densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água de acordo com a ABNT NBR 15845:2010, parte 2; absorção de água por capilaridade. O índice de resistência ao carregamento pontual, pode ser realizado *in situ* ou em laboratório, no entanto trata-se de método destrutivo.

A análise petrográfica permitiu a observação das transformações ocorridas nos corpos submetidos ao choque térmico, com formação de microfissuras.

As determinações de densidade, porosidade e absorção de água, permitiram constatar que as alterações dessas características foram muito sutis, quase inexistentes, apenas no choque térmico as alterações foram mais evidentes.

Estes métodos também contribuíram com a observação do comportamento apresentado pelas amostras após alteração, onde se constatou tanto o aumento, como a diminuição de poros, neste caso ocasionados por obstruções.

A absorção de água por capilaridade da mesma forma que absorção de água segundo NBR 15845 parte 2, mostrou baixa variação entre a absorção prévia e pós alteração, salvo resultados do choque térmico, imersão parcial em geral, névoa salina e SO₂ para o Gnaiss Facoidal. Apresenta também aumento e diminuição da capilaridade de acordo com o tipo de alteração e rocha.

O índice de resistência ao carregamento pontual, efetuado apenas na alteração por névoa salina, mostrou-se valioso para estimar perda de resistência no interior dos corpos, uma vez que outras análises relacionadas a esta característica tem caráter superficial. Deve-se destacar que os corpos de prova utilizados neste método foram fragmentos de pequenas dimensões, fator que pode ter favorecido a perda de resistência em contraponto a corpos de dimensões superiores.

Ensaio como esses podem ser indicados para avaliações de obras de restauro do patrimônio histórico, sendo esse um tipo de obra onde podem ocorrer substituições de partes, como blocos ou placas, onde o material histórico torna-se disponível e viável a avaliação.

Obviamente substituições geralmente ocorrem por essas partes estarem degradadas, mas muitas vezes essa degradação ocorre superficialmente. Havendo a possibilidade de retirar a região comprometida cortando-a da peça, torna-se possível utilizar as regiões mais íntegras em uma avaliação laboratorial, onde todos os métodos empregados nesta pesquisa possam ser realizados.

Os métodos aplicáveis *in loco* são: absorção de água por tubo de Karsten; velocidade de propagação de ondas ultrassônicas; resistência superficial pelo método do martelo de rebote; e determinação de cor por espectrofotometria.

Dentre esses métodos percebeu-se que a velocidade de propagação de onda ultrassônica favorece a identificação de variações na compacidade dos corpos de prova.

Usando a transmissão direta, o método permitiu averiguar que na maioria das rochas estudadas, ocorreu baixa variação das velocidades adquiridas entre as análises prévias e após alteração, constatando que os corpos não passaram por alterações internamente. As únicas avaliações que demonstraram alterações maiores ocorreram no mármore e nos corpos submetidos ao choque térmico.

A determinação da resistência superficial por martelo de rebote, avaliou os corpos superficialmente, onde se observou quase que generalizadamente a redução da resistência superficial dos corpos, principalmente nos corpos do Monzonito Preto Piracaia e submetidos ao choque térmico.

A determinação de cor por espectrofotometria contribuiu com a aquisição quantitativa da variação de cor, fator de grande importância com relação a fatores estéticos ligados ao patrimônio construídos.

A mudança de coloração foi a alteração mais perceptível em análise visual e ocorreu principalmente nos corpos imersos em soluções ácidas e alcalina, ou seja, as rochas abordadas apresentaram expressivas suscetibilidades cromáticas aos reagentes. É importante ressaltar que o contato com ácido clorídrico ocasionou um expressivo amarelamento em quase todas as rochas estudadas, e este ácido é um dos principais componentes de produtos para limpeza de rochas.

A absorção de água por tubo de Karsten é indicada para rochas mais porosas que as abordadas no estudo. No entanto, constatou-se variações de obstrução e aumento da absorção de água, e mostrou-se eficiente nas avaliações realizadas no mármore e nos corpos submetidos ao choque térmico.

Ainda, pode-se também indicar o índice de resistência ao carregamento pontual, aplicável nas obras em casos mais complexos, onde exista a possibilidade de perda de resistência e risco de abalo estrutural. Nesses casos o carregamento pontual pode ser efetuado sobre testemunhos de sondagem, que podem ser extraídos com diâmetro de uma polegada. Efetuando-se comparativos entre os testemunhos extraídos e a rocha inalterada pode-se concluir se existe ou não risco de abalo estrutural.

6.7 Catálogo da caracterização e suscetibilidade a alterações das rochas abordadas no estudo

Como produto da pesquisa, considerou-se importante a compilação dos dados de caracterização e de suscetibilidade às várias alterações efetuadas em forma de um pequeno catálogo (Anexo II).

A confecção do catálogo busca contribuir com estudos futuros, exercendo também a função de base de dados para trabalhos de conservação e restauro de obras construídas com estas rochas.

Algumas das rochas aqui abordadas têm origem em pedreiras exauridas ou abandonadas, casos por exemplo do Granito Itaquera e Gnaiss Facoidal, podendo em poucos anos tornarem-se completamente inacessíveis, em função da urbanização e ou projetos de recuperação de áreas degradadas que não contemplem preservação de afloramentos acessíveis que permitam coleta, como ocorre atualmente na Pedreira Itaquera.

Sendo assim, propõe-se que, juntamente com as caracterizações aqui realizadas e catalogadas, dados de trabalhos similares que venham a ser efetuados sejam adicionados a este.

Em poucos anos será possível gerar uma base de dados digital, disponibilizando as informações a quem as necessitar, assim contribuindo para a conservação e compreensão das características intrínsecas de cada litotipo e suas suscetibilidades.

7 Conclusões

Este trabalho buscou simular diversos agentes de alteração para melhor compreensão das respostas de algumas rochas pertencentes ao patrimônio histórico às ações intempéricas às quais estão sujeitas estas rochas nas duas capitais mais populosas e industrializadas do país.

Foram ensaiadas amostras de rochas ígneas e metamórficas onde foi possível constatar que o Granito Itaquera, o Granito Cinza Mauá, o Monzonito Preto Piracaia e o Gnaiss Facoidal resistiram bem às ações do ataque químico. Por outro lado, o mármore, devido à sua maior suscetibilidade às alterações, foi mais afetado.

A exposição à névoa salina provocou o acúmulo de sais nas rochas. Em composições mais ricas em micas, este acúmulo ocorreu sobre biotita ou provocou sua desagregação da rocha.

A imersão em H_2SO_4 propiciou a formação de halotriquita e gipsita nas rochas silicáticas, e de gipsita e epsomita no mármore. A imersão em NaOH originou thermonatrita e trona em todos os litotipos. Não houve formação de sais na imersão em HCl e HNO_3 .

Os índices físicos não foram afetados pela exposição à névoa salina, SO_2 e imersão parcial. O choque térmico originou um pequeno aumento da porosidade e absorção de água no Gnaiss Facoidal e no mármore.

A absorção de água por capilaridade teve comportamento heterogêneo após exposição à névoa salina, SO_2 e imersão parcial; apresentado aumento, diminuição ou não alteração para cada um dos litotipos analisados. Apenas o choque térmico provocou o aumento da absorção de água em todas as rochas.

A absorção de água por tubo de Karsten teve comportamento similar, com o diferencial que o mármore apresentou aumento da absorção em todos os ensaios realizados.

O ensaio de índice de resistência ao carregamento pontual mostrou-se como uma alternativa viável quando existe a preocupação de instabilidade estrutural, pois requer amostras relativamente pequenas que podem ser extraídas com serra-copo de uma ou duas polegadas, permitindo o posterior preenchimento do vão gerado com material adequado. Os ensaios realizados mostraram que a resistência nas amostras diminuiu após exposição à névoa salina.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas apresentou variações pequenas. A maior diminuição da velocidade ocorre no mármore e após choque térmico em todas as rochas.

A resistência superficial variou de acordo com a rocha, no entanto, em sua maioria, apresentou perda de resistência maior que a variação da velocidade, configurando ocorrência de ataque superficial nessas rochas.

As alterações de cor ocorreram nas rochas com intensidades distintas de acordo com o ensaio de alteração e reagente. Com exceção do Gnaiss Facoidal, a névoa salina e SO_2 alteraram pouco a cor das rochas, com aumento dos parâmetros L^* e b^* . A imersão parcial em ácidos foi o ensaio que mais apresentou alterações cromáticas, com destaque para os ácidos sulfúrico e clorídrico, com forte aumento do parâmetro b^* , e consequentemente o amarelamento das rochas. Em grau menor, o parâmetro a^* também aumentou nas rochas silicáticas. A imersão em HNO_3 diminuiu o parâmetro L^* nos porfiroclastos do Gnaiss Facoidal. Em contrapartida, a exposição ao NaOH , na maioria dos casos, provocou pequena alteração da cor. O choque térmico gerou alterações cromáticas moderadas, apresentando maior ação nesse quesito sobre o Granito Itaquerá.

Em geral, o choque térmico alterou todas as rochas de forma expressiva, pois os cinco litotipos apresentaram alterações elevadas na propagação de ondas ultrassônicas e na resistência superficial.

A névoa salina e o SO_2 demonstraram comportamento distinto ao apresentado na literatura. A baixa alterabilidade por essas técnicas pode ter se desencadeado pelo tempo de exposição (30 ciclos) ou pela resistência composicional das rochas.

As imersões parciais em soluções ácidas e alcalina tiveram grande contribuição principalmente na observação da resposta cromática das rochas.

A análise de lâminas delgadas em microscópio petrográfico foi uma técnica eficiente na observação do fraturamento dos cristais desencadeado pelo choque térmico.

Dos métodos de caracterização e controle utilizados, os que apresentaram melhor acurácia de resultados foram a propagação de ondas ultrassônicas com o par de transdutores de 150 kHz, a avaliação da resistência superficial com o uso do martelo de Schmidt e a determinação de cor com o uso do espectrofotômetro.

O único método não destrutivo que se apresentou impreciso nesta pesquisa foi a absorção de água por tudo de Karsten, embora se trate de método bem difundido e de larga utilização na avaliação do patrimônio pétreo. A baixa absorção de água das rochas

pode ter influenciado na sua imprecisão, sendo mais indicado para rochas permo-porosas.

Dentre as rochas estudadas a mais afetada pelos ensaios de intemperismo artificial foi o mármore, atingindo alterações de médias a muito altas nas avaliações de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, alteração de cor e resistência superficial.

As normas utilizadas nesta pesquisa como base para os ensaios de intemperismo artificial e avaliações não destrutivas, em sua maioria, são estrangeiras (ASTM, BS EN e RILEM). Frascá (2003) já apontava para a necessidade de adequação de métodos de alteração acelerada existentes para a confecção de normas nacionais.

Adicionalmente, sugere-se também que poderia ser adequado um grupo de normas direcionadas especificamente para a avaliação de rochas ornamentais e do patrimônio histórico, com metodologias de ensaios não destrutivos, a exemplo das utilizadas nesta pesquisa.

A criação de requisitos e a disseminação de técnicas de avaliação da rocha poderiam aproximar pesquisadores dedicados à conservação e restauro, difundindo boas práticas e aumentando a atenção requerida pelo patrimônio pétreo.

8 REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8096. 1983. Material metálico revestido e não-revestido – Corrosão por exposição ao dióxido de enxofre. 3p. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802. 1994. Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. 8p. Rio de Janeiro.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15845. 2010. Rochas para revestimento; métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 32p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779. 2012. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. 3p. Rio de Janeiro.
- Aires-Barros, L. 1991. Alteração e alterabilidade de rochas. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica. 384p.
- Almeida, S. & Porto Jr., R. 2012. Cantarias e pedreiras históricas do Rio de Janeiro: instrumentos potenciais de divulgação das Ciências Geológicas. *Terrae Didactica* (Impresso), v. 8, p. 3-23.
- Almesberger, D.; Geometrante, R.; Rizzo, A. 2000. Ultrasonic Testing Method for the Characterization of Pietra D'Istria Structural Elements. In: *9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Veneza. Volume II: 317-325.
- Amoroso G. G. & Fassina V. 1983. Stone decay and conservation: atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. *Materials science monographs* v. 11. 453p.
- Antão, A. 2015. Avaliação da resistência à compressão uniaxial em granito através do ensaio de carga pontual: Parametrização em função do grau de alteração da rocha. <https://doi.org/10.13140/2.1.2111.2640>
- Apps, C. A. C. P. 2011. Avaliação da variabilidade de técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade a água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 156 p.
- Artur, A. C.; Ebert, H. D.; Angelini, N.; Rueda, J. R. J.; Maniakas, S. 1991. Mapeamento geológico em 1:50.000 da Quadrícula Extrema. Relatório Final. Convênio SICCT/PRÓ-MINÉRIO- IGCE/UNESP, v.1, 152 p.
- Artur, A. C. 2003. Complexo granitoide plurisserial Socorro: Geologia, petrologia e recursos minerais. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, 139 p.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM B 117. 2011. Standard practice for operating salt spray; fog; apparatus. Philadelphia. 12p.

- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 2845. 2008. Standard method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock. Philadelphia. 6p.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 5731. 2008. Standard Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications. Philadelphia. 12p.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 5873. 2005. Standard test method for determination of rock hardness by rebound hammer method. Philadelphia. 4p.
- Augusto, W. C. B. 2009. Caracterização Geológica dos Monumentos da Cidade de São Paulo, SP. Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 41p.
- Aydin, A., & Basu, A. 2005. The Schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.006>
- Becerra, J. E. B. & Costa, A. G. 2007. Ensaios de alteração acelerada para avaliação de seis granitos ornamentais brasileiros. *Geonomos*, v. XV, p. 31-40.
- Becerra, J. E. B. 2009. Avaliação da susceptibilidade aos processos de deterioração dos calcários ornamentais da formação La Tampa usados na construção civil de Medellín – Colômbia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. UFMG. 180 p.
- Borges, M. I.; Simão, J.; Silva, Z. 2011. Artificial Weathering of Portuguese Granites Exposed to Salt Atmosphere: Variations of Physico-Mechanical Properties. *Proceedings of the Conference “Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures”*, Limassol, Cyprus, 19.-22. Oct. 2011, 241–248. <https://doi.org/D0I:10.5072/hawk-hhg/saltwiki/24>
- Braga, A.; BÖHM, G.; Pereira, L.; Saldavia, P. 2001. Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, 0(51), 58–71.
- BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. 1999. BS EN 1925: Natural stone test methods; determination of water absorption coefficient by capillarity. London.
- BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. 2013. BS EN 14066: Natural stone test methods; determination of resistance to ageing by thermal shock. London.
- BSI - BRITISH STANDARD INSTITUTION. 2010. EN 15886: Conservation of cultural property – Test methods – Colour measurement of surfaces. London.
- Buyuksagis I.S. & Goktan R.M. 2007. The effect of Schmidt hammer type on uniaxial compressive strength prediction of rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44: 299-307.
- Cardoso, I.L. 2004. Caracterização de alterações cromáticas sobre substrato pétreo: medição de parâmetros de cor. Monografia de Licenciatura em Conservação e Restauro. Universidade Nova de Lisboa. 56 p.

- Chiodi Filho, C. & Chiodi, D. K. 2009. Perfil de rochas ornamentais e de revestimento. Relatório técnico 33. Secretaria de Geologia, mineração e transformação. Ministério de Minas e Energia.
- Delgado Rodrigues, J. & Costa, D. 1996. Assesment of the harmfulness of consolidants in granites. In: *Conservation of granitic rocks*. Delgado Rodrigues, J. & Costa, D. (Eds.) Lisboa, LNEC. p. 71-78.
- Del Lama, E. A.; Dehira, L. K.; Reys, A. C. dos. 2009. Visão Geológica dos Monumentos da Cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(3): 409-420.
- Del Lama, E. A.; Bacci, D. C.; Martins, L.; Garcia, M. G. M.; Dehira, L. K. 2015. Urban Geotourism and the Old Center of São Paulo City, Brazil. *Geoheritage*. v. 7. p. 147-164.
- Del Lama, E. A.; Dehira, L. K.; Grossi, D.; Kuzmickas, L. (2016). The colour of the granite that built the city of São Paulo, Brazil. *Color Research and Application*, 41(3), 241–245. <https://doi.org/10.1002/col.22018>
- Evangelista, A. C. J. 2002. Avaliação da resistência do concreto usando diferentes ensaios não-destrutivos, RJ. Tese de Doutorado. Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 219p.
- Fener, M., & Ince, I. 2012. Influence of orthoclase phenocrysts on point load strength of granitic rocks. *Engineering Geology*, 141–142, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.05.003>
- Fornaro, A. 2006. Águas de chuva: conceitos e breve histórico. Há chuva ácida no Brasil? *Revista USP*, 70, 78–87. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200008>
- Frascá, M. H. B. O. 2003. Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento, SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 281p.
- Frascá, M. H. B. O. & Yamamoto, J. K. 2004. Accelerated weathering of granite building stone by sulfur dioxide exposure. In: *10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* – Estocolmo. 67-74 p.
- Frascá, M. H. B. O., & Yamamoto, J. K. 2010. Thermal decay of selected Brazilian granite dimension stone. *Geological Active - Willams et Al. (Eds)*, 1673–1680.
- 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.
- Gimenez, A. M. S. & Del Lama, E. A. 2014. Comportamento de ondas ultrassônicas no Granito Mauá para a conservação do Monumento às Bandeiras. *Geologia USP. Série Científica*, v. 14, p. 47-60.
- Gomes, J. F. P. 2010. Poluição atmosférica - Um manual universitário. Publindustria. 2ed. 268p.

- Grossi, C. M.; Esbert, R. M.; Díaz-Pache, F. 1998. Degradación y durabilidad de materiales rocosos de edificación en ambientes urbanos. *Materiales de Construcción*, 48(252), 5–25.
- Grossi, D. & Del Lama, E. A. 2012. Mapeamento das formas de intemperismo do Monumento a Ramos de Azevedo. *Revista CPC (USP)*. v. 1. p. 169-187.
- Grossi, D. 2013. Análise do estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo com utilização de métodos não destrutivos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 138 p.
- Grossi, D. & Del Lama, E. A. 2015. Ultrasound technique to assess the physical conditions of the Monument to Ramos de Azevedo. *REM. Revista Escola de Minas*, v. 68, p. 171-176.
- Grossi, D.; Del Lama, E. A.; Garcia-Talegon, J.; Iñigo, A. C.; Vicente-Tavera, S. 2015. Evaluation of Colorimetric Changes in the Itaquera Granite of the Ramos De Azevedo Monument. *International Journal of Conservation Science*, 6(3), 313–322.
- Grossi, D. 2016. Avaliação da aplicação de consolidantes no Arenito Itararé, constituinte da fachada do Teatro Municipal de São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 247p.
- Hasui, Y. & Sadowski, G. R. 1976. Evolução geológica do precambriano na região do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, V.6, n.3, p 182-200.
- Haneef, S. J.; Johnson, J. B.; Dickinson, C.; Thompson, G. E.; Wood, G. C. 1992. Effect of dry deposition of NO_x and SO₂ gaseous pollutants on the degradation of calcareous building stones. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 26(16), 2963–2974. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90288-V](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90288-V)
- Hutchinson, A. J.; Johnson, J. B.; Thompson, G. E.; Wood, G. C.; Sage, P. W.; Cooke, M. J. 1992. Stone degradation due to dry deposition of HCl and SO₂ in a laboratory-based exposure chamber. *Atmospheric Environment Part A, General Topics*, 26(15), 2785–2793. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90016-E](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90016-E)
- ICOMOS (International Council on Monuments and Sites). Illustrated glossary on stone deterioration patterns. Champigny/Marne, França, ICOMOS, 2008, 80 p. Disponível em: <http://www.icomos.pt/images/pdfs/Glossario_Pedra_Icomos.pdf>.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1990. Catálogo de rochas ornamentais do estado de São Paulo. 123p.
- Janasi, V. A.; Ulbrich, H. H. G. J. (1992) Inventário bibliográfico de granitos do Estado de São Paulo. *Boletim IG-USP. Sér. Cient.*, número especial, v. 11.
- Janasi, V. A.; Alves, A., Vlach; S. R. F.; Leite, R. J. 2003. Granitos Peraluminosos da Porção Central da Faixa Ribeira, Estado de São Paulo: Sucessivos Eventos de Reciclagem da Crosta Continental no Neoproterozóico. *Revista Geologia USP, Sér. Cient.*, 3,13-24.
- Jordt-Evangelista, H. & Viana, D. J. 2000. Mármore da região de Itaoca (ES) e escarnitos no contato com diques máficos e félsicos: mineralogia e petrogênese. *Geonomos*. v. 8(2): 61-67.

- Kuzmickas, L. 2013. Estado de conservação dos monumentos pétreos do Cemitério da Consolação, São Paulo. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 150p.
- Kuzmickas, L. & Del Lama, E. A. 2014. Utilização de métodos não destrutivos no patrimônio histórico: Estudo de caso da escultura O Sepultamento de Victor Brecheret. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*. v.4:1. 9-22p.
- Lam dos Santos, J. P. 2011. Temperature effects on mechanical behavior of engineered stones. *Construction and building materials*. V. 25, p. 171-174.
- Lefèvre, R. A. & Ausset, P. 2002. Atmospheric pollution and building materials: stone and glass. In: Siegesmund, S., Weiss, T., Vollbrecht, A. 2002. *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Geological Society, London, Special Publications, 205, p. 329-345.
- Lima, M. A. B. 2006. Estudo do comportamento dos gnaisses casablanca, juparaná delicato e giallo falésia (Ceará-Brasil) em atmosfera salina. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, São Paulo. 160p.
- Machado, D. F. R. 2015. Análise das rochas da catedral metropolitana de São Paulo por métodos não destrutivos e o seu potencial para geologia eclesiástica. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 134 p.
- Matteini, M.; Rescic, S.; Fratini, F.; Botticelli, G. 2011. Ammonium phosphates as consolidating agents for carbonatic stone materials used in architecture and cultural heritage: preliminary research, *Int. J. Archit. Herit. Conserv. Anal. Restor.* 5: 717–736.
- Meyer, A. P.; Artur, A. C.; Navarro, F. C. 2003. Principais fatores petrográficos condicionantes da resistência ao ataque químico em rochas de revestimento. IV Simpósio de rochas ornamentais do nordeste. Fortaleza, Ceará. Sessões Técnicas: p.153-161.
- Miliani, C.; Velo-Simpson, M.L.; Scherer, G.W. 2007. Particle-modified consolidants: a study on the effect of particles on sol–gel properties and consolidation effectiveness, *J. Cult. Herit.* 8: 1–6.
- Naik T. R.; Malhorta V. M.; Popovics J. S. 2004. The Ultrasonic Pulse Velocity Method, In: Malhotra V. M., Carino N. J. (Eds.). 2004. *Handbook on nondestructive testing of concrete*, CRC Press, Boca Raton; London. 2nd ed. p. 14.1–14.34.
- Pelizan, T. R. 2004. Estudo de propriedades mecânicas de peças roliças de eucalipto citriodora utilizando a técnica de ultra-som, SP. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 70 p.
- Ramos R.R.C.; Vieira Filho, C. L. A.; Mansur, K. L.; Braga, L. P. V.; Silva, D. R. 2016. Pedreira da Ilha do Catalão: Registro completo de uma mineração esquecida na Baía de Guanabara (RJ). *Geonomos*. 24(2): 140-152.

- Reys, A. C. dos. 2006. Estado de conservação dos monumentos da cidade de São Paulo. Monografia de Trabalho de Formatura, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 131p.
- Ricardo, A. M. 2015. Uma rocha e um palácio: características e alterabilidade do gnaiss facoidal no Paço Imperial do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 194p.
- RILEM – Reunion Internationale des Laboratoires D'essais et de Recherchessurles Materiauxetles Constructions. 2006. RILEM II.4: Water Absorption Tube Test, 4p.
- Rivas Brea, T.; Prieto Lamas, B.; Silva Hermo, B. 2008. Ensayos de alteración artificial aplicados a rocas graníticas. *Materiales de Construcción*, 58(289–290), 179–189. <https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i289-290.80>
- Rodrigues, N. M. 2012. Ensaios não destrutivos em monumentos pétreos paulistanos. Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 47p.
- Rothert, E.; Eggers, T.; Cassar, J.; Ruedrich, J.; Fitzner, B.; Siegesmund, S. 2007. Stone properties and weathering induced by salt crystallization of Maltese Globigerina Limestone. In: Prikryl, R. & Smith, B. J. (eds) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society, London, Special Publications. 271, p. 189-198.
- Sasse, H.S. & Snethlage, R. 1997. Methods for the evaluation of stone conservation treatments. In: Baer, N.S.; Snethlage, R. (eds.). *Saving our Architectural Heritage*. p.223-243.
- Serafim, A. C de M. 2012. Análise *in-situ* do comportamento físico de argamassas de revestimento de fachadas. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. 105p.
- Siegesmund, S.; Weiss, T.; Vollbrecht, A. 2002. Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies Geological Society Special Publication, 205:1-7.
- Silva, L.C. da 1999. Geocronologia U-Pb SHRIMP e Sm-Nd na Província Mantiqueira meridional, no Cinturão Saldania (África do Sul) e a evolução do Ciclo Brasileiro /Pan-Africano. (PhD. thesis). Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS. Porto Alegre, 243p.
- Silva, L. C. da; Santos R.A; Delgado, I.M.; Cunha e Silva, H.C. 2000. Mapa geológico do estado do Rio de Janeiro, escala 1:400.000, Serviço Geológico do Brasil-CPRM/ Departamento de Recursos Minerais do estado do Rio de Janeiro-DRM-RJ.
- Silva, V. R. da. 2000. Ocupação territorial e qualidade da água subterrânea em maciço fraturado na região de Itaquera, São Paulo – SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 127p.
- 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, V. S. 2007. Alteração de rochas e a conservação do patrimônio arquitetônico: estudo de caso do pórtico da Igreja do Outeiro da Glória - RJ. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 184 p.
- Silva, Z. S. G. & Simão, J. A. R. 2009. The role of salt fog on alteration of dimension stone. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3321–3327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.044>
- Svahn, H. (2006). Non-Destructive Field Tests in Stone Conservation Non-Destructive Field Tests in Stone Conservation Field and Laboratory Tests. Riksantikvarieämbetet.
- Theodorovicz, A., Yamato, A. A., Vasconcelos, C. S., Santarém, P. C., Silva, L. C. de, Silva, V. A. da. 1991. Características lito-estruturais do cinturão de cisalhamento transcorrente São Paulo – Região leste da Grande São Paulo. In: *Simpósio de Geologia do Sudeste*, 2., São Paulo, 1991. Atas., São Paulo, SBG, p. 473-480.
- Toledo, M. C. M., Oliveira, S. M.B., Melfi, A. J. 2009. Da rocha ao solo: intemperismo e pedogênese. In: In: Wilson Teixeira. (Org.). Decifrando a Terra. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009, p. 210-239.
- Torfs, K. & Van Grieken, R. 1996. Effect of stone thickness on run-off water composition and derived damage functions in ambient exposure experiments. *Atmospheric Environment*, 30(1), 1–8. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00301-E](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00301-E)
- Torquato, M. de F. B.; Torquato, J. R. F.; Figueiredo, C.; Nogueira Neto, J. de A. 2008. Estudo dos granitos cearenses “ Vermelho Filomena , Meruoca Clássico e Verde Ceará ” por análise digital de imagem em câmara. *Geonomos*, 16(2), 51–62.
- Valdeón, L.; King M. S.; De Freitas M. H. 1992. Ultrasonic Methods for Quantifying the Degradation of Building Stones. In: *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. LNEC. Lisboa, Portugal. Volume 2: 697-704p.
- Varela, J. J.; Raaz, V.; Mazzinghy, D. B.; Russo, J. F. C. 2015. Aplicação Do Teste De Carga pontual modificado para seleção de britadores para minério de ferro. *Holos*, 7, 19. <https://doi.org/10.15628/holos.2015.3665>
- Vieira, V. S. 1997. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil. Cachoeiro do Itapemirim. Folha. SF.24.Z-V-Z. Estado do Espírito Santo. Organizado por Valter Salino Vieira. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM.
- Viles, H. A. 1997. Urban air pollution and the deterioration of buildings and monuments. In: BRUNE, D.; CHAPMAN, D.V.; GRUYNNE, M.D.; PACYNA, J.M. (Ed.) *The global environment: science, technology and management*. Weinheim: Scandinavian Science Publ.; VCH. p.599-609.
- Wiese, U.; Behlen, A.; Steiger, M. 2013. The influence of relative humidity on the SO₂ deposition velocity to building stones: A chamber study at very low SO₂ concentration. *Environmental Earth Sciences*, 69(4), 1125–1134. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1872-z>

Zornaza-Indart, A.; López-Arce, P.; Simões, J.; Zoghلامي, K. 2014. Accelerated aging experiments with saline fog, involving ventilation in calcarenitic monument rocks. *Comunicações Geológicas*, 101, Espec (July 2016), 1181–1185

Apêndice I – Planilhas de cálculo de perda de massa

Tabela A.1 - Cálculo da perda de massa das amostras do Granito Itaquera.

	Exposição	Corpo de prova	Massa Inicial	Massa Final	Alteração de massa	
					(g)	%
Granito Itaquera	Névoa Salina	CP 01	966,4	965,9	0,5	0,05
		CP 02	999,0	998,7	0,3	0,03
		CP 03	1030,8	1030,2	0,6	0,06
	SO ₂	CP 04	993,6	993,4	0,2	0,02
		CP 05	976,1	975,9	0,2	0,02
		CP 06	1030,5	1030,3	0,2	0,02
	H ₂ SO ₄	CP 07	993,1	992,6	0,5	0,05
	HCl	CP 08	1014,0	1013,7	0,3	0,03
	HNO ₃	CP 09	1018,2	1017,7	0,5	0,05
	NaOH	CP 10	1012,5	1012,4	0,1	0,01
	Choque Térmico	CP 11	976,8	976,3	0,5	0,05
		CP 12	1019,2	1018,9	0,3	0,03

Tabela A.2 - Cálculo da perda de massa das amostras do Granito Cinza Mauá.

	Exposição	Corpo de prova	Massa Inicial	Massa Final	Alteração de massa	
					(g)	%
Granito Cinza Mauá	Névoa Salina	CP 01	1075,7	1075,4	0,30	0,03
		CP 02	969,5	969,3	0,20	0,02
		CP 03	988,6	988,3	0,30	0,03
	SO ₂	CP 04	1001,3	1001,2	0,10	0,01
		CP 05	953,8	953,6	0,20	0,02
		CP 06	1020,3	1020,2	0,10	0,01
	H ₂ SO ₄	CP 07	1000,6	1000,0	0,60	0,06
	HCl	CP 08	973,9	973,5	0,40	0,04
	HNO ₃	CP 09	1002,7	1002,2	0,50	0,05
	NaOH	CP 10	964,8	965,1	-0,30	-0,03
	Choque Térmico	CP 11	1011,5	1010,4	1,10	0,11
		CP 12	975,0	974,1	0,90	0,09

Tabela A.3 - Cálculo da perda de massa das amostras do Monzonito Preto Piracaia.

	Exposição	Corpo de prova	Massa Inicial	Massa Final	Alteração de massa	
					(g)	%
Monzonito Preto Piracaia	Névoa Salina	CP 01	1070,0	1069,3	0,70	0,07
		CP 02	1107,2	1106,7	0,50	0,05
		CP 03	1057,1	1056,5	0,60	0,06
	SO ₂	CP 04	943,6	943,6	0,00	0,00
		CP 05	1002,7	1002,6	0,10	0,01
		CP 06	1023,3	1023,2	0,10	0,01
	H ₂ SO ₄	CP 07	1025,6	1023,6	2,00	0,20
	HCl	CP 08	1023,6	1022,3	1,30	0,13
	HNO ₃	CP 09	1061,5	1060,1	1,40	0,13
	NaOH	CP 10	1110,9	1110,8	0,10	0,01
	Choque Térmico	CP 11	1045,4	1045,1	0,30	0,03
		CP 12	849,1	848,8	0,30	0,04

Tabela A.4 - Cálculo da perda de massa das amostras do Gnaiss Facoidal.

	Exposição	Corpo de prova	Massa Inicial	Massa Final	Alteração de massa	
					(g)	%
Gnaiss Facoidal	Névoa Salina	CP 01	1026,8	1025,6	1,20	0,12
		CP 02	1002,6	1001,2	1,40	0,14
		CP 03	977,5	976,7	0,80	0,08
	SO ₂	CP 04	1003,3	1003,0	0,30	0,03
		CP 05	1017,3	1016,8	0,50	0,05
		CP 06	1040,8	1040,3	0,50	0,05
	H ₂ SO ₄	CP 07	1039,9	1038,1	1,80	0,17
	HCl	CP 08	1023,0	1021,8	1,20	0,12
	HNO ₃	CP 09	988,8	987,1	1,70	0,17
	NaOH	CP 10	1032,7	1032,5	0,20	0,02
	Choque Térmico	CP 11	937,0	936,4	0,60	0,06
		CP 12	988,1	987,2	0,90	0,09

Tabela A.5 - Cálculo da perda de massa das amostras do mármore.

	Exposição	Corpo de prova	Massa Inicial	Massa Final	Alteração de massa	
					(g)	%
Mármore	Névoa Salina	CP 01	1080,5	1079,4	1,10	0,10
		CP 02	1063,6	1062,5	1,10	0,10
		CP 03	1055,4	1054,1	1,30	0,12
	SO ₂	CP 04	1072,5	1071,7	0,80	0,07
		CP 05	1040,0	1039,4	0,60	0,06
		CP 06	1081,2	1080,6	0,60	0,06
	H ₂ SO ₄	CP 07	1069,2	1060,9	8,30	0,78
	HCl	CP 08	1068,1	1064,2	3,90	0,37
	HNO ₃	CP 09	1084,7	1080,3	4,40	0,41
	NaOH	CP 10	1092,9	1092,5	0,40	0,04
	Choque Térmico	CP 11	1042,7	1041,9	0,80	0,08
		CP 12	1054,5	1053,6	0,90	0,09

Apêndice II – Catálogo de caracterização e suscetibilidade a alterações

Granito Itaquera				
Classificação Petrográfica: Biotita monzogranito				
Caracterização				
Local de Origem			Inserção Geológica	
Itaquera, São Paulo - SP			Domínio Embu ⁽¹⁾	
Visão macroscópica (largura da foto de 7 cm)			Composição Mineralógica
Microclínio (40%), quartzo (30%), plagioclásio (22-23%), biotita (5%) e muscovita (2-3%). Acessórios: zircão, apatita, fluorita, monazita, titanita e opacos.	
Densidade Aparente (kg/m³)		Porosidade Aparente (%)		Absorção de Água (%)
2530		0,54		0,22
Absorção de água por capilaridade em 72h (g/m²)		Absorção de Água por Tubo de Karsten em 5h (ml)		Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (km/s). Transdutores planos
296		0,20		54 kHz
				150 kHz
				4,2
				4,1
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)		Índice de Resistência por Carregamento Pontual – IS 50 (MPa)		Resistência Superficial por esclerometria – Martelo de Schmidt (MPa)
201,2 ⁽²⁾		1,8		22,6
Determinação de Cor por Espectrofotometria				
L*		a*		b*
65,75 a 73,67		-0,81 a -0,38		-2,17 a 1,27
Suscetibilidade a agentes de alteração				
Agente de Alteração		Grau de alteração		
		Variação da Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Perda da Resistência Superficial	Alteração de Cor
Névoa Salina		Muito Fraca	Fraca	Fraca
SO ₂		Muito Fraca	Média	Média a Alta
Imersão Parcial em:	H ₂ SO ₄	Muito Fraca a Fraca	Fraca	Média a Muito Alta
	HCl	Muito Fraca a Fraca	Moderada	Média a Muito Alta
	HNO ₃	Muito Fraca a Fraca	Média	Fraca a Alta
	NaOH	Muito Fraca	Média	Muito Fraca
Choque Térmico		Média	Alta	Alta
Observações:				
(1) Fonte: Janasi <i>et al.</i> (2003);				
(2) Fonte: Relatório de Ensaio nº 1 046 701-203 do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) [Anexo III].				

Granito Cinza Mauá				
Classificação Petrográfica: Biotita monzogranito porfirítico				
Caracterização				
Local de Origem			Inserção Geológica	
Municípios de Mauá e Ribeirão Pires, SP			Domínio Embu ⁽¹⁾	
Visão macroscópica (largura da foto de 7 cm)			Composição Mineralógica
Microclínio (35-40%), quartzo (35%), plagioclásio (20%) e biotita (5-10%). Acessórios: apatita, zircão, titanita, turmalina, rutilo, allanita e opacos.	
Densidade Aparente (kg/m³)		Porosidade Aparente (%)		Absorção de Água (%)
2658		0,58		0,22
Absorção de água por capilaridade em 72h (g/m²)		Absorção de Água por Tubo de Karsten em 5h (ml)		Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (km/s). Transdutores planos
367		0,10		54 kHz
				150 kHz
				4,5
				4,5
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)		Índice de Resistência por Carregamento Pontual – IS 50 (MPa)		Resistência Superficial por esclerometria – Martelo de Schmidt (MPa)
164,4 ⁽²⁾		1,6		21,9
Determinação de Cor por Espectrofotometria				
L*		a*		b*
58,58 a 76,63		-0,99 a -0,51		-1,25 a – 0,36
Suscetibilidade a agentes de alteração				
Agente de Alteração		Grau de alteração		
		Variação da Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Perda da Resistência Superficial	Alteração de Cor
Névoa Salina		Muito Fraca	Média	Fraca
SO ₂		Muito Fraca	Moderada	Fraca
Imersão Parcial em:	H ₂ SO ₄	Muito Fraca	Média	Média a Alta
	HCl	Muito Fraca	Moderada	Média a Muito alta
	HNO ₃	Muito Fraca	Muito Fraca	Muito Fraca a Alta
	NaOH	Muito Fraca	Média	Muito Fraca
Choque Térmico		Média a Alta	Alta	Média
Observações:				
(1) Fonte: Janasi <i>et al.</i> (2003)				
(2) Fonte: IPT (1990)				

Monzonito Preto Piracaia

Classificação Petrográfica: Hornblenda-biotita quartzo monzonito

Caracterização

Local de Origem

Piracaia, SP

Inserção Geológica

Associação Magmática Piracaia⁽¹⁾

Visão macroscópica (largura da foto de 7 cm)

Composição Mineralógica

Plagioclásio (40%), biotita (20%), microclínio (15%), quartzo (10%), hornblenda (7-8%), titanita (5%), epidoto (2-3%). Acessórios: apatita, titanita, epidoto, clorita, allanita e opacos.

Densidade Aparente (kg/m³)

2843

Porosidade Aparente (%)

0,39

Absorção de Água (%)

0,14

Absorção de água por capilaridade em 72h (g/m²)

171

Absorção de Água por Tubo de Karsten em 5h (ml)

0,05

Velocidade de propagação de onda ultrassônica (km/s). Transdutores planos

54 kHz

150 kHz

4,8

4,7

Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)

170,0⁽²⁾

Índice de Resistência por Carregamento Pontual – IS 50 (MPa)

1,7

Resistência Superficial por esclerometria – Martelo de Schmidt (MPa)

35,0

Determinação de Cor por Espectrofotometria

L*

47,78 a 59,11

a*

-1,69 a -1,13

b*

-1,65 a 2,01

Suscetibilidade a agentes de alteração

Agente de Alteração		Grau de alteração		
		Variação da Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Perda da Resistência Superficial	Alteração de Cor
Névoa Salina		Muito Fraca a Fraca	Alta	Muito Fraca
SO₂		Muito Fraca	Alta	Muito Fraca
Imersão Parcial em:	H₂SO₄	Muito Fraca	Média	Média a Alta
	HCl	Fraca	Alta	Fraca
	HNO₃	Muito Fraca	Média	Muito Fraca a Alta
	NaOH	Muito Fraca	Alta	Muito Fraca a Média
Choque Térmico		Muito Fraca a Fraca	Alta	Fraca

Observações:

(1) Fonte: Artur *et al.* (1991);

(2) Fonte: IPT (1990)

Gnaisse Facoidal			
Classificação Petrográfica: Biotita gnaisse			
Caracterização			
Local de Origem		Inserção Geológica	
Cidades do Rio de Janeiro e Niterói		Suíte Rio de Janeiro ⁽¹⁾	
Visão macroscópica (largura da foto de 7 cm)		Composição Mineralógica
Microlínio (40%), quartzo (35%), plagioclásio (19-20%), biotita (5%) e granada (<1%). Acessórios: clorita, fibrolita, zircão, carbonato, apatita, epidoto, titanita e opacos.	
Densidade Aparente (kg/m³)	Porosidade Aparente (%)	Absorção de Água (%)	
2692	0,71	0,26	
Absorção de água por capilaridade em 72h (g/m²)	Absorção de Água por Tubo de Karsten em 5h (ml)	Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (km/s). Transdutores planos	
328	0,30	54 kHz	150 kHz
		3,3 ⁽²⁾ / 3,8 ⁽³⁾	3,4 ⁽²⁾ / 3,9 ⁽³⁾
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	Índice de Resistência por Carregamento Pontual – IS 50 (MPa)	Resistência Superficial por esclerometria – Martelo de Schmidt (MPa)	
77,9 ⁽²⁾⁽⁴⁾ / 74,1 ⁽³⁾⁽⁴⁾	0,8 ⁽²⁾ / 0,6 ⁽³⁾	15,1 ⁽²⁾ / 15,9 ⁽³⁾	
Determinação de Cor por Espectrofotometria			
L*	a*	b*	
62,31 a 80,20 ⁽⁵⁾ / 50,10 a 75,19 ⁽⁶⁾	0,07 a 4,87 ⁽⁵⁾ / -0,73 A 0,55 ⁽⁶⁾	2,86 a 3,37 ⁽⁵⁾ / -0,99 a 4,97 ⁽⁶⁾	
Suscetibilidade a agentes de alteração			
Agente de Alteração	Grau de alteração		
	Variação da Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Perda da Resistência Superficial	Alteração de Cor
Névoa Salina	Fraca ⁽²⁾⁽³⁾	Moderada ⁽²⁾ / Média ⁽³⁾	Muito Fraca ⁽⁵⁾⁽⁶⁾
SO ₂	Muito Fraca ⁽²⁾⁽³⁾	Fraca ⁽²⁾⁽³⁾	Média ⁽⁵⁾⁽⁶⁾
Imersão Parcial em:	H ₂ SO ₄	Muito Fraca ⁽²⁾ / Fraca ⁽³⁾	Muito Fraca ⁽²⁾ / Fraca ⁽³⁾
	HCl	Muito Fraca ⁽²⁾⁽³⁾	Fraca ⁽²⁾ / Moderada ⁽³⁾
	HNO ₃	Fraca ⁽²⁾ / Muito Fraca ⁽³⁾	Muito Alta ⁽²⁾ / Alta ⁽³⁾
	NaOH	Muito Fraca ⁽²⁾ / Fraca ⁽³⁾	Alta ⁽²⁾⁽³⁾
Choque Térmico	Média ⁽²⁾⁽³⁾	Muito Alta ⁽²⁾⁽³⁾	Fraca ⁽⁵⁾⁽⁶⁾
Observações:			
(1) Fonte: Silva (1999) e Silva <i>et al.</i> (2000); (2) Direção perpendicular; (3) Direção paralela; (4) Fonte: Marques <i>et al.</i> (2010); (5) Avaliação sobre os porfiroclastos; (6) Avaliação sobre a matriz da rocha.			

Mármore				
Classificação Petrográfica: Olivina mármore				
Caracterização				
Local de Origem		Inserção Geológica		
Itaoca, Cachoeiro do Itapemirim - ES		Complexo Paraíba do Sul ⁽¹⁾		
Visão macroscópica (largura da foto de 7 cm)		Composição Mineralógica
Carbonato (83%), olivina (15%) e piroxênio (2%); e traços de: anfibólio, flogopita, apatita, serpentina e opacos.		
Densidade Aparente (kg/m³)		Porosidade Aparente (%)		Absorção de Água (%)
2847		0,27		0,10
Absorção de água por capilaridade em 72h (g/m²)		Absorção de Água por Tubo de Karsten em 5h (ml)		Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (km/s) Transdutores planos
180		0,05		54 kHz150 kHz
				6,16,2
Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)		Índice de Resistência por Carregamento Pontual – IS 50 (MPa)		Resistência Superficial por esclerometria – Martelo de Schmidt (MPa)
N.D.		0,7		18,1
Determinação de Cor por Espectrofotometria				
L*		a*		b*
75,00 a 79,63		-1,42 a -0,84		-2,92 a -2,05
Suscetibilidade a agentes de alteração				
Agente de Alteração		Grau de alteração		
		Variação da Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	Perda da Resistência Superficial	Alteração de Cor
Névoa Salina		Média a Alta	Média	Alta
SO2		Média a Alta	Média	Alta
Imersão Parcial em:	H2SO4	Alta	Média	Média a Alta
	HCl	Alta	Média	Média
	HNO3	Alta	Alta	Média
	NaOH	Média	Alta	Média
Choque Térmico		Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta
Observações:				
(1) Fonte: Vieira <i>et al.</i> (1997) N.D.: Não disponível.				

Anexo I – Relatório de Ensaio nº1046 701-203 (IPT)

Relatório de Ensaio nº 1046 701-203 – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)

1/3

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-OBRAS

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 1 046 701-203

Cliente: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DA USP
CNPJ: 63.025.530/0007-08
Rua do Lago, nº 562 - Butantã
05.508-080 - São Paulo - SP

Material: Amostra de rocha.**Natureza do trabalho:** Ensaios de dilatação térmica e compressão uniaxial.

Referência: Orçamento CT-Obras/LMCC 239300/13-R, de 06.05.2013 e aceite por
 nota de empenho nº 02013481 de 16.05.2013.

1 DESCRIÇÃO DO MATERIAL

- 1.1 Designação declarada pelo cliente:** "Sem designação".
- 1.2 Descrição:** Rocha de granulação fina e cor cinza.
- 1.3 Identificação:** LMCC 863/13.
- 1.4 Quantidade:** Um bloco de tamanho irregular.
- 1.5 Procedência:** Pedreira Itaquera, desativada.

2 MÉTODOS UTILIZADOS

- 2.1** Coeficiente de dilatação térmica linear (Procedimento CT-OBRAS LMCC-P-PE-015), baseado na norma NBR 15.845:2010 – Anexo C - "Rochas para revestimento - Coeficiente de dilatação térmica linear – Método de ensaio", da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.

Equipamentos:

Paquímetro marca Digimess, PAQ 05-P, com curso máximo 200 mm, resolução 0,01 mm (início de operação 05.12.2012, validade 12.2013). Certificado de calibração nº D 16866-10, expedido pela RBC – Laboratório credenciado pelo INMETRO, sob o nº 0133.

Medidor de dilatação térmica linear (MTDL-1) com tubos coaxiais de sílica, construído no IPT, com os seguintes equipamentos acoplados:

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
 Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
 A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
 São Paulo | SP | 05508-901
 Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-OBRAS

1-Termômetro semicondutor, tipo termistor, TER 01-P, modelo NTC-50, marca, calibrado em 07/11/12 (validade até 11.2013). Certificado de calibração n° 120.732-101, expedido pela Rede Brasileira de Calibração – Laboratório Credenciado pelo INMETRO, sob o n° 003.

2-Transdutor de deslocamento, modelo TD 43, montado no IPT, calibrado em 28/11/12 (validade até 10.2013). Certificado de calibração n° 121.117-101, expedido pela Rede Brasileira de Calibração – Laboratório Credenciado pelo INMETRO, sob o n° 003.

2.2 Resistência à compressão uniaxial (Procedimento CT-OBRAS LMCC-P-PE-018), baseado nas normas NBR 15.845:2010 – Anexo E - “Rochas para revestimento - Resistência à compressão uniaxial – Método de ensaio”

Equipamentos:

Paquímetro marca Digimess, PAQ 05-P, com curso máximo 200 mm, resolução 0,01 mm (início de operação 05.12.2012, validade 12.2013).

Prensa hidráulica marca Mohr & Federhaff AGG, capacidade máxima de carga 200 t, calibrada em 07.05.2012 (validade até 06.2013). Certificado de calibração n° DNTT/132 c/12, expedido pela Rede Brasileira de Calibração – Laboratório Credenciado pelo INMETRO, sob o n° 0187.

Estufa com circulação mecânica de ar, marca Fanem, modelo 320 E/5. Patrimônio n° 23.049, CT-OBRAS/LMCC-P.

2.3 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (Procedimento CT-OBRAS LMCC-P-PE-014), baseado na norma NBR 8.802:1994 - “Concreto Endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica”, da ABNT.

Equipamentos:

Medidor ultrassônico não destrutivo portátil (PUNDIT), marca CNS Instruments. Patrimônio n° 03146, CT-OBRAS/LMCC-P.

Paquímetro marca Digimess, PAQ 05-P, com curso máximo 200 mm, resolução 0,01 mm (início de operação 05.12.2012, validade 12.2013). Certificado de calibração n° D 16866-10, expedido pela RBC – Laboratório credenciado pelo INMETRO, sob o n° 0133.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
São Paulo | SP | 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-OBAS

Nota: Para efeito de arredondamento, nos cálculos efetuados, foi utilizada a norma ABNT NBR 5891/77 - Regras de Arredondamento na Numeração Decimal

3 RESULTADOS

Os resultados acham-se assim apresentados:

- 3.1 Coeficiente de dilatação térmica linear: TABELA 1, ANEXO;
- 3.2 Resistência à compressão uniaxial e determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica: TABELA 2, ANEXO;

4 ANEXO

Anexo, Tabelas 1 e 2 02 pág.

São Paulo, 27 de junho de 2013.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil

Tecnolº Mestre Fábio Conrado de Queiróz
Executor dos Ensaios
CREASP N° 0682.529.860 - RE N° 3108

CENTRO DE TECNOLOGIA DE OBRAS DE
INFRAESTRUTURA
Laboratório de Materiais de Construção Civil

Geólº Mestre Eduardo Brandau Quitete
Supervisor dos Ensaios
CREASP N° 0601.964.659 - RE N° 8267

EQUIPE TÉCNICA

Fábio Conrado de Queiróz – Tecnólogo, Me
Eduardo Brandau Quitete – Geólogo, Me
Vandir Correa dos Santos – Técnico

FCQ.

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
São Paulo | SP | 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-OBRAS

ANEXO

Tabelas 1 e 2

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
São Paulo | SP | 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-OBRAS

Tabela 1 - Resultados do ensaio de dilatação térmica linear (NBR 15.845:2010 – Anexo C) para a amostra "Sem designação" (LMCC 863/13), finalizado em 26.06.2013.

CORPO-DE-PROVA (n°)	L _o (mm)	ΔL (10 ⁻⁶ m)	TEMPERATURA (°C)		COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR (10 ⁻⁶ m/m.°C)	
			FAIXA DE VARIAÇÃO	ΔT	NO EVENTO	VALOR MÉDIO
1 (//)	89,9	18,8	50,0 / 0,0	50,0	4,2	4,2
		18,8	0,0 / 50,0	50,0	4,2	
2 (⊥)	89,6	21,7	50,0 / 0,0	50,0	4,8	4,8
		21,2	0,0 / 50,0	50,0	4,7	
MÉDIA						4,5

Nota: (//) – ensaio efetuado em corpo-de-prova extraído paralelo à estruturação da rocha

(⊥) – ensaio efetuado em corpo-de-prova extraído perpendicular à estruturação da rocha

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
São Paulo | SP | 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br

Laboratório de Materiais de Construção Civil / CT-OBRAS

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de compressão uniaxial ao natural (NBR 15.845:2010 – Anexo E) e de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica (NBR 8.802:1994) para a amostra “Sem designação” (LMCC 863/13), finalizados em 19.06.2013.

CORPO- DE- PROVA (n°)	ALTURA (mm)	DIMENSÕES ARESTAS (mm)		ÁREA DE CARGA, A (cm²)	CARGA DE RUPTURA, P (kgf)	TENSÃO DE RUPTURA, σ		VELOC. DE PROPAG. (m/s)
		A1	A2			(kgf/cm²)	(MPa)	
5 (//)	73,64	7,57	7,50	56,74	101.500	1.789	175,4	3.917
4 (//)	73,10	7,46	7,58	56,52	108.500	1.920	188,3	3.730
3 (//)	74,77	7,53	7,60	57,28	114.000	1.990	195,2	3.854
2 (//)	74,60	7,60	7,64	58,04	127.500	2.197	215,4	3.906
1 (//)	73,45	7,45	7,54	56,14	132.500	2.360	231,4	3.747
10 (⊥)	75,74	7,65	7,57	57,90	94.000	1.623	159,2	3.864
6 (⊥)	73,63	7,61	7,54	57,42	102.000	1.776	174,2	3.663
7 (⊥)	75,69	7,45	7,48	55,73	107.000	1.920	188,3	3.823
9 (⊥)	74,93	7,52	7,50	56,42	116.500	2.065	202,5	3.747
8 (⊥)	74,36	7,51	7,55	56,73	120.000	2.115	207,4	3.610
MÉDIA (Paralelo)						2.051	201,2	3.831
DESVIO PADRÃO						227	22,3	88
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)						11,1	11,1	2,3
MÉDIA (Perpendicular)						1.900	186,3	3.741
DESVIO PADRÃO						854	20,0	106
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)						10,7	10,7	2,8

Nota: $\sigma = P/A$

// C.P. submetido a carga
paralela à estruturação
da rocha

C.P. 1 a 5

⊥ C.P. submetido a carga
perpendicular à
estruturação da rocha

C.P. 6 a 10

Os resultados apresentados neste documento se aplicam somente ao item ensaiado ou calibrado.
Este documento não dá direito ao uso do nome ou da marca IPT, para quaisquer fins, sob pena de indenização.
A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

Av. prof. Almeida Prado, 532 | Butantã
São Paulo | SP | 05508-901
Tel 11 3767 4000 | Fax 11 3767 4002 | ipt@ipt.br

www.ipt.br