



Ministério da Educação
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral
PPGEMinas - UFPE

**“ ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERABILIDADE ACELERADA DE TRÊS FÁCIES
COMERCIAIS DO SIENITO MARROM IMPERIAL ”**

Por
Wagner José Medeiros Ribeiro
Químico

Orientador: Profa. Dra. Felisbela Maria da Costa Oliveira
Engenheira Civil

Co-Orientadora: Profa. Dra. Sandra de Brito Barreto
Geóloga

Trabalho realizado no Laboratório de Rochas Ornamentais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEMinas/CTG/UFPE.

Recife, 2011

**“ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERABILIDADE ACELERADA DE TRÊS FÁCIES
COMERCIAIS DO SIENITO MARROM IMPERIAL “**

**Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral-
PPGEMinas, como parte dos requisitos para obtenção do Título de**

MESTRE EM ENGENHARIA MINERAL

Área de concentração: Minerais e Rochas Industriais

Por

Wagner José Medeiros Ribeiro

Químico

Recife, 2011

Catálogo na fonte
Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

R484e

Ribeiro, Wagner José Medeiros.

Estudo comparativo de alterabilidade alterada de três facies comerciais do Sienito Marrom Imperial / Wagner José Medeiros Ribeiro. - Recife: O Autor, 2011.

xiv, 112 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Profa. Dra. Felisbela Maria da Costa Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2011.

Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia Mineral. 2. Alterabilidade de Rochas.
3. Sienito Marrom Imperial. 4. Índice Físico. I. Oliveira, Felisbela Maria da Costa (orientadora). II. Título.

623.26 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2011-074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

WAGNER JOSÉ MEDEIROS RIBEIRO

**“ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERABILIDADE ACELERADA DE
TRÊS FÁCIES COMERCIAIS DO SIENITO MARROM IMPERIAL”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ROCHAS ORNAMENTAIS

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do Dr.
Júlio César de Souza, considera o candidato.

WAGNER JOSÉ MEDEIROS RIBEIRO, Aprovado.

Recife, 10 de Março de 2011.

Dra. FELISBELA MARIA DA COSTA OLIVEIRA – Orientadora (UFPE)

Dr. FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL – Examinador Externo (CETEM-RJ)

Dr. ELDEMAR DE ALBUQUERQUE MENOR - Segundo Examinador Interno (UFPE)

DEDICATÓRIA

Ao Divino Pai Eterno pelo seu imenso amor e sabedoria de sempre balizar o nosso caminho com luzes de sua presença, à minha família, em especial ao meu pai (in Memória), e a minha mãe, irmãos e amigos que sempre me incentivaram a realizar este trabalho.

“Nenhum problema pode ser resolvido pelo mesmo estado de consciência que o gerou. É preciso ir bem mais longe que isso.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dotar de inspiração e dos meios necessários para realizar meus sonhos e alcançar mais do que pensei ou imaginei.

Inúmeras foram as pessoas, empresas e instituições que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, Registro aqui o meu agradecimento pelo apoio ao final desta importante jornada em minha carreira. Listo aqui aqueles que, sem dúvida, contribuíram de forma mais expressiva:

Aos meus pais, Hélio Montes Ribeiro(*in memóriam*) e Guiomar Medeiros Ribeiro que, que sempre me transmitiram toda coragem e segurança necessária para transpor grande parte dos obstáculos que surgiram ao longo da realização deste trabalho. Aos meus irmãos, primos e em especial, a Pedro que sempre me estimulou nesta caminhada.

Agradeço, de forma especial, aos amigos, professor **Dr. Eldemar Menor** que me auxiliou durante toda este trabalho; ao Prof. Claudio de Castro que sempre me incentivou nesta jornada, ao professor Marcelo Reis, pela gentileza de me acolher em seu laboratório, a aos meus orientadores Dra. **Felisbela Maria da Costa Oliveira** e Dra. **Sandra de Brito Barreto**.que me auxiliaram nesta caminhada.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mineral, pela aceitação no referido programa, e por me dar oportunidade, subsídio e incentivo para a conclusão do curso de mestrado, através de seus professores, funcionários e infra-estrutura.

A secretária da Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Voleide Barros F. Gomes, pela sua eficiência, dedicação, carinho e paciência.

Para execução deste trabalho, foi de grande importância a colaboração de vários colegas, e amigos especialmente no entendimento de demandas administrativas, abundantes no exercício acadêmico, aos quais exprimo minha gratidão, e com especial carinho a minha amiga e companheira Thaise Kalix, Suely Andrade, Renata, Lamartine pelo companheirismo e paciência nesta jornada.

RESUMO

A rocha, em geral, é um recurso natural da maior importância e de grande valor para a construção civil. Além da aplicação direta, as rochas são utilizadas como matéria prima para a confecção de diversos produtos, tais como peças de móveis, na produção de cimento, papel, tintas entre outros.

A composição química, mineralógica e textura são características fundamentais na definição das propriedades físicas, mecânicas e térmicas das rochas ornamentais Sales e Moraes (2003).

Este trabalho corresponde ao estudo comparativo de três fácies do Sienito Marrom Imperial à susceptibilidade à alteração frente à acidificação das águas meteóricas, em decorrência das modificações climáticas causadas por ação antrópica. A partir do monitoramento de seus índices físicos, perda de massa e brilho, torna-se possível se avaliar as modificações sofridas pelas litologias estudadas. Os três fácies comerciais estudados são largamente empregados como revestimento interno e externo. Os mesmos foram imersos em soluções ácidas lixiviantes, para avaliação de susceptibilidade destes a acidificação das águas meteóricas devido a ação antrópica, além ensaios de susceptibilidade a oxidação por choque térmico. Este conjunto de ensaios permitiram estabelecer uma ordem de suscetibilidade à alterabilidade para os fácies estudados.

Os fácies apresentam comportamento distinto frente às soluções lixiviantes, e aos diferentes tempos de imersão. Destes, o fácies 2 apresentou-se como o de maior susceptibilidade à alteração, seguido pelo fácies 1 e este pelo fácies 3, logo $F2 > F1 > F3$, embora o ensaio de oxidabilidade tenha apresentado o fácies 1 como mais resistente à oxidação que o fácies 3. Os outros ensaios de alterabilidade e parâmetros medidos neste trabalho assinalam fortemente a maior resistência do fácies 3 em relação aos demais.

Palavras chaves: Alterabilidade de rochas, Marrom Imperial, índices físicos.

ABSTRACT

The rock in general is a natural resource of great importance and great value for the construction industry. Besides the direct application, the rocks are used as raw material for the manufacture of various products such as pieces of furniture, the production of cement, paper, inks and others.

The chemical composition, texture and mineralogical characteristics are fundamental in defining the physical, mechanical and thermal properties of natural stone Sales and Morais (2003).

This work corresponds to the comparative study of three syenite *fácies* of Brown Imperial susceptibility to change the face of meteoric water acidification as a result of climatic change caused by human activities. From the monitoring of their fitness levels, loss of weight and brightness, it becomes possible to evaluate the changes suffered by the lithologies studied. The study was developed in three textural variations of this syenite, employability as large internal and external coating, which were immersed in acidic leaching solutions to assess the change in its properties. There were also assayed for susceptibility to oxidation by heat shock. These tests allowed to establish an order of susceptibility to alterability *fácies* "commercial" studied.

The *fácies* studied show distinct behavior for the solutions leaching, and dipping times. The second *fácies* is presented as the most susceptible to change, followed by *fácies* 1 and *fácies* 3, so $F2 > F1 > F3$, although the test has made the oxidizability as *fácies* 1 more resistant to oxidation than the *fácies* 3; the other tests of alterability and parameters measured in this work strongly indicate the greater resistance of *fácies* 3 in relation to others.

Keywords: Alterability of rocks Imperial Brown, modifiability, porosity, absorption, density, brightness.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
REFLEXÃO.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
 CAPÍTULO I.....	 01
1 INTRODUÇÃO.....	01
1. 1 Apresentação.....	01
1. 2 Objetivos.....	05
1. 2. 1 Objetivo Geral.....	05
1. 2. 2 Objetivos Específicos.....	05
 CAPÍTULO II.....	 08
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	08
2.1 Fundamentação Teórica.....	08
2. 1. 1 Material Pétreo Ornamental e de Revestimento.....	09
2. 1. 2 Rochas Ornamentais.....	10
2. 1. 3 Classificação Comercial das Rochas Ornamentais.....	11
2. 1. 3. 1 Granitos.....	12
2. 1. 3. 2 Mármore.....	13
2. 1. 3. 3 Quartzitos, Arenitos e Conglomerados.....	14
2. 1. 3. 4 Ardósia.....	15
2. 1. 3. 5 Basaltos.....	15
2. 2 Litologia Estudada.....	16
2. 2. 1 Granito Marrom Imperial.....	16
2. 3 Alterabilidade.....	17
2. 3. 1 Principais Agentes de Alteração de Materiais Rochosos.....	23

2. 3. 2 A Água	23
2. 3. 3 O Vento	28
2. 3. 4 A temperatura	29
2. 3. 5 Agentes Biológicos	29
2. 3. 6 Poluentes Atmosféricos	31
CAPÍTULO III	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3. 1 Normas e Ensaio	42
3. 2 Materiais Utilizados	44
3. 2. 1 Levantamento Bibliográfico	44
3. 2. 2 Ensaio e Análises Laboratoriais	45
3. 2. 3 Análise Petrográfica	45
3. 2. 4 Determinação da Composição Química por Técnicas Analíticas de ICP	46
3. 2. 5 Determinação dos Índices Físicos	47
3. 2. 6 Determinação da Massa dos Corpos de Prova	47
3. 2. 7 Determinação do Brilho do Corpos de Prova	48
3. 2. 8 Ensaio de Alterabilidade	48
3. 2. 8. 1 Ensaio por Imersão em líquidos Reativos	49
3. 2. 8. 2 Ensaio de Oxidabilidade	50
CAPÍTULO IV	52
4 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
4. 1 Composição Mineralógica e Química dos Litotipos Estudados	52
4. 1. 1 Mineralogia do Marrom Imperial	52
4. 1. 1. 1 Marrom Imperial fácies 1 (auréola rosa clara a branca)	52
4. 1. 1. 2 Marrom Imperial fácies 2 (sem auréola)	53
4. 1. 1. 3 Marrom Imperial fácies 3 (auréola rosa)	55
4. 2 Composição Química das Litologias	57

4..3 Ensaio de Caracterização Tecnológica	59
4. 3. 1 Índices Físicos	59
4. 3. 1. 1 Índices Físicos – Granito Marrom Imperial (Rocha Sã)	59
4. 3. 1. 2 Índices físicos – após 30 dias de imersão	63
4. 3. 1. 2. 1 Solução lixiviante de H_2SO_4	65
4. 3. 1. 2. 2 Solução lixiviante de HNO_3	67
4. 3. 1. 2. 3 Solução lixiviante mistura de ácido sulfúrico e nítrico 2:1	69
4. 3. 1. 2. 4 Solução lixiviante de HCl	70
4. 3. 1. 3 Índices Físicos – após 60 dias de imersão	72
4. 3. 1. 3. 1 Solução lixiviante de H_2SO_4 - 60 dias imersão	73
4. 3. 1. 3. 2 Solução lixiviante de HNO_3 - 60 dias imersão	75
4. 3. 1. 3. 3 Solução lixiviante: mistura de H_2SO_4 e HNO_3 - 60 dias imersão	77
4. 3. 1. 3. 4 Solução lixiviante HCl - 60 dias imersão	79
4. 4 Índices Físicos - Absorção Aparente de água	82
4. 5 Resultados dos ensaios de alterabilidade	87
4. 5. 1 Lixiviação estática à pressão e temperatura ambientes	87
4. 5. 1. 1 Modificações estéticas	87
4. 5. 1. 2 Diminuição do brilho	93
4. 5. 1. 3 Perda de massa	97

4. 5. 1. 3. 1 Perda de massa em período de imersão de 30 dias	98
4. 5. 1. 3. 2 Perdas de massa no período de imersão de 60 dias	99
4. 5. 1. 4 Oxidabilidade por choque térmico	102
CAPÍTULO V	105
5 CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa	43
Figura 4.1. Fotomicrografia do Marrom Imperial fácies 1 (auréola rosa clara a branca) – Contato entre fenocristal feldspatos potássicos pertíticos contornado por auréola, e matriz (NX)	53
Figura 4.2. Fotomicrografia de Marrom Imperial fácies 2 (sem auréola) – nicois paralelos e nicois cruzados (NX). Contato entre os fenocristais de feldspatos potássicos	55
Figura 4.3. Fotomicrografia de Marrom Imperial, fácies 3. Nicois paralelos e nicois cruzados Observa-se contato entre os fenocristais de feldspatos potássicos pertíticos contornados por auréola	56
Figura 4.4. Matriz de correlação fácies comerciais incluindo-se os fácies SEG de Guimarães & Silva F° (1992)	59
Figura 4.5. Porosidade média dos 3 fácies comerciais do Marrom Imperial são (n = 36).	60
Figura 4.6. Absorção média de água dos fácies comerciais do Marrom Imperial são	60
Figura 4.7. Porosidade e absorção de água dos fácies do Marrom Imperial são .	61
Figura 4.8. Porosidade média aparente dos fácies comerciais do Marrom Imperial são	62
Figura 4.9. Absorção média aparente de água nos fácies comerciais do Marrom Imperial são	62
Figura 4.10. Porosidade dos fácies conforme reagente lixiviante empregado, após imersão de 30 dias	65
Figura 4.11. Variações de massa exibidas pelos fácies nas solução lixiviante empregada período de 30 dias de imersão.	65
Figura 4.12. Variação de massa exibida pelos fácies para cada uma das soluções lixiviantes	72
Figura 4.13. Porosidade dos diferentes fácies após 60 dias de imersão em ataque ácido	73
Figura 4.14. Porosidade em H ₂ SO ₄ após 60 dias de imersão	74

Figura 4.15. Variação de porosidade dos Fácies em solução de H_2SO_4	74
Figura 4.16. Porosidade dos fácies do Marrom Imperial após imersão de 60 dias em HNO_3	76
Figura 4.17. Variação de porosidade dos fácies do Marrom Imperial em HNO_3	76
Figura 4.18. Porosidade dos fácies após ataque 60 dias mistura de ácidos	77
Figura 4.19. Variação de porosidade dos fácies na mistura de ácidos	77
Figura 4.20. Porosidade dos fácies de Marrom Imperial após ataque em HCl por 60 dias	79
Figura 4.21. Variação de porosidade dos fácies do Marrom Imperial, após ataque por HCl, 60 dias	80
Figura 4.22. Variação da absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 1	82
Figura 4.23. Variação da absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 2	83
Figura 4.24. Variação da absorção d'água do Marrom Imperial, fácies 3	83
Figura 4.25. Relação entre porosidade e absorção d'água do Marrom Imperial, fácies 1	85
Figura 4.26. Relação entre porosidade e absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 2	85
Figura 4.27. Relação entre porosidade e absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 3	86
Figura 4.28. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, em H_2SO_4 , rocha sã, 30 e 60 dias	87
Figura 4.29. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, em HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias	88
Figura 4.30. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, mistura H_2SO_4/HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias.	88
Figura 4.31. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, em HCl, rocha sã, 30 e 60 dias	88
Figura 4.32. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em H_2SO_4 , rocha sã, 30 e 60 dias	89
Figura 4.33. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias.	89

Figura 4.34. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em mistura H_2SO_4/HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias.	89
Figura 4.35. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em HCl, rocha sã, 30 e 60 dias.	90
Figura 4.36. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em H_2SO_4 , rocha sã, 30 e 60 dias.	90
Figura 4.37. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias.	91
Figura 4.38. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em mistura H_2SO_4/HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias	91
Figura 4.39. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em mistura HCl, rocha sã, 30 e 60 dias.	91
Figura 4.40. Perda de brilho por reagente e período de imersão do Marrom Imperial	95
Figura 4.41. Fácies 2 - 60 dias (imersão) mistura de ácidos	100
Figura 4.42. Variação de massa exibida pelos fácies do Marrom Imperial	102
Figura 4.43. Ensaio Oxidabilidade por choque térmico	103

LISTA DE TABELAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACME	Labs Analytical Laboratories Ltda
Ads	Adsorvido
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEN	European Committee for Standardization
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo
LEMA	Laboratório de Estudos Metalogenéticos Aplicados
IFPE	Instituto Federal de Educação de Pernambuco
ICP	Inductively Coupled Plasma
NBR	Normas Brasileiras de Regulamentação
PGEMinas	Programa de Pós-Graduação em Eng. Mineral
SEG	Sienitos Marrons Muito Grossos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Composição Mineralógica das fácies do Sienito Marrom imperial	57
Tabela 4.2 Composição Química dos fácies. Elementos maiores	58
Tabela 4.3. Perda de brilho dos fácies de Marrom Imperial sob ataque de diferentes soluções lixiviantes, e em diferentes períodos de imersão	94
Tabela 4.4. Perda de brilho percentual por período de imersão em ataque ácido	96
Tabela 4.5. Marrom Imperial: valores médios das massas iniciais e após ensaio de oxidabilidade, por choque térmico	102

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Os materiais pétreos constituem, de longe, um dos mais antigos materiais utilizados pelo homem, apresentando uma grande gama de utilidades em nosso cotidiano. Além de sua aplicação direta na indústria da construção civil, estas são utilizadas como matéria prima para a confecção de diversos produtos, tais como peças de móveis, na produção de cimento, papel, pisos e revestimentos, tintas entre outros.

Vicente et al.(1996), assinalam que a rocha é o principal material de construção de monumentos e edificações, não somente pela sua abundância mais por sua resistência e durabilidade. Estas características, associadas a grande diversidade de padrões cromáticos e estruturais tornam a rocha o material mais largamente utilizado na indústria da construção civil.

Vários são os tipos de materiais pétreos que vêm sendo comercializados para a indústria da construção civil, seja como revestimento, agregado, ou embasamento. Porém, a procura por rochas ornamentais para serem utilizadas como revestimento tem sido cada vez maior, não só pelo efeito estético apresentado por elas, mais também por características como resistência e durabilidade, Flain (2002). Para Petrucci (1998), resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade e estética são propriedades fundamentais as rochas ornamentais.

Em geral, a utilização das rochas como material ornamental se faz pelo seu padrão de beleza que lhe é conferido pelo arranjo de seus minerais constituintes e pela coloração apresentada por eles. No entanto, são as propriedades específicas de cada mineral constituinte do corpo rochoso, tais como: tamanho dos minerais,

dureza, alterabilidade, cor, e estrutura, que irão definir as propriedades tecnológicas da rocha, de modo a apontar qual a melhor utilização para ela.

Segundo Aires-Barros (2001), rochas são sistemas químicos em equilíbrio natural, constituídos por minerais, nas suas variedades “espécies”. Podendo na natureza, estas “espécies” ocorrerem associadas uma às outras formando assim rochas polifásicas, ou ocorrerem sozinhas formando uma rocha monominerálica, onde estaria presente uma única “espécie”.

A homogeneidade química para estes sistemas é bastante complexa uma vez que a rocha pode apresentar diferentes propriedades físicas em porções distintas do corpo, estando tal fato diretamente associado ao ambiente de sua gênese e as condições nele reinantes como: pressão, temperatura, velocidade de resfriamento entre outras.

A composição química, mineralógica e textura são características fundamentais na definição das propriedades físicas, mecânicas e térmicas das rochas ornamentais, de forma que este conjunto de parâmetros determina sua aplicabilidade como assinalado por Sales e Moraes (2003).

Estes sistemas químicos complexos tiveram sua gênese em condições físico-químicas (pressão, temperatura) distintas daquelas em que se encontram hoje. Estas modificações das condições físico-químicas de equilíbrio atuam diretamente e de forma diferenciada sobre cada material rochoso influenciando sua durabilidade e resistência.

Portanto, a escolha de um material pétreo como revestimento, notadamente aqueles utilizados em ambientes externos que experimentarão com maior intensidade os processos de deterioração, que aqueles colocados em ambientes internos, deve estar baseada não somente nas características estéticas da rocha mas também em suas propriedades físico-químicas e mecânicas, de forma a que esta possa atender os esforços e intempéries, aos quais será sujeita durante a vida útil do empreendimento. A perda de brilho, alterações da cor original são formas de deterioração que afetam a estética da rocha, porém processos de alteração mais

extensos geram a redução da resistência mecânica e durabilidade do material pétreo.

A presença de descontinuidades (poros e fissuras) no material pétreo possibilita a circulação de fluidos (líquidos e gases) que são capazes de provocar alterações no material devido a interação deste com o meio ambiente circundante. Para Oliveira & Brito (1998), a alteração intempérica das rochas se inicia quando estas são submetidas a condições ambientais diferentes daquelas de sua formação. Portanto, o intemperismo corresponde a um processo dinâmico, em contínuo desenvolvimento que possui características decorrentes das influências conjuntas de condições climáticas, físicas, químicas e até mesmo biológicas, às vezes, modificadas pelas atividades antrópicas, que atuam sobre os materiais originais, que por sua vez, tem características próprias na composição mineralógica, textural, e estrutural.

Portanto, o decaimento do material rochoso corresponde às modificações estruturais, morfológicas, químicas e mineralógicas sofridas pelo material pétreo, desencadeado pela ação do intemperismo, em resposta às novas condições físicas e químicas a que o material rochoso se encontra submetido que diferem daquelas de sua origem. O mecanismo de decaimento pode ser desencadeado por processos ambientais, pelo uso de materiais incompatíveis, ou ainda, pela utilização inadequada de técnicas de manuseio e materiais utilizados no processo de lavra, pelo tipo de transporte do material, o tipo de beneficiamento, o armazenamento e estocagem do material e ,notadamente, no processo de instalação do material e na sua manutenção.

Segundo López (2002), a utilização de normas internacionais e metodologias reconhecidas para caracterização tecnológica do material pétreo a ser utilizado é considerada de fundamental importância a realização de ensaios tecnológicos padronizados, em rochas a serem usadas como material de revestimento de interiores e exteriores. Ensaio de absorção, peso específico, resistência à flexão, resistência ao congelamento e degelo, resistência ao impacto do corpo duro, coeficiente de absorção por capilaridade e ensaios de alterabilidade, tornaram-se de

extrema importância para a determinação das características tecnológicas do material utilizado.

A alterabilidade do material rochoso portanto seria avaliada por meio de ensaios de alteração acelerada. Nestes ensaios, o material é submetido à ação de agentes tais como substâncias químicas de uso doméstico e industrial, ambientes oxidantes (litorâneos), e condições adversas do meio ambiente como, vapores de ácido sulfúrico, ácido nítrico (chuva ácida), e névoa salina. Estes ensaios têm com finalidade se estimar a resistência à deterioração da rocha em relação aos agentes intempéricos e poluentes atmosféricos, assim como investigar os possíveis mecanismos de desagregação que se apresentam quando estas rochas estão submetidas a ação destes agentes.

Nesta pesquisa, para avaliar a susceptibilidade a alterabilidade de litotipos aplicadas como revestimento interno e externo em monumentos e edificações, frente a acidificação das águas meteóricas em decorrência de ação antrópica. Foram estudados 3 variações texturais do sienito Marrom Imperial, largamente utilizadas na construção de edificações e/ou monumentos, tanto pelo seu padrão de beleza como pela sua durabilidade. Amostras de placas polidas para confecção de corpos de prova foram adquiridas no mercado local e estes materiais tiveram suas características petrográficas, físicas e de alterabilidade avaliadas. Isto permitiu a obtenção de dados que auxiliaram um melhor aproveitamento destes materiais de acordo com sua mineralogia, textura, estrutura e grau de alteração.

Atualmente, a aplicação de materiais como granitos, gnaisses, e gabros, entre outros, vão desde peças artísticas para decoração até a produção de placas polidas para revestimentos de interiores e exteriores, pisos, soleiras, degraus, bancadas, lareiras, tampos de mesa etc; em projetos arquitetônicos que envolvem a utilização de diversidades litológicas e múltiplas aplicações ao material pétreo utilizado. O emprego desses materiais pétreos nas edificações e monumentos de nossa cultura, tem sido cada vez mais difundido e as peças são vendidas tanto no comércio local como exportadas, à medida que a modernização da produção oferece melhoria na qualidade dos produtos brutos e acabados.

Em contrapartida, a nossa sociedade de consumo tem através de suas atividades antrópicas, liberado no meio ambiente cada vez mais poluentes atmosféricos responsáveis por modificações profundas da composição química da atmosfera de nosso planeta com conseqüente acidificação das águas meteóricas que tornam-se assim cada vez mais agressivas ao meio ambiente, ao homem e as suas edificações. Dessa forma, os estudos das características destes materiais, largamente utilizados na construção civil, notadamente como revestimentos (pisos e fachadas), bem como do comportamento dos mesmos mediante a ação do ambiente a que serão expostos são, portanto, de grande importância; pois contribuem para que as obras arquitetônicas de hoje possam corresponder às expectativas de grande durabilidade tão necessárias aos monumentos de nossa cultura.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Gerais

O objetivo geral desta dissertação intitulada “Estudo comparativo de alterabilidade acelerada de três Fácies “comerciais” do Sienito Marrom Imperial”, corresponde ao estudo de prováveis processos de alterabilidade a que três variações texturais distintas do litotipo Marrom Imperial, e que neste trabalho foram renomeadas como fácies 1, fácies2 e fácies 3, de grande empregabilidade como material pétreo de revestimento, estão submetidos, quando de sua utilização como material ornamental e de revestimento, frente a ação dos agentes intempéricos e poluentes atmosféricos, com finalidade se poder avaliar, qualitativamente e quantitativamente, o desempenho de placas de rochas polidas submetidas a ação destes agentes químicos de modo a se prever a resistência à deterioração da rocha em relação a estes agentes. Definindo assim a qualidade e, por conseqüência, a finalidade mais adequada em termos de utilização para as litologias estudadas.

1.2.2. Objetivos Específicos:

Revisão bibliográfica relacionada ao tema proposto: alterabilidade de corpos rochosos.

- Avaliação preliminar da susceptibilidade das litologias estudadas, através da realização de análise petrográfica. Avaliação qualitativa e quantitativa das características relacionadas à composição mineralógica (Me: minerais essenciais, Mac: minerais acessórios, Ma: minerais de alteração), à textura, ao grau de intensidade de microfissuras intergranular (It) e intragranular (Ig), e natureza dos contatos intergranulares será efetuada aplicando-se a norma NBR 12768/1992.
- Determinação dos índices físicos das litologias estudadas, através de ensaios técnicos padronizados (massa específica aparente, porosidade e absorção aparentes), utilizando-se a norma NBR 12766, antes e após os ensaios de alterabilidade acelerada.
- Comparação dos valores de Índice Físicos antes e após os ensaios de lixiviação estática, para monitoramento das possíveis modificações apresentadas pelas litologias, nestes parâmetros.
- Ensaios de alteração acelerada com o objetivo de se conhecer a resistência à deterioração da rocha em relação aos agentes intempéricos e poluentes atmosféricos e investigação dos possíveis mecanismos de desagregação para cada caso. A simulação da exposição das rochas às substâncias químicas presentes no meio ambiente urbano poluído tomando-se como base o ensaio de lixiviação estática denominado pelo IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo), com “ensaio de alterabilidade por imersão em líquidos reativos”; conforme a metodologia estabelecida por este Instituto.
- Controle qualitativo das mudanças estéticas e desgastes visuais sofridos pelo material serão efetuados a partir de comparação com corpo de prova não submetido aos ciclos de imersão e a partir da determinação do brilho apresentada pelos fâcies comerciais estudados antes e após os ensaios de lixiviação estática.

- Controle da possível perda de massa sofrida pelo material será efetuado a partir de comparação da massa do corpo de prova antes dos ciclos de ensaio e após os ciclos de ensaio, quando os corpos de prova serão devidamente pesados.
- Ensaio de determinação da resistência ao envelhecimento por mudança térmica, este também conhecido como ensaio de susceptibilidade a oxidação por choque térmico será realizado submetendo-se os corpos de prova a ciclos sucessivos de aquecimento a 105°C seguidos de imersão imediata em água a 20° C, de acordo com a norma EN 14066. O ensaio visa verificar o decaimento da rocha após ciclos de aquecimento e resfriamento rápido, ou seja, das variações térmicas bruscas que propiciem dilatação e contração constantes, causa de uma das principais desagregações de corpos rochosos.

As informações, dados, resultados e interpretações são apresentadas a seguir com a seguinte organização:

O Capítulo I introduz o assunto relativo ao tema estudado;

O Capítulo II expõe a Revisão Bibliográfica sobre o contexto de estudo;

O Capítulo III aborda os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa;

O Capítulo IV corresponde a apresentação, interpretação e discussão dos resultados obtidos, dos ensaios de Alterabilidade acelerada da litologia estudada;

Finalmente, o Capítulo V apresenta as Conclusões do tema estudado.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentação Teórica

Os materiais pétreos constituem, de longe, um dos mais antigos materiais utilizados pelo Homem, apresentando uma grande gama de utilidades em nosso cotidiano. Podemos deste modo, classificar estes materiais, largamente empregados pelo homem, como rochas e minerais industriais.

Segundo Gomes et al.(1998), minerais industriais são minerais ou associações de minerais utilizados para fins industriais de forma que, com estes ou a partir de compostos deles derivados, possamos fabricar produtos ou materiais que satisfaçam os requisitos impostos a uma melhora na qualidade de vida.

Nesta categoria de Minerais Industriais encontra-se uma grande gama de materiais pétreos que são largamente utilizados e dentre estes estão incluídas as rochas ornamentais.

Estes materiais pétreos, de grande utilização em nosso dia a dia, podem ser empregados em numerosos setores da atividade econômica, notadamente nas indústrias de construção civil e obras públicas, de transformação de rochas ornamentais, do cimento, papel, química, cerâmica, vidro, abrasivos, entre outros.

Segundo Vicente et al (1996), a rocha é o principal material de construção dos monumentos e edificações européias, não somente pela sua abundância mas por sua resistência e durabilidade. Estas características, associadas à grande diversidade de padrões cromáticos e estruturais tornam as rochas os materiais mais largamente utilizado na indústria da construção civil, onde são utilizadas no revestimento de fachadas, pisos, paredes, elementos decorativos, que fornecem assim maior valor agregado às obras onde são usadas.

2.1.1. Material Pétreo Ornamental e de Revestimento

A rocha, em geral, é um recurso natural da maior importância e de grande valor para a construção civil. Além da aplicação direta, as rochas são utilizadas como matéria prima para a confecção de diversos produtos, tais como peças de móveis, na produção de cimento, papel, tintas entre outros.

Desde a época do Império Romano, o ser humano utiliza calcários de origem sedimentar ou metamórfica como materiais de construção. Na época da colonização portuguesa, foram utilizadas no Brasil as rochas graníticas e gnáissicas talhadas, ou seja, não polidas, para colunas de prédios, molduras de janelas, escadas externas, etc. O uso das rochas polidas importadas da Europa, sobretudo mármore, começou no período colonial. Depois da independência do Brasil, acentuou-se a sua utilização como pisos, escadas, pias, etc.

A produção nacional de mármore iniciou-se no Século XX, em 1908, no Município de Mar de Espanha, sul do Estado de Minas Gerais e, em 1938, conseguiu cobrir 73% do consumo nacional. Até a primeira metade do Século XX, os mármore foram mais utilizados para usos ornamentais altamente decorativos, portanto, as lojas que trabalham com rochas ornamentais são denominadas, “marmorarias”, no entanto, atualmente além de mármore outros tipos de rochas são comercializados. Junto com a importação da tecnologia de corte das rochas por meio de serras diamantadas motorizadas em maiores escalas industriais, o uso dos “granitos” iniciou-se na década de 1950.

O termo “granito” aqui apresentado não corresponde exclusivamente à rocha denominada granito, englobando também outras rochas. O Brasil possui uma das maiores reservas mundiais de granitos (superiores a 1.500.000.000 m³), sendo a extração realizada diretamente dos maciços rochosos, bem como dos matacões isolados sobre existentes.

Atualmente, observa-se a utilização das rochas na forma talhada na construção de meios fios, muros, pontes, revestimentos de túneis, calçamentos, bem como na forma polida, nos revestimentos para pisos, fachadas de prédios e paredes

em ambientes internos e externos, e também como peças de ornamentos domésticos.

2.1.2. Rochas Ornamentais

Rochas chamadas “ornamentais” *stricto sensu* são aquelas submetidas ao polimento e utilizadas com fins decorativos na superfície de objetos . As rochas ornamentais são materiais que agregam valor principalmente através de suas características estéticas, destacando-se o padrão cromático, desenho, textura e granulação. Neste sentido, o alto brilho da superfície polida é um fator de extrema importância.

Segundo Frascá (2003), pode-se fazer uma distinção entre rochas de revestimento e ornamentais, onde as rochas de revestimento seriam aquelas que foram submetidas a diversos processos e graus variados de desdobramentos e beneficiamento sendo utilizadas no acabamento de superfícies, em especial pisos e fachadas; enquanto as rochas ornamentais seriam aquelas submetidas a diferentes graus e tipos de beneficiamento ou aperfeiçoamento utilizado para exercer uma função estética.

Assim, portanto, as rochas, sejam de revestimento ou ornamentais, são materiais rochosos naturais que, depois de extraídos, sofrem desdobramentos e beneficiamentos para seu uso na indústria da Construção Civil.

No entanto, no *lato sensu*, são também aqui incluídas as rochas não polidas, porém que têm usos decorativos, consideradas assim, “rochas semi-ornamentais”, (Vargas et al, 2001). Diferentes destas, as rochas utilizadas como materiais de construção em geral, cuja importância principal é a firmeza física, não são considerada rochas ornamentais.

A produção e o consumo das rochas ornamentais do Brasil apresentaram crescimento notável nas últimas décadas, sendo estas utilizadas amplamente para revestimento externo de prédios, pisos, paredes, mesas, pias, etc.

Em comparação com outros países, o uso das rochas ornamentais no Brasil é muito grande, sobretudo, as rochas chamadas popularmente de “rochas coloridas” altamente decorativas e abundantes tanto em quantidades quanto em variedades. Estas rochas de cores exóticas e diferenciadas, como vermelha, rosa, amarela, verde e azul, apresentam-se como grande atrativo para utilização na indústria da Construção Civil. Alguns estados brasileiros destacam-se na produção de rochas ornamentais, tais como Espírito Santo, Bahia, Ceará, São Paulo, Pernambuco, Goiás e Rio de Janeiro.

Vários são os tipos de materiais pétreos que vêm sendo comercializados para a indústria da construção civil, seja como revestimento, agregado, ou embasamento. Porém, a procura por rochas ornamentais para serem utilizadas como revestimento tem sido cada vez maior, não só pelo efeito estético apresentado por elas, mais também por características como resistência e durabilidade, Flain (2002). Para Petrucci (1998), resistência mecânica, durabilidade, trabalhabilidade e estética são propriedades fundamentais as rochas ornamentais.

A composição química, mineralógica e textura, são características fundamentais na definição das propriedades físicas, mecânicas e térmicas das rochas ornamentais, de forma que este conjunto de parâmetros determina sua aplicabilidade como assinalado por Sales e Moraes (2003).

Para verificação das características físicas e mecânicas das pedras de construção, nomeadamente as que se traduzem por resistência e durabilidade, recorre-se a métodos de ensaios padronizados, onde estas propriedades são devidamente quantificadas. De forma que, a caracterização tecnológica do material a ser lavrado satisfaz às necessidades da aplicabilidade a que eles se destinam.

2.1.3. Classificação Comercial das Rochas Ornamentais

No tocante à classificação comercial, os principais tipos de rochas ornamentais são os granitos e os mármore. Tal terminologia não é geologicamente correta, pois para o comércio “mármore” é toda rocha carbonatada, de origem sedimentar (calcário ou dolomito) ou metamórfica (mármore sensu stricto).

Para o mercado, o termo granito corresponde a qualquer rocha não-calcária, capaz de receber corte e polimento e passível de ser usado como material de revestimento; para o mercado o que mais interessa são os aspectos estéticos, e as características tecnológicas das mesmas.

Deste modo, o termo granito designa um amplo conjunto de rochas silicáticas, compostas predominantemente por feldspatos e quartzo. Esta terminologia abrange um grande grupo de rochas homogêneas (granitos, sienitos, monzonitos, charnoquitos, diabásios, basaltos, etc.) assim como aquelas denominadas de movimentadas como os gnaisses e migmatitos, que também são rochas ornamentais utilizadas como materiais de revestimento na construção civil, não sujeitos a processos industriais de desdobramento de blocos.

Compreendem, portanto, este grupo as ardósias, arenitos, basaltos, quartzitos, gnaisses, além de outros materiais passíveis de serem extraídos já em forma laminada, ou que sejam utilizados em revestimento, independente da mencionada forma (Vidal, 1995). A seguir são apresentadas, de modo simplificado, as principais características desses materiais:

2.1.3.1. Granitos

Os “granitos” correspondem cientificamente às rochas ígneas e metamórficas de granulometria grossa compostas principalmente de minerais félsicos, tais como quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio.

Devido à alta dureza destes silicatos, os “granitos” necessitam serras diamantadas para o corte. Fazem parte deste grupo, a álcali feldspato granito, granito, quartzomonzonito, granodiorito, quartzo diorito, tonalito, dolerito, gabro, álcali sienito, nefelina sienito, gnaisse facoidal, ortognaisse, paragnaisses, charnockito, granulito, etc.

Os “granitos” são fisicamente mais difíceis de serem explorados e beneficiados que as rochas carbonáticas sedimentares ou metamórficas. Entretanto,

têm alto brilho no polimento e alta durabilidade mecânica sendo, portanto tratados como rochas ornamentais de qualidade máxima.

As cores das rochas são fundamentalmente determinadas pelos constituintes mineralógicos. Os minerais formadores dos granitos (lato sensu) são definidos por associações variáveis de quartzo, feldspatos, micas, piroxênios e anfibólios, com diversos minerais acessórios em proporções reduzidas.

O quartzo normalmente é translúcido, incolor ou fumê; os feldspatos conferem a coloração avermelhada, rosada e creme-acinzentada nos granitos. A cor negra, variavelmente impregnada na matriz das rochas, é conferida por teores variáveis de mica (biotita), e principalmente piroxênio e anfibólio.

A resistência à abrasão dos granitos é normalmente proporcional à dureza dos seus minerais constituintes. Dentre os minerais formadores destas rochas temos de acordo com a Escala Mohs, o quartzo com dureza 7 e os feldspatos com dureza 6. Entre os granitos, a resistência ao desgaste será, normalmente, tanto maior quanto maior a quantidade de quartzo.

2.1.3.2. Mármore

As rochas comercialmente designadas por mármore englobam lato sensu as rochas carbonáticas, incluindo calcários, dolomitos e seus correspondentes metamórficos (os próprios mármore). Os calcários são rochas sedimentares compostas principalmente de calcita (carbonato de cálcio), enquanto os dolomitos são rochas também sedimentares formadas sobre tudo por dolomita (carbonato de cálcio e magnésio). Os mármore resultam do metamorfismo (modificações ocorridas na rocha devido a variações nas condições de pressão e temperatura, em relação ao ambiente de origem) de calcários e dolomitos.

Nos mármore, o padrão cromático é definido por minerais acessórios e impurezas, pois os constituintes principais (calcita e dolomita) são normalmente brancos. A dureza (resistência ao risco) é sensivelmente menor nos mármore do que nos granitos, pois seus constituintes (calcita e dolomita) apresentam dureza na

Escala Mohs entre 3 e 4; nos granitos, como vimos anteriormente, as durezas (do feldspato e do quartzo) são respectivamente, 6 e 7.

Para se distinguir um mármore de um granito, dois procedimentos simples são recomendados: Os granitos não são riscados por canivetes, chaves ou pregos, como os mármore; e os mármore reagem ao ataque do ácido clorídrico (ou muriático), efervescendo tanto mais intensamente quanto maior o seu teor em calcita.

Os travertinos, a exemplo dos calcários, são rochas carbonáticas essencialmente calcíticas (carbonato de cálcio). Podem apresentar-se pouco ou não metamorfizadas e são definidas pela sua coloração bege-amarelada. Apresentam características físicas muito heterogêneas, marcadas por bandeamento concêntrico ou tabular, cavidades, estruturas alveolares, feições brechoides e freqüentes impurezas argilosas e silicosas.

No setor de rochas ornamentais os travertinos são comumente referidos como mármore. No Brasil, diversas ocorrências de travertinos são descritas e assinaladas em mapas geológicos, com depósitos mais expressivos na região Nordeste e particularmente explorados na Bahia.

2.1.3.3. Quartzitos, Arenitos e Conglomerados

Quartzitos e arenitos são rochas compostas essencialmente por quartzo. Geralmente, arenitos são rochas sedimentares clásticas (originadas do acúmulo e consolidação de sedimentos de granulação areia: 0,02 a 2,0 mm), enquanto os quartzitos originam-se a partir de metamorfismo de rochas sedimentares, como os próprios arenitos. Em razão de sua gênese, os arenitos são normalmente mais porosos e menos resistentes do que os quartzitos.

A composição quartzosa (dureza 7) de arenitos e quartzitos lhes confere alta resistência ao risco e ao desgaste abrasivo. Algumas variedades de quartzitos são relativamente flexíveis e desenvolvem deslocamento em planos preferenciais de foliação, determinados, sobretudo pela orientação de placas de mica. Arenitos com

estrutura estratificada ou laminada podem permitir deslocamento ao longo das camadas, geralmente sobrepostas e paralelas entre si.

Conglomerados são também rochas sedimentares clásticas, que diferem dos arenitos por apresentarem constituintes (sedimentos) de maior diâmetro (superior a 2,0 mm). Tais constituintes, referidos como seixos e grânulos compõem-se basicamente de fragmentos de quartzo e tipos variados de rocha (quartzitos, granitos, gnaisses, etc). Os conglomerados utilizados como rocha ornamental geralmente acham-se afetados por metamorfismo, o que lhes confere maior coesão entre os grãos e maior resistência mecânica.

2.1.3.4. Ardósia

As “ardósias” correspondem principalmente às rochas sedimentares ou metamórficas de composição pelítica não metamorfoseadas com clivagem desenvolvida, tais como ardósia, varvito e folhelho. Compõe-se essencialmente de mica(muscovita-sericita), quartzo e clorita. Excepcionalmente, certos tipos de muscovita xisto, quartzito e gnaiss com clivagem ou bandamento bem desenvolvido são comercializados como “ardósias”.

Em comparação com os “granitos” e os “mármore”, as “ardósias” são de baixo valor comercial sendo tratadas como rochas semi-ornamentais (Vargas et al, 2001). Portanto, a maioria das “ardósias” não possui nome comercial específico. A utilização geral é de forma não polida para pisos e paredes.

2.1.3.5. Basaltos

Os “basaltos” comercialmente não têm o mesmo sentido do termo científico, mas sim, são os tufos altamente soldados de composição riolítica e dacítica que se encontram exclusivamente no extremo sul do Brasil. Apesar de sua importância comercial na Região Sul, esta rocha praticamente não é comercializada em outras regiões do Brasil. Trata-se de rochas semi-ornamentais e utilizadas de forma não polida para pisos, paredes e pavimentações decorativas.

2.2. Llitologia Estudada

2.2.1. Granito Marrom Imperial

O granito Marrom Imperial tem suas principais ocorrências localizadas em Pedra do Navio e Fazenda das Pedras, no município de Bom Jardim. Ocorrem sob a forma de lentes de monzonitos, pertencentes à Suíte Shoshonítica de idade neoproterozóica. A rocha apresenta textura granular isotrópica, constituída essencialmente por cristais de feldspatos regularmente distribuídos em uma matriz máfica homogênea, o que produz um padrão estético bastante atraente.

Em placa polida estas texturas do Granito Marrom Imperial constituem três fácies distintos, onde o primeiro é formado essencialmente por feldspatos marrons com auréolas finas de tonalidade rosa acentuada (denominado, neste trabalho como fácies 3), imersos em matriz formada principalmente por minerais máficos de tonalidades de negra a negro-esverdeada; a segunda apresenta-se formada por feldspatos marrons com auréolas finas de tonalidade rosa clara a branca (Fácies 1), também imersas em matriz composta essencialmente por minerais máficos de cor negra a negro-esverdeada; e a terceira, formada por feldspatos marrons sem auréola (fácies 2), igualmente imersos em matriz composta por minerais máficos de cor negra a negro-esverdeado.

O método de lavra praticado é sob a forma de bancadas, utilizando-se fio diamantado, perfuração contínua, explosivos de baixa carga, além de “jet-flame”, ocasionalmente. O Marrom Imperial possui reconhecida aceitação no mercado internacional ao preço de U\$ 700,00/ m³. A rocha encaixante deste litotipo é um quartzo-sienito que também se presta à utilização como rocha ornamental, embora com menor valor comercial, sendo comercializada no mercado interno sob o nome de Lilás Imperial.

2.3. Alterabilidade

Estes materiais, designados genericamente por “granitos” são corpos rochosos que tiveram sua gênese em condições físico-químicas (pressão, temperatura) distintas daquelas em que se encontram hoje. Estas modificações das condições físico-químicas de equilíbrio atuam diretamente e de forma diferenciada sobre cada material rochoso influenciando sua durabilidade e resistência.

O envelhecimento do material rochoso, um aspecto particularmente importante nas diversas aplicações das rochas ornamentais como material de construção propriamente dito, vem ganhando cada vez mais destaque. Modificações do material rochoso principalmente aqueles utilizados como revestimento externo, têm sido frequentemente observados.

Petrucci (1998), assinala que alterações de uma rocha correspondem a modificações de suas características e propriedades decorrentes da ação de vários agentes agressivos que podem atuar através de processo físico ou químico. De modo que esta alterabilidade poderá vir até na extração e corte das pedras, porém atuarão de forma negativa sobre a resistência mecânica, durabilidade e efeito estético do material rochoso. No entanto, muitas alterações sofridas pelos materiais pétreos acrescentam a rocha valorização devido ao aspecto estético que o corpo rochoso adquire após ação destes processos de alterabilidade. Aqui vale ressaltar os chamados “granitos amarelos” cuja coloração é decorrente do processo de alteração, sendo este aspecto muito valorizado pelos “designers” e arquitetos. Para Melo e Oliveira (2005), a granulometria do material rochoso está intimamente associada com a possibilidade de decomposição do material, sendo portanto fator de relevância nos processos de alteração dos materiais pétreos.

A ABNT, através da NBR 6502 (1995), caracteriza alterabilidade como sendo a facilidade que uma rocha apresenta de sofrer alterações em seus constituintes. Tal susceptibilidade depende das características internas da rocha como: composição mineralógica, presença de microfissuras, porosidade, permeabilidade, planos de fraquezas secundários, entre outras, assim como da intensidade e tempo de duração de agentes naturais externos e/ou internos.

Apesar do processo de alterabilidade dos materiais rochosos ser um processo espontâneo e, portanto, natural, este traz grandes inconvenientes à durabilidade e resistência destes materiais. Para Birkeland (1974), os termos climatização, meteorização são sinônimo de alteração, pois, para este autor, climatização corresponde a processo de alteração de rochas e minerais para formas mais estáveis diante da variação das condições de umidade, temperatura, atividade biológica a que o material rochoso está submetido.

Pode-se entender alteração como sendo a estabilização tanto da microestrutura como da composição da rocha, frente às novas condições de equilíbrio, onde estas alterações podem gerar novas propriedades e desempenho para o corpo rochoso.

Segundo Aires-Barros (2001), alterabilidade seria definida como “a susceptibilidade da rocha em se alterar em função do tempo”. Toledo, et al. (2000), assinalam que o tempo é um fator relativo no processo de alteração do material pétreo, pois os processos de alteração dependem de outros fatores como da composição química e mineralógica da rocha, e do próprio clima.

A formação dos minerais primários constituintes do material rochoso pode se dar a partir de processos magmáticos, metamórficos, hidrotermais, ou mesmo sedimentares. No entanto, os minerais formados por qualquer destes processos são passíveis de sofrerem alteração. Quando as condições de equilíbrio a que estes minerais estão submetidos diferem daquelas predominantes em sua gênese, o material pétreo torna-se passível de alteração. Muito embora que a alterabilidade dos minerais esteja relacionada a um conjunto de outros fatores como mencionado anteriormente.

Portanto, os materiais pétreos sofrem processos de alteração por se tratarem de sistemas físico-químicos constituídos por fase sólida e fase fluida, que se formaram em condições de equilíbrio físico-químico diferentes daquelas atuais onde o corpo rochoso se encontra aflorante.

A diferença de condições entre o ambiente atual e o de sua gênese, leva a instabilidade do material pétreo que tende a se acomodar as novas condições de equilíbrio. Em resposta a estas mudanças de condições de equilíbrio, os processos de intemperismo físico criam micro e macro fraturas nas rochas, originando assim cavidades que vão facilitar e acelerar a infiltração de soluções aquosas e a ação de microorganismos vivos. Inicia-se assim uma série de reações químicas cuja predominância varia em função das condições ambientais e da composição mineralógica das rochas, podendo vir a afetar a estrutura da rocha produzindo alteração.

A fase sólida, deste sistema físico-químico, é constituída por minerais que se cristalizaram em diferentes condições, levando estes a apresentarem tanto diferença de composição mineralógica, como química. Estas diferenças presentes entre os distintos minerais constituintes da rocha levam à formação de um material pétreo heterogêneo que apresenta inúmeras descontinuidades como poros e fissuras, além de que conferem a estes minerais a capacidade de reagirem de forma diferenciada quando submetidos a solicitações externas. Portanto, temos minerais que se apresentam mais resistentes aos processos de alteração que outros. Assim, os minerais que se cristalizaram em condições de pressão e temperatura mais elevada mostram-se mais susceptíveis aos processos de alteração que aqueles onde o processo de cristalização ocorreu em condições menos severas, como se pode constatar a partir do diagrama de Goldich.(1938).

O material rochoso quando submetido às condições atmosféricas tornam-se vulnerável a ação de diversos agentes que são capazes de reagir com o material pétreo provocando assim sua alteração.

Este processo de meteorização ao qual o material pétreo esta sujeito, se processa de forma diferenciada para os diferentes minerais formadores da rocha. Portanto, uns minerais são mais susceptíveis a alteração que outros.

Segundo Goldich (1938), os minerais silicatados constituintes do material pétreo seguem, em geral, uma série de estabilidade face à meteorização. Os minerais que se formaram em condições de equilíbrio muito diferentes daquelas

condições ora reinantes apresentam-se mais instáveis que aqueles que se formaram em condições de equilíbrio mais próximas das condições atuais. Muito embora seja necessário se observar que este não corresponde ao fator determinante para o processo de alteração do material pétreo, pois este também depende de outros fatores já citados.

Segundo a ABNT, NBR 6502 (1995), o processo de alterabilidade do material rochoso pode se apresentar em diferentes estágios de gradação que variam desde rocha sã ou pouco alterada, a mediantemente alterada, a muito alterada. No entanto, esta classificação apresenta-se bastante subjetiva necessitando de um aprimoramento mais técnico e científico que defina e estabeleça bases quantitativas para o enquadramento do material nas diversas categorias.

As rochas que apresentam alterações incipientes ao longo das fraturas, com perda inexpressiva de sua resistência e durabilidade são ditas rochas sãs. Nestas rochas os componentes mineralógicos originais se encontram praticamente inalterados sem apresentar assim perda significativa da sua resistência mecânica.

O material pétreo que apresenta alterações incipientes ao longo das fraturas com pequena perda de resistência mecânica quando comparada a rocha sã são ditas como mediantemente alteradas. Estes corpos rochosos apresentam alguns componentes mineralógicos originais ainda inalterados, porém, 1/3 do corpo da rocha encontra-se alterado e neste caso as superfícies mostram parcialmente a ação do intemperismo.

As rochas classificadas como muito alteradas são aquelas que apresentam 2/3 do corpo rochoso contendo alterações, e intensa decomposição das superfícies com desagregação de material ou por ação mecânica ou em presença de água. Nestes corpos rochosos, os componentes mineralógicos, exceto o quartzo, foram transformados pelo intemperismo químico de forma que a estrutura da rocha matriz se encontra friável e, portanto o material se caracteriza por se encontrar em estado de transição entre rocha e solo.

Para Birkeland (1974), as alterações físicas provocam a desintegração do material em fragmentos menores sem alteração química nem mineralógica na composição do material pétreo, no entanto as alterações químicas envolvem tanto alterações da composição mineralógica como química do material rochoso. Faz-se necessário notar que estes processos na maioria das vezes ocorrem simultaneamente e encontram-se intimamente associados.

Segundo Olgyay (1998), as alterações sofridas pelo material pétreo envolvem processos químicos, físicos e biológicos. Os processos químicos são mais dependentes da presença da água como fluido percolante. Os processos tanto físicos como químicos são afetados pela variação de temperatura. As diferenças de temperatura alteram o aspecto físico do material rochoso provocando variações em suas dimensões e sua fissuração, enquanto que a elevação da temperatura provoca aumento velocidade de muitas reações químicas e eleva os níveis de radiação provocando alterações fotoquímicas no material. Os agentes biológicos também provocam alterações tanto físicas como químicas no material rochoso que se aceleram com o aumento da umidade.

Petrucci (1998), assinala a presença de dois tipos de fatores de alteração que são responsáveis pelas modificações sofridas pelo material pétreo. O primeiro deles trata-se de um fator mecânico que está associado à desagregação e desgastes no material, e o segundo é físico-químico, que está associado à degeneração e modificações do material. Os processos de alteração provocados pela variação de temperatura e crescimento de cristais são tidos respectivamente como mecânicos e físico-químicos.

É importante notar que alterações físicas resultantes do alívio de tensões geradas no interior da rocha provocam ruptura do material pétreo. Estas rupturas se darão através de um plano preferencial de fraqueza (plano de fratura), ou entre as superfícies dos grãos, conforme constituição do material pétreo e também do sentido da tensão aplicada. Um fator gerador de tensões no interior do corpo rochoso se deve a heterogeneidade do material pétreo onde a variação de temperatura provoca dilatações diferentes nos minerais constituintes do corpo rochoso gerando tensões contrárias em seu interior que tendem a fissurar e desagregar a rocha.

Thomaz (1999), assinala que as movimentações térmicas de um material estão relacionadas com as propriedades físicas do mesmo e com a intensidade da variação da temperatura. De modo que a magnitude das tensões desenvolvidas é função da intensidade de movimentação, do grau de restrição imposto a esta movimentação e das propriedades elásticas do corpo.

Faz-se necessário notar que outros fatores capazes de provocar alterações no material pétreo se fazem presentes quando utilizamos este material como revestimento e/ou ornamento. Diversos autores como Maranhão (2002), Rolim Filho (2002), assinalam que diversas patologias apresentadas por materiais pétreos aplicados como revestimento, em obras de construção civil, não são decorrentes apenas das especificações da rocha, mas estão relacionadas a outros fatores como técnicas de manuseio e materiais utilizados no processo de lavra, o tipo de transporte do material, o tipo de beneficiamento, o armazenamento e estocagem do material e notadamente no processo de instalação do material e na sua manutenção.

Para Aires-Barros (2001), as características das rochas usadas para fins ornamentais estão relacionados com fatores intrínsecos da rocha, tais como intensidade e tipo de alteração, presença de tensões confinadas, heterogeneidade textural, e suas propriedades físicas e químicas. Sendo ainda importantes os fatores externos relacionados com os processos de extração e beneficiamento como defeitos resultantes dos processos de serragem e, polimento e brilho que podem vir a ocasionar ou mesmo ampliar microfraturas já existentes no material.

Dos processos de alteração sofridos pelo material pétreo, aqueles capazes de modificarem a composição mineralógica e química e, portanto as características tecnológicas do material são de longe os mais danosos. No entanto, torna-se difícil separar os processos responsáveis pela alteração do material pétreo em categorias, físico, químico e biológico, uma vez que na maioria das vezes estes processos ocorrem simultaneamente sendo um, muitas vezes, decorrente da ação do outro.

2.3.1. Principais Agentes de Alteração de Materiais Rochosos

Frascá (2003), resume as principais causas da degradação do material rochoso como sendo resultante da ação do clima, dos agentes utilizados na limpeza e manutenção do material, da ação da poluição ambiental e da cristalização de sais.

Observam-se aqui dois grandes grupos de processos de alteração, que são: aqueles de ocorrência natural (a ação da água, variação de temperatura, ação dos organismos vivos, etc); e aqueles processos desencadeados pela ação antrópica, relacionados às alterações físicas provocadas pelo homem, e as ações provocadas pelos agentes químicos atmosféricos, e agentes químicos empregados na limpeza e manutenção do material rochoso. Neste trabalho detalha-se a ação de diversos agentes capazes de promover alterações nos materiais rochosos.

2.3.2. A água

Dentre os agentes capazes de provocar processos de alterações nos materiais pétreos, a água é sem dúvida um dos mais importantes, estando associada à maior parte dos processos de deterioração, podendo atuar através de mecanismos físicos e químicos, ou na maioria das vezes em ambos. A água é o meio que carrega os agentes químicos capazes de reagirem com os componentes minerais das rochas promovendo a sua alteração. Os fenômenos de evaporação de soluções carreadoras de eletrólitos dissolvidos como sais de sódio, potássio entre outros, formação de nevoeiros, condensação de umidade atmosférica, processo de congelamento e de degelo, e saturação, são todos, na realidade, fenômenos em que a água encontra-se diretamente envolvida.

No estado líquido a água infiltra-se através dos poros e fraturas do material rochoso penetrando este de fora para dentro, podendo provocar a dissolução de certos minerais presentes na rocha. Por outro lado a água existente no solo pode subir por capilaridade para o interior do material rochoso carregando consigo sólidos dissolvidos. Nesta forma de solução, a água líquida carrega para o interior do corpo rochoso eletrólitos que podem vir a reagir como os minerais constituintes da rocha funcionando como meio de contato entre os agentes químicos de alteração e a

rocha. Como também, podem provocar o aumento de tensões internas devido à evaporação do solvente água, promovendo a concentração da solução de modo a torná-la supersaturada; neste momento, o coeficiente de solubilidade da solução foi ultrapassado e, haverá a formação de cristais no material pétreo.

Quando a cristalização dos sais ocorre na superfície do material pétreo este processo denomina-se de eflorescências, no entanto quando a cristalização se dá no interior do material, este processo se chama criptoflorescência.

As eflorescências formam-se, em geral, quando a evaporação do solvente se faz com certa lentidão e a simples exposição dos sais cristalizados à ação da chuva leva a seu desaparecimento por dissolução ou mesmo por remoção do material. Nestes casos a ação dos sais cristalizados é menos efetiva sobre o material. Entretanto, quando o processo de cristalização dos sais ocorre no interior do material rochoso sua ação é bem mais efetiva e desagregadora sobre a rocha, uma vez que as variações de condições físicas do meio levam a processos como dissolução, expansão e retração dos sais. Estes processos provocam elevação das tensões internas do material rochoso com conseqüente possibilidade de desagregação.

Quanto à origem dos sais, estes podem ter origem interna ou externa; assim, podem ser encontrados presentes no material pétreo antes mesmo de sua aplicação como revestimento e ou adorno, mas também podem se originar a partir da alteração dos minerais que constituem a rocha. Originam-se também a partir de pontos externos, tais como materiais de rejunte ou da alvenaria de base, quando o material rochoso é utilizado como revestimento do solo, ou ainda advindo da atmosfera ou de produtos utilizados na limpeza e conservação do material rochoso.

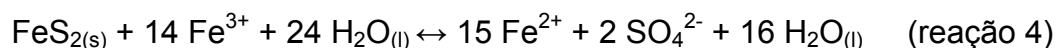
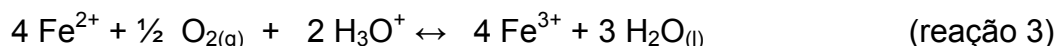
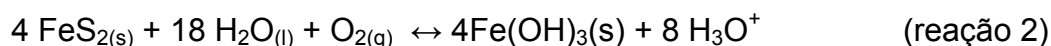
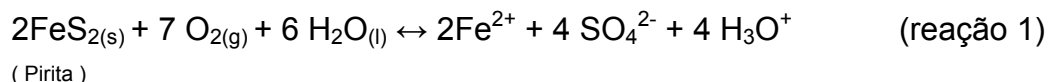
Estes cristais formados a partir de sólidos que se encontravam dissolvidos na água podem gerar tensões internas que provocariam a desagregação do material rochoso que, por vezes, se destacam em lascas de dimensões consideráveis e se cobrem de eflorescências. O crescimento de cristais dentro da estrutura pétrea deve-se à penetração de agentes externos nos vazios pré-existentes, cristalizando-se e expandindo-se, gerando, portanto tensões que desagregam a estrutura

existente. Para Ollier (1984), o crescimento de cristais de sais provenientes da evaporação da solução percolante pode, em algumas circunstâncias, causar desagregação da rocha. Cooke e Smalley (apud Ollier, 1984) ressaltam que o crescimento de sal em espaço confinado pode causar estresse por expansão termal ou hidratação.

A água na forma sólida (gelo) pode provocar a ruptura e desagregação do material rochoso devido à sua expansão. Os ciclos de gelo e degelo levam a água a gerar tensões internas capazes de promover a desagregação do material pétreo. Na fase de degelo a água se encontra na forma líquida podendo assim infiltrar-se pelos poros e fraturas do material rochoso. Na fase de gelo esta água se solidificaria provocando o aumento de tensões internas no material. Além destes fatos, a presença de material expansivo, como por exemplo, argilas presentes no corpo rochoso poderiam levar ao aumento de tensões internas no material devido aos ciclos de molhagem e secagem a que o corpo rochoso estaria submetido. A elevação de tais tensões internas provocaria desagregação do material devido a originar fissuras microscópicas ou mesmo macroscópica no interior do corpo rochoso.

Sob a forma de solução, a água também é responsável por diversas reações químicas, dentre estas destacamos as reações de óxido-redução. Estas reações se desenvolvem quando o material rochoso apresenta, em sua constituição, minerais metálicos que possuam mais de um estado de oxidação possível, e se encontram no estado menos oxidado, como é o caso dos sulfetos metálicos. De acordo com Petrucci (1998), um dos principais processos de óxido-redução são aqueles que envolvem a oxidação de sulfetos encontrados nos materiais rochosos sob a forma de pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}_{n-1}\text{S}_n$), e marcassita (FeS_2). Estes minerais contendo ferro encontram-se sob a forma de sulfetos, e deste modo apresentam o íon metálico ferro no seu estado de oxidação menor, isto é $2+$. Em presença do ar e da água o ferro será oxidado e passará a apresentar estado de oxidação mais elevado, passando para a valência $3+$. A pirita é oxidada e dissociada quando exposta ao ar e a água, liberando $\text{Fe } 2+$ em solução, que pode ser rapidamente oxidada a $\text{Fe } 3+$ e posteriormente precipitada na forma de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Depois de iniciada a primeira reação se estabelece um ciclo onde o $\text{Fe } 2+$ é oxidado a $\text{Fe } 3+$ (reação

03) e subsequentemente reduzido pela pirita a Fe²⁺, liberando assim no meio Fe²⁺ na forma de sulfato ferroso, Fe³⁺ na forma de hidróxido e sulfato e ácido sulfúrico, como podemos observar a partir do conjunto de reações abaixo:



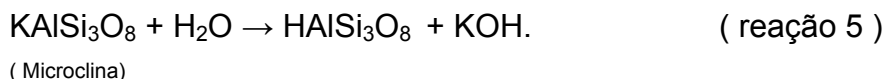
Aires-Barros (2001) salienta que os sulfetos ferrosos transformam-se pela ação da água e do oxigênio nela dissolvido em sulfatos ferrosos e férricos e em hidróxido férrico, concomitantemente se origina também ácido sulfúrico, de modo que é a presença deste ácido que explica a maior intensidade das ações de meteorização.

A siderita, um carbonato ferrosos (FeCO₃), oxida-se facilmente originando óxido férrico ou hidróxido férrico dependendo da abundância de água. O hidróxido férrico se converte, em parte, em limonita nas regiões temperadas e se acumula sobre os próprios locais de formação. Nas regiões quentes os minerais de ferro se convertem em hematita. Assim, estas últimas transformações é que são responsáveis pela coloração amarelo-acastanhada das zonas meteorizadas presentes nas rochas que contem minerais de ferro.

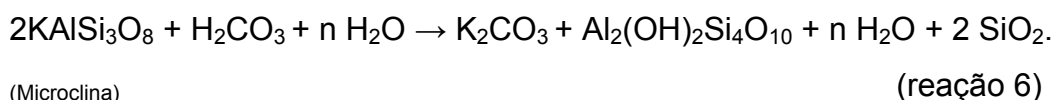
Segundo Leinz e Amaral (1995), hidratação e hidrólise são também importantes fatores de degradação química do material pétreo desencadeadas pela presença da água. Uma vez o material pétreo hidratado, a água absorvida permanece nos capilares dos minerais promovendo o contato entre os íons H⁺ e OH⁻ (provenientes da dissociação iônica da água), e os cátions constituintes dos diversos minerais presentes no material rochoso, desta forma desencadea-se o fenômeno químico denominado de hidrólise salina.

Analisando-se a estrutura química dos diversos minerais presentes no material rochoso, observamos que muitos destes minerais senão a maioria são sais

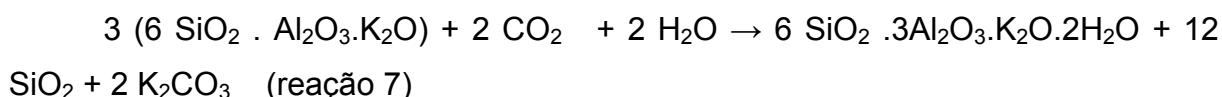
hidrolisáveis e, portanto o contato entre estes íons H^+ e OH^- e os minerais desencadeiam a partir de reações lentas, a quebra da estrutura cristalina do mineral como se pode observar abaixo, pela reação:



Outro processo de alteração pode se desenvolver quando a água meteórica dissolve em seu interior gases como CO_2 , SO_2 e NO_2 , provenientes da atmosfera, promovendo a formação de ácidos carbônico, sulfúrico e nítrico respectivamente, que podem atuar sobre os minerais presentes no material rochoso promovendo sua alteração. Abaixo se observa a ação do ácido carbônico sobre o mineral microclina (feldspato) gerando argilomineral conforme a reação abaixo.



Ou de modo mais detalhado como abaixo:



Este processo denominado de caulinização afeta os feldspatos das rochas graníticas gerando um produto baço, pulverulento, brando, desagradável. De modo que os feldspatos caulinizados se mostram no microscópio com aspecto nebuloso, poroso, Aires-Barros (1991, 2001).

Segundo Frazão & Paraguassu (1998), este processo de alteração intempérica é observado nas rochas graníticas, onde a ação dos ácidos sobre os feldspatos promove a caulinização dos mesmos e por conseqüência a desagregação do material rochoso em material areno-argiloso.

Os feldspatos são minerais essenciais presentes nos “granitos” e resultam da associação de dois ou três silicatos, um silicato de alumínio que se encontra

associado a outro silicato alcalino ou alcalino-terroso. De forma que as águas meteóricas, promovem a hidratação dos feldspatos. Os silicatos anidros de alumínio e do metal alcalino se hidratam e se separam. As águas meteóricas contendo em geral gases dissolvidos como CO_2 , SO_2 , NO_2 , produzirão ácidos que então reagem com os feldspatos promovendo a sua caulinização.

Aires-Barros (2001), assinala que a ação hidrolítica das águas sobre os feldspatos e feldspatóides, produz em uma primeira fase a formação de ácidos alumino-silícicos e de hidróxidos alcalinos e alcalinos terrosos. Estes resultantes da substituição dos cátions presentes nos minerais pelo íon H^+ , com conseqüente fixação dos íons metálicos pelos íons hidroxila provenientes da água.

2. 3.3. O Vento

Um dos fatores de alteração do material pétreo é o vento que está estreitamente relacionado com o clima. Dependendo do clima, o vento pode transportar tanto particulados em suspensão como aerossóis. Deste modo, as ações tanto físicas como químicas podem estar presentes. Em climas secos a ação mais efetiva do vento torna-se mecânica devido ao choque do material particulado, transportado por este, contra as rochas. A grande capacidade erosiva do vento carreando material particulado provoca, em muitos materiais rochosos, cavidades características que podem atingir profundidades apreciáveis o que se define como corrosão eólica. Em regiões mais úmidas temos os processos de alteração tanto físico como químico ocorrendo simultaneamente, de modo que, em regiões mais úmidas, a ação química é também significativa uma vez que os aerossóis transportados podem ser ricos de eletrólitos dissolvidos nas pequenas gotículas de aerossol. Pode-se observar este fato de forma mais acentuada nos ambientes costeiros onde, além de particulados como areia, aerossóis são constantemente formados e carregados para a costa pela ação do vento.

Particulados químicos finíssimos como NO_2 , SO_2 , provenientes da poluição atmosférica podem também ser transportados sob esta forma, Baird (2005). Uma vez depositados, estes materiais reativos aguardam hidratação para gerarem ácidos fortes que rapidamente se ionizam e reagem com o material rochoso. O vento

também influencia na cristalização dos sais dissolvidos e carregados na forma de aerossóis. À medida que o material é depositado sobre o corpo rochoso, as gotículas do aerossol se fundem dando origem a gotas maiores que penetram no material rochoso através de poros, fendas e fraturas. E assim, o vento acelera a velocidade de evaporação da água incrementando-se a cristalização de sais contidos nesta solução.

2.3.4. A Temperatura

A ação da temperatura sob os processos de alteração de corpos rochosos se dá tanto por processos físicos como químicos. Nos processos físicos observamos que as variações de temperatura levam o corpo rochoso, de composição heterogênea, a apresentar diferentes coeficientes de dilatação/contração, para os seus diferentes constituintes. Estas diferenças provocam variações de volumes que terminam por fraturar o corpo rochoso levando assim à sua desagregação. Em geral a temperatura não se distribui uniformemente sobre toda a espessura do corpo, o que contribui ainda mais para susceptibilidade de rupturas, fissuras e esfoliações no corpo rochoso.

Os ciclos de gelo e degelo a que os corpos rochosos estão submetidos, também provocam rupturas e fraturas. A água na forma líquida penetra nos poros, fendas e fraturas já existentes e ao se solidificar com a diminuição da temperatura aumenta de volume, se expande provocando assim a desagregação e fissuração da rocha.

A variação de temperatura também atua de forma contundente sobre os processos químicos uma vez que a elevação de temperatura acarreta aumento de velocidade das reações de forma que muitas reações químicas são favorecidas pela elevação da temperatura.

2.3.5. Agentes Biológicos

Aires-Barros (2001), assinala que os agentes biológicos capazes de promoverem alterações nas rochas pertencem a várias categorias, assim temos:

algas e líquens, bactérias, protozoários, fungos, plantas e animais. Estes organismos tanto podem encontrar-se na superfície do material pétreo com no seio destes.

Estes atuam através de ações químicas diretas (biocorrosão) ou de forma indireta como catalisadores de reações de hidrólise, sulfatação entre outras, podendo ainda atuarem sobre o material rochoso através de processos físicos como bioabrasão e desagregação.

Segundo Aires-Barros (2001), pode-se dividir a biota em químico-litotrófica e químico-organo-heterotrófica, onde as primeiras são produtoras de H_2SO_4 e HNO_3 e as segundas, são produtoras de H_2CO_3 e ácidos orgânicos. De forma que estes agentes biológicos, traduzem suas ações por diversos processos, entre eles o mais significativo, é a biocorrosão química provocada por depósitos de dejetos de animais. Os excrementos de aves e morcegos contendo nitratos podem deteriorar a rocha, uma vez que fornecem substrato para ação microbiológica que produzirá ácidos capazes de reagirem com o material pétreo.

Alterações de materiais rochosos pela ação de agentes biológicos, também ocorrem através de processos físicos. A ação de árvores e vegetação parasita tem importância sobre a deterioração tanto de monumentos como sobre construções de pedra, em geral, quando estas se desenvolvem na superfície ou sob o corpo rochoso, nutrindo-se, por vezes, de sais e matéria orgânica que extraem do material a que se fixam. A ação das raízes do vegetal pode provocar a desagregação do material pétreo sob o qual estão fixadas.

A ação de microorganismos também é notada sobre o material pétreo. A presença de algas e de organismos com elas aparentados está associada a ambientes que apresentam elevada umidade. Os ciclos de umidificações e secagens acarretam a desagregação do material pétreo por meios físicos, embora que estes microorganismos também contribuam para a deterioração química do material principalmente nos climas tropicais.

As rochas silicáticas que contenham uma população de bactérias têm tendência em se desagregar, embora de forma lenta inicialmente, sendo o processo

significativamente acelerado ao final de determinado tempo de exposição. Esta ação bacteriana atua no seio das microfissuras e a partir de reações de óxido-redução incidem diretamente sobre os minerais constituintes das rochas, ataca os silicatos, carbonatos e óxidos, constituintes do material pétreo, Aires-Barros (2001).

2.3.6. Poluentes Atmosféricos

Nossa atmosfera corresponde a um cinturão gasoso que envolve todo o planeta. Este orbital gasoso que envolve a Terra corresponde a uma mistura de gases e vapores que se estende desde a superfície do planeta até cerca de 50 km. Pode-se portanto, dividi-la em troposfera e estratosfera, onde troposfera compreende a porção que se estende desde a superfície da terra até 15 km, e a estratosfera, a porção que se estende de 15 a 50 km. Estas porções distintas de nossa atmosfera apresentam composições químicas diferentes, com a predominância de determinados gases sobre a outra, e onde em cada uma delas se desenvolvem reações químicas específicas e importantes para a manutenção da vida em nosso planeta.

De modo geral, nossa atmosfera, livre de poluentes, é constituída basicamente de uma mistura gasosa. Segundo Aires-Barros, 1991, esta apresenta a seguinte composição química. Nitrogênio - 75,5 %, Oxigênio - 23,15%, Argônio - 1,28%, Dióxido de carbono - 0,016%, Neônio - 0,00125 %, Kriptônio - 0,00029%, Hélio - 0,000072%, Xenônio - 0,000036%, Hidrogênio - 0,000003, Ozônio - 0,000002% e Vapor de água que apresenta-se com percentual variado.

Para Baird (2002), uma das principais características da atmosfera de nosso planeta é que ela é um ambiente oxidante, fenômeno que se explica pela presença de altas concentrações de oxigênio diatômico (O_2). De modo que quase todos os gases liberados no ar sejam eles substâncias poluentes ou naturais são totalmente oxidados e seus produtos finais, ao longo do tempo, são depositados na superfície da Terra. Este mecanismo seria, portanto responsável pela limpeza do ar.

Entretanto, o equilíbrio desta fase gasosa vem sendo constantemente ameaçado e sua composição química vem sendo gradativamente alterada pelo

grande quantitativo de substâncias químicas liberadas, diretamente na atmosfera. Estas substâncias, na maior parte dos casos, provenientes das atividades denominadas de “produtivas” desenvolvidas pelo homem, comprometendo a integridade de todo o sistema gasoso do planeta. Novos gases, material particulado, além de finos aerossóis têm sido constantemente liberados em nossa atmosfera alterando a sua composição e desencadeando reações e formação de novos compostos que são capazes de provocar danos ao planeta como um todo, ao próprio homem, e as estruturas construídas por estes.

Para Aires-Barros (2001), contaminação atmosférica corresponde a presença no ar de substâncias ou formas de energia que alteram a qualidade do ar de modo a provocar riscos graves para as pessoas, animais ou plantas, assim como para os bens imóveis de qualquer natureza.

Dois mecanismos principais capazes de emitir poluentes na atmosfera estão presentes. O primeiro ocorre através de processos naturais e o outro a partir da atividade antrópica, que é de longe o principal responsável pela contaminação atmosférica.

Nas emissões desencadeadas por processos naturais encontram-se os fenômenos de emissão de COVs (compostos orgânicos voláteis) pelos vegetais presentes nas florestas, as erupções vulcânicas, fonte de H_2S , e SO_2 , e a presença de NO_2 advinda da oxidação do material vegetal que contem nitrogênio, além dos incêndios florestais.

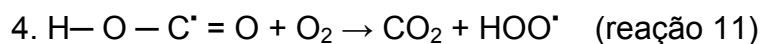
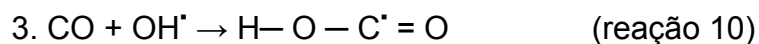
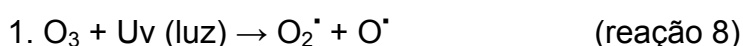
As emissões de poluentes para atmosfera, provocadas pela ação do homem, são a queima de combustíveis fósseis, e o crescimento industrial. Destas principais fontes poluidoras o crescimento industrial é, de longe, o mais nefasto, devido ao número de focos, ao volume de suas emissões e características e teor dos contaminantes, Aires-Barros (1991, 2001), Baird (2002), Dionísio *et al.* (2004).

Dentre os agentes poluentes que mais tem desencadeado agressões aos materiais rochosos destacamos os gases CO, CO_2 , SO_2 , e NO e NO_2 , compostos orgânicos voláteis (COVs), ozônio produzido pelo smog fotoquímico, além de

aerossóis contendo H_2SO_4 , NH_4HSO_4 , NaCl , HNO_3 , HCl , ácidos orgânicos, e material particulado sólido.

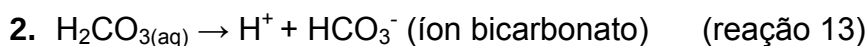
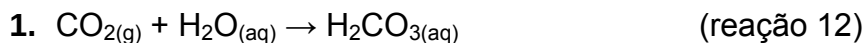
O monóxido de carbono, um gás inodoro e incolor, se origina a partir de reações de oxidação incompleta de compostos orgânicos, que podem se dar a partir de processos naturais (vulcanismo, atividades biológicas), ou por atividade antrópica (combustão incompleta de combustível fóssil). De longe a ação antrópica é a mais contundente, devido à grande concentração de monóxido de carbono lançada na atmosfera a partir da combustão incompleta de combustível fóssil, sendo esta alta concentração de CO resultante do mau funcionamento e baixo rendimento dos aparelhos de combustão desenvolvidos pelo homem.

Segundo Baird (2002), este gás será gradativamente oxidado no ar a dióxido de carbono CO_2 através de mecanismo complexo que envolve a sua reação com os radicais $\text{OH}^\bullet$ e não por sua oxidação direta com o oxigênio diatômico. Portanto a sua oxidação envolve a disponibilidade de radicais livres $\text{OH}^\bullet$ que se originam a partir da decomposição fotoquímica de quantidades traços de ozônio que produzem átomos de oxigênio no estado excitado. Estes por sua vez reagem com o vapor de água gerando os radicais livres $\text{OH}^\bullet$, que reagirão com o monóxido de carbono oxidando-o a CO_2 , conforme mecanismo abaixo:



Entretanto, a principal ação deste poluente sobre os materiais pétreos está associada a sua capacidade de gerar CO_2 , que se combina com a água e através de processo de deposição úmida, é transferido para a superfície terrestre. O CO_2 reage com a água tanto dos aerossóis quanto com a água meteórica formando ácido

carbônico que rapidamente se ioniza liberando H^+ e íon bicarbonato conforme mecanismo abaixo:



Devido a esta fonte de acidez, o pH destas soluções é inferior a 7,0, e portanto se localiza em região ácida.

A água que evapora de rios, lagos, oceanos, do solo, etc., possui valores de pH próximos a neutralidade $pH = 7$. No entanto, na natureza, o vapor de água se combina com gases atmosféricos, notadamente o CO_2 promovendo a formação de ácido carbônico que em meio aquoso se dissocia segundo as reações 12 e 13, promovendo assim, a acidez das águas meteóricas. No caso destas águas meteóricas, o pH da chuva “natural”, não poluída, é de aproximadamente 5,6, Baird (2002), embora Simon & DeFries (1992) citem chuvas naturais isentas de poluentes, com faixas de pH de 5,4 a 5,2. De forma que, apenas a chuva que apresenta pH inferior a 5,0 é considerada chuva ácida, Baird (2002).

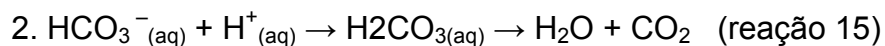
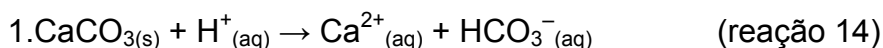
Esta diminuição de pH, além da faixa de 5,6, apresentado pelas águas, deve-se a traços de ácidos fortes que podem ser lançados na atmosfera tanto por processos naturais (vulcanismo, incêndios florestais, decomposição natural de vegetais, etc), como por ação antrópica. As erupções vulcânicas podem liberar na atmosfera quantidades apreciáveis de poluentes que geram ácidos fortes como HCl , H_2SO_4 e provocam assim chuvas ácidas temporárias. A ação antrópica, ao contrário destes eventos esporádicos, libera continuamente quantidades apreciáveis de poluentes como CO_2 , SO_2 , NO_2 de forma que os ácidos derivados destes poluentes são formados durante o transporte da massa de ar que os contem.

Segundo Baines (1993), a chuva ácida gerada a partir de ação antrópica possui valores de pH que podem variar desde de 4,9 a 1,9. Como a escala de pH é logarítmica, o valor de 4,9 corresponde a aproximadamente 100 vezes mais ácida que o pH neutro ($pH = 7$), enquanto o valor de pH de 1,9 corresponde a aproximadamente 100.000 vezes mais ácido que a neutralidade. Este acréscimo

significativo de acidez torna as águas mais reativas acentuando diversos mecanismos de decaimento do material pétreo.

Devemos notar, no entanto, que a precipitação ácida na forma de chuva é apenas uma das várias formas de precipitações ácidas que podem ocorrer, e que portanto devemos também considerar as outras formas como neve, granizo, e neblina ácida, formas estas típicas de outras regiões em nosso país.

Baird (2002), ainda assinala que as áreas mais afetadas pela ação das chuvas ácidas são constituídas de granitos e quartzo, uma vez que nestas regiões o solo tem menor capacidade de neutralizar esta acidez. Porém se as rochas são calcáreas, o ácido pode ser neutralizado de maneira eficiente devido ao conteúdo de carbonato de cálcio presente no corpo rochoso que reage com a acidez conforme mecanismo abaixo:



As reações acima apresentam alto rendimento, uma vez seque quase até o final devido ao excesso de $\text{H}^+_{(aq)}$, e deste modo corpos rochosos podem ser dissolvidos produzindo H_2O e CO_2 .

Estas reações são responsáveis pela deterioração de monumentos, estátuas, e adornos confeccionados em rochas calcárias e mármore. Nas estátuas, os detalhes finos como mãos, orelhas, dedos, nariz são parcialmente ou totalmente perdidos pela ação das chuvas ácidas.

A ação das águas acidificadas pela dissolução de gases poluentes como CO_2 , SO_2 , e NO e NO_2 sobre os granitos, provocam alteração dos feldspatos e feldspatóides presentes no corpo rochoso, levando à sua caulinização como já anteriormente descrito.

Diversas alterações podem ser observadas nos corpos rochosos devido à ação de águas acidificadas. Muitas destas alterações estarão diretamente ligadas à composição mineralógica do corpo rochoso, e a presença de minerais susceptíveis a alteração. Em geral, as alterações mais observadas são: o oligoclásio, mineral silicatado da família dos feldspatos cálcio-alcálinos, e a nefelina, também um mineral silicatado do tipo feldspatóide, são sensíveis a ácidos notadamente o HCl; os minerais máficos (escuros) são mais alteráveis por oxidação que os minerais félsicos (claros), salientando-se que o hiperstênio, mineral máfico da família dos piroxênios e constituinte dos charnockitos (granitos verdes tipo Ubatuba), degrada-se por insolação e modifica o padrão cromático da rocha. As reações tanto decorrentes de oxidação como de ataque ácido podem ocorrer simultaneamente aumentando ainda mais a capacidade de alteração do material pétreo.

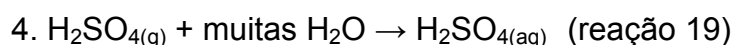
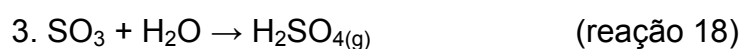
Os sulfetos, minerais metálicos que ocorrem como acessórios, tanto em mármore quanto em granitos, serpentinitos e quartzitos, não só se oxidam, mais ou menos rapidamente, quando expostos às condições atmosféricas, mas também reagem com ácidos que promovem sua dissolução e conseqüente acidificação do meio pela formação de H_2S . Deste modo, constitui-se em um dos principais problemas das rochas de revestimento.

As emissões de NO_x e SO_2 também são responsáveis direta ou indiretamente pela maior parte de outros poluentes secundários, gerados a partir de reações, onde estes gases estão envolvidos.

O SO_2 , um gás incolor de odor picante e irritante, com o dobro da densidade do ar, pode se depositar tanto por processo de deposição líquida como sólida. Se combinado com a água meteórica e dissolvido nesta produz ácido sulfúrico, provocando chuva ácida. Se depositado como particulado, aguarda para se combinar com a água, gerando ácido e agredindo o material rochoso, utilizando assim uma via de deposição seca.

Aires-Barros (2001), Baird (2002), Dionísio et al. (2004), assinalam que a oxidação do SO_2 na atmosfera a ácido sulfúrico (H_2SO_4) pode se dar através de dois mecanismos distintos, um em fase gasosa e outro em fase aquosa. O mecanismo

em fase gasosa se desenvolve em dias com céu limpo e com nuvens ocupando pequena percentagem de volume troposférico, enquanto a oxidação em fase aquosa se dá devido à solubilidade do gás SO₂ na água. Esta oxidação em fase gasosa apresentaria o possível mecanismo abaixo:



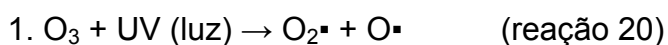
Ao passo que a oxidação em fase aquosa do SO₂ a SO₄⁻² seria efetuada por quantidades traços de agentes oxidantes bem conhecidos como H₂O₂, e O₃ presentes nas gotas transportadas no ar, onde a H₂O₂ e O₃ seriam resultantes principalmente de reações induzidas pela luz solar no smog fotoquímico, Baird (2002).

O NO_x, uma combinação de NO[•] e NO₂, são espécies que se originam principalmente da queima de combustível fóssil nos motores de explosão e algumas indústrias. Estes compostos são poluentes primários e fundamentais para a geração de HNO₃ a partir do fenômeno denominado de smog fotoquímico.

Este fenômeno corresponde ao resultado de reações complexas que se desenvolvem, a nível da troposfera, entre os diversos compostos na maior parte gasosos. Estas reações levam a formação de produtos intermediários e produtos finais sendo todos extremamente danosos ao homem, plantas, animais, afetando também os materiais. Este conjunto de reações envolve a participação dos compostos NO[•] e NO₂, compostos orgânicos voláteis (COV_s), e o gás oxigênio (O₂). De forma simplificada, pode-se traduzir este fenômeno pela equação: COVs + NO_x + O₂ → → mistura de O₃, HNO₃ e compostos orgânicos parcialmente oxidados. No entanto, este processo é bem mais complexo e envolve ainda a participação de particulados em suspensão, da luz, e de temperaturas moderadamente elevadas,

além de exigir pouco movimento das massas gasosas de forma a garantir as condições adequadas para as reações se processarem.

O ácido nítrico formado por este processo tem como característica principal ser um ácido forte e também oxidante. No entanto seu processo de formação não se dá pela oxidação direta do NO^* pelo oxigênio do ar, mais sim por reação com radicais Hidroxila (HO^*), produzidos a partir da reação do produto de decomposição do ozônio com a água (conforme reação 20 e 21), ou mesmo pela decomposição do peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (reação 22), presente no smog fotoquímico conforme as reações abaixo:



Sendo o radical hidroxila o principal agente na remoção química, por oxidação, da maior parte dos gases menores da troposfera, estabilizando sua composição e evitando acúmulo de muitas espécies que podem interferir na estabilidade da camada de ozônio da estratosfera, Aires-Barros (1991, 2001).

O ácido nítrico formado no smog fotoquímico, apresenta uma taxa de deposição que é relativamente independente da umidade do ar, o que o torna especialmente importante em climas secos e quentes, Dionísio et al. (2004).

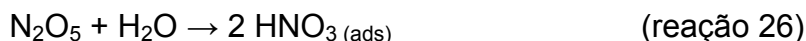
O decaimento promovido pelos óxidos de nitrogênio, notadamente NO^* e NO_2 , torna-se difícil de ser observável, uma vez que, os produtos formados apresentam elevada solubilidade em água (341g/100g de água a 25 °C). Diversos autores como Aires-Barros (2001), Dionísio et al, 2004, Baird (2002), assinalam a possibilidade de vários mecanismos de decaimento para o ataque destas espécies ao material pétreo. Um destes seria através da deposição a seco do NO_2 com posterior adsorção deste à superfície do material pétreo, conforme a equação:



Outro mecanismo se tornaria possível quando concentrações elevadas de ozônio (O_3) e NO_2 estivessem presentes. Neste caso teríamos a formação do pentóxido de nitrogênio (N_2O_5) que reagiria com água formando ácido nítrico através do seguinte mecanismo:



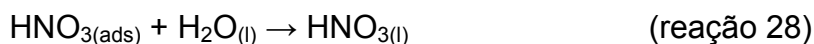
O $N_2O_{5(ads)}$ formado apresenta a possibilidade de dois mecanismos de ação. No primeiro, o N_2O_5 combina-se com a umidade do ar gerando ácido nítrico conforme a reação abaixo:



Outro mecanismo se daria por adsorção a seco ou a úmido, à superfície do material pétreo. A seco o N_2O_5 combina-se com o SO_2 gasoso e com a água gerando assim ácido sulfúrico e NO_2 conforme a reação:



No mecanismo de adsorção a úmido o $HNO_{3(ads)}$ combina-se com a água da umidade do ar gerando ácido nítrico líquido conforme reação:

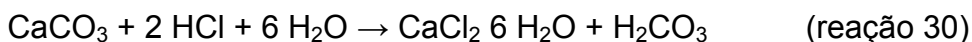


Nos monumentos situados próximos à região litorânea, notadamente aqueles próximos ao mar, deve-se considerar a ação do íon cloro que provem fundamentalmente da névoa salina e aerossóis transportados pelo vento e que é rica em sais marinhos notadamente NaCl.

O ácido clorídrico pode ser gerado a partir de reação do cloreto de sódio marinho com ácido sulfúrico obtido da oxidação do SO_2 segundo a reação:



Este fato está diretamente associado à ocorrência do mineral thenardita (Na_2SO_4), presente nas eflorescências salinas dos monumentos e edificações construídos nesta região próxima ao mar. Nos monumentos em pedra calcária, edificadas em regiões litorâneas, nota-se a presença, nestas eflorescências, do mineral antarctita ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) que se gera de acordo com a reação abaixo, Aires Barros (1991):



Portanto, a ação destes poluentes atmosféricos e de alguns dos seus produtos formados, atua diretamente sobre o material pétreo provocando decaimento da rocha. Nos materiais rochosos constituídos por pedra calcária, o fenômeno de sulfatação é o principal responsável pelos processos de decaimento estando diretamente relacionado com a gênese da crosta, em geral de gipsita, que se deposita na superfície do material pétreo.

Segundo autores como Aires-Barros (1991, 2001), Dionísio et al. (2004) a equação que traduz a reação de sulfatação dos calcários promovida pelas águas pluviais pode ser escrita como abaixo:



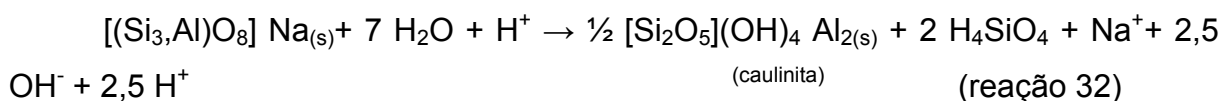
Embora, o mecanismo de ação de transformação de rocha são em carbonato de cálcio, CaCO_3 e posteriormente em $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ainda não está totalmente esclarecido, no entanto, pode-se perceber a presença fundamental de três processos distintos, que são: deposição a úmido: Pode se dar por oxidação heterogênea do SO_2 na fase aquosa na atmosfera, ou sobre a superfície da rochas; e a oxidação homogênea do SO_2 em aerossol de sulfato, realizada na troposfera. O terceiro mecanismo corresponde ao processo de deposição a seco do SO_2 , Aires-Barros (1991).

Segundo Aires-Barros (1991, 2001), e Baird (2002), nas atmosferas poluídas o nevoeiro fotoquímico supõe oxidação atmosférica dos COVs, gerando espécies

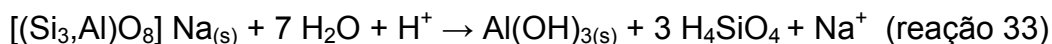
fotoquímicas que desempenham papel importante na oxidação do SO₂, conforme descrito anteriormente. Nestes casos a oxidação homogênea do SO₂ é significativa.

Em um primeiro estágio a oxidação do SO₂ nas atmosferas urbanas contaminadas geram partículas sulfatadas que podem se dissolver nas gotículas de vapor de água e serem depositadas na superfície dos monumentos. Em segunda fase, o nevoeiro sulfatado com gotículas de ácido sulfúrico, atuará sobre a superfície das pedras calcárias, dando origem a crosta gipsífera mais ou menos desenvolvida, Aires-Barros (1991), Dionísio et al (2004).

Com relação às rochas quartzo-feldspáticas, granito-gnaissóides, o principal fenômeno de decaimento observado pela ação destes poluentes é a arenização com concomitante enfraquecimento das ligações físicas. Este fenômeno permite a ocorrência de processos de esfoliação e escamação, além de modificações químicas importantes como argilização dos feldspatos e cloritização dos minerais ferromagnesianos, em especial as biotitas. A presença destes ácidos provoca diminuição do pH da água pela presença de íons H⁺, acelerando assim as reações de hidrólise e óxido-redução. O processo de meteorização dos aluminossilicatos presentes nestes materiais pétreos supõe normalmente dissoluções acompanhadas de formação de precipitados de modo que a dissolução de feldspatos é acompanhada de precipitação de caulinita ou de hidróxido de alumínio Al (OH)₃ conforme as reações abaixo:



ou



3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Normas e Ensaios

Normas e ensaios são procedimentos padronizados que tem como objetivo alcançar resultados preciosos e passíveis de comprovação sobre as características e propriedades de um material estudado. Assim, os ensaios e normas aplicados ao estudo das rochas têm como objetivo a avaliação do desempenho das mesmas perante os processos de alterabilidade, determinando assim suas possíveis aplicações sem perda de suas características principais.

No Brasil, a sistematização das normas é regida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que através das Normas Brasileiras (NBR), fixa os parâmetros. Há uma série de ensaios regularizados pela ABNT sobre o uso de rochas como material de revestimento e/ou ornamental. Estas normas são reguladoras da nomenclatura, e principalmente de análise das propriedades das rochas.

No entanto, para os ensaios de alterabilidade estas normas ainda são pouco abrangentes, de modo que, para realização de ensaios ainda não normalizados pela ABNT se recorre às Normas Internacionais, como a americana ASTM – American Standard of Testing and Materials ou as européias CEN (European Committee for Standardization).

Alguns ensaios não normalizados foram empregados e seguiram método desenvolvido por entidade de pesquisa como IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo) conforme recomendado por Becerra-Becerra, e Costa (2007). Deste modo, na presente pesquisa, far-se-á uso de normas padronizadas brasileiras, européias e, em alguns casos, por normas desenvolvidas pelo IPT.

Segundo Rolim Filho et al. (2005), as normas brasileiras NBR são baseadas nas normas americanas ASTM, que tem gerado algumas divergências a cerca de alguns procedimentos de ensaios. Ocorrendo ainda desacordos devido à infidelidade de resultados de ensaios acelerados quando comparados aos ensaios efetuados em tempo real. No entanto, faz-se necessário notar que estes ensaios são apenas parâmetros para a utilização da rocha, tentando diminuir a probabilidade de alteração, aumentando a durabilidade do material pétreo e orientando a sua aplicação em relação às suas características particulares.

A pesquisa envolveu as etapas mostradas no fluxograma e detalhadas em seguida (figura 3.1).

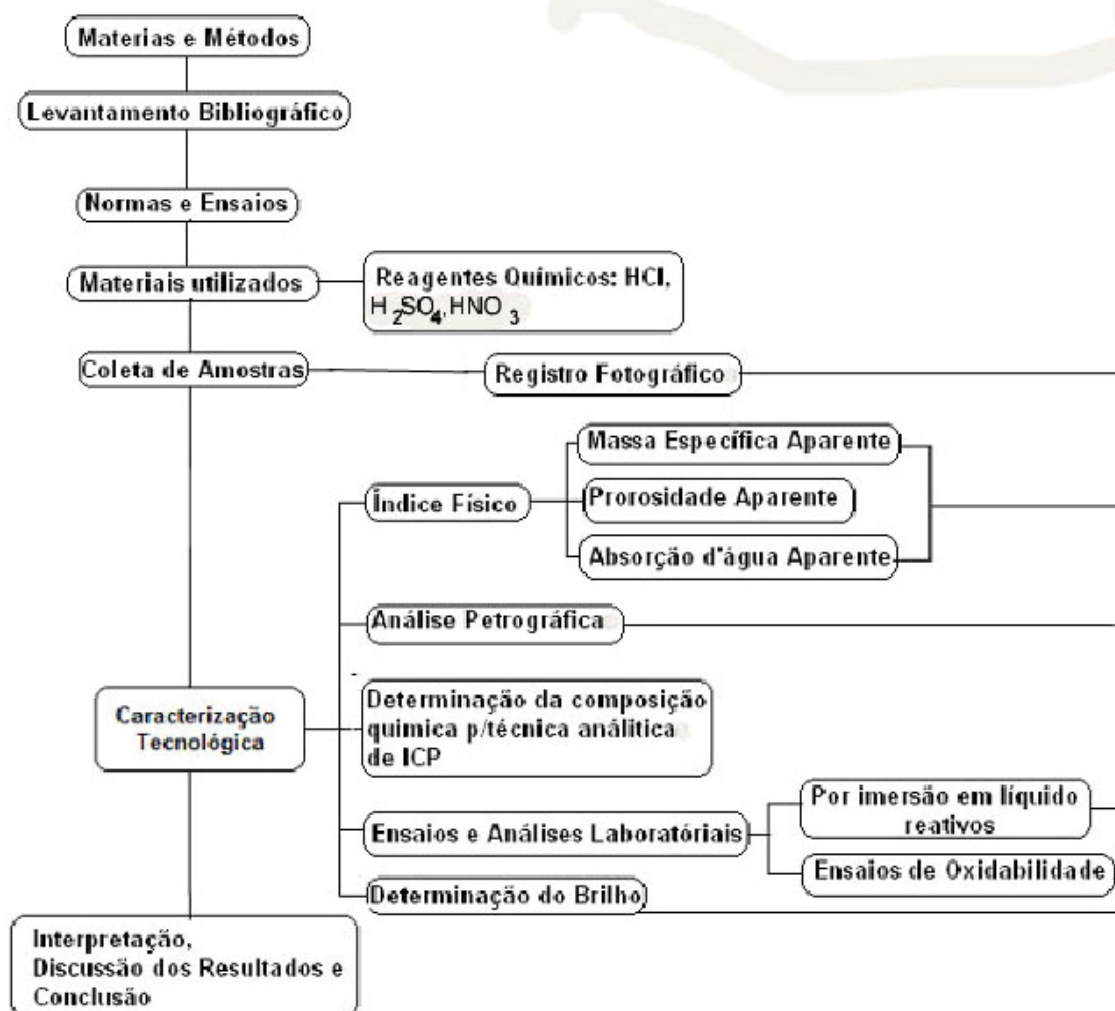


Figura 3.1: Fluxograma das atividades desenvolvidas na pesquisa.

3.2. Materiais utilizados

A litologia selecionada para estudo, corresponde a um dos cinco fácies maiores do Complexo Bom Jardim, tendo sido classificada por Guimarães e Silva F^o (1992) como sienitos marrons muito grossos (SEG), que se encontra atualmente no mercado Nacional e Internacional de rochas ornamentais com o nome comercial de Marrom Imperial (Imperial Brown).

Deste “granito” Marrom Imperial, foram selecionadas três variações texturais macroscopicamente reconhecíveis, sob as denominações de: fácies 1 (sienito com cristais de feldspatos alcalinos envolvidos por auréola de cor rosa pálida a branca); facies 2 (sienito com feldspatos não aureolados); e fácies 3 (sienito com feldspatos alcalinos envoltos em auréola de tonalidade rosa escura).

Foram obtidas amostras destes facies, a partir de placas polidas em marmorarias, onde foram devidamente cortadas em corpos de prova de dimensões 5X5X2 cm, constituindo portanto corpos de massas próximas a 160 gramas. A escolha destas dimensões para os corpos de prova está diretamente relacionada ao fato de não haver comprometimento dos ensaios de determinação dos índices físicos, segundo a norma NBR 12766, embora, alguns destes granitos apresentem textura porfirítica, contendo cristais grandes e bem formados de feldspatos. Outro fator de importância para a escolha destas dimensões para os corpos de prova é que estas possibilitam a determinação da massa das amostras, antes e depois dos ensaios de imersão, em balança analítica de quatro casas decimais, o que aumenta a sensibilidade e fiabilidade para a determinação deste parâmetro.

3.2.1. Levantamento bibliográfico

Nesta primeira etapa realizou-se o levantamento bibliográfico sobre o tema proposto. Neste foram consultados documentos referentes aos processos de alterabilidade tanto em monumentos históricos como em edificações recentes, assim com consulta a documentos referentes a ação de poluentes atmosféricos sobre os materiais pétreos, notadamente os poluentes atmosféricos SO₂ e NO_x, e os aerossóis marinhos, dados sobre caracterização tecnológica e textos de normas

técnicas e ensaios de caracterização tecnológica de rochas ornamentais e de técnicas de ensaios de alterabilidade acelerada.

3.2.2. Ensaios e Análises laboratoriais

Os ensaios e/ou análises realizadas neste trabalho tiveram como alvo a caracterização petrográfica, mineralógica, química, tecnológica e de alterabilidade dos materiais rochosos selecionados para o reconhecimento das características intrínsecas de cada litotipo, assim como das prováveis alterações apresentadas pelo material, impostas a estes, pela acidificação das águas meteóricas, decorrentes das modificações ambientais por ação antrópica.

Os ensaios para a determinação dos índices físicos (massa específica aparente seca e saturada, porosidade e absorção aparentes), foram desenvolvidos no Laboratório de Rochas Ornamentais do PPGEMinas da Universidade Federal de Pernambuco, utilizando-se a norma NBR 12766.

Ensaios para determinação da composição química das litologias estudadas, para determinação da composição química em termos de elementos químicos maiores e menores foram efetuadas a partir de análises químicas por via úmida desenvolvidas no Laboratórios da ACME, tanto para o material são como para os materiais pétreos que após período de imersão se mostraram mais susceptíveis ao ataque químico. De modo a se obter mais detalhes a cerca do processo de alterabilidade e auxiliar na interpretação das alterações observadas nos ensaios de imersão.

3.2.3. Análise petrográfica

Uma das ferramentas básicas para avaliação da susceptibilidade preliminar do material rochoso à alteração, são fornecidas pela análise petrográfica. De acordo com Artur et al (2001), a realização destas análises para avaliação qualitativa e quantitativa das características petrográficas relacionadas com a composição mineralógica (Me: Minerais essenciais, Mac: Minerais acessórios, Ma: Minerais de alteração), com a textura, o grau de intensidade de microfissuras intergranular (It) e

intragranular (lg), e natureza dos contatos intergranulares. das litologias estudadas, constituem poderosa ferramenta para avaliação preliminar da susceptibilidade das litologias, quando as mesmas são utilizadas em diferentes situações.

Análise petrográfica do material selecionado foi o primeiro mecanismo utilizado para a caracterização das litologias selecionadas. Nesta foram realizadas análises macroscópica e microscópica das litologias com o objetivo de se estabelecer a descrição petrográfica e mineralógica das mesmas, como também destacar características do material que poderiam ser importantes nos processos de alterabilidade dos mesmos. A caracterização das rochas considerou a composição mineralógica, textural, presença de descontinuidades, etc.

Todas as amostras estudadas correspondem a rochas silicáticas. As análises petrográficas foram desenvolvidas no Laboratório de Mineralogia Óptica do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, aplicando-se a norma NBR 12768/1992, como uma das etapas iniciais deste projeto.

As lâminas para desenvolvimento do estudo petrográfico foram confeccionadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco.

3.2.4. Determinação da composição química por técnicas analíticas de ICP.

As amostras das litologias estudadas tiveram sua preparação para análise realizadas pelo Laboratório da ACME (Labs Analytical Laboratories Ltda) em sua unidade no Chile e a Análise por Espectroscopia de massa realizadas em sua unidade no Canadá. A análise química das litologias determinou a composição química tanto dos elementos maiores (expressas na forma de óxidos), como os elementos menores e traços, para a detecção de elementos que mesmo em pequenas proporções podem ter influência nos processos de alteração do material pétreo estudado.

3.2.5. Determinação dos índices físicos

Os índices físicos tanto das amostras sãs como das amostras lixiviadas do Marrom Imperial, foram determinados segundo a norma brasileira NBR 12766, 1992, por meio do método das três pesagens para determinação dos índices físicos: massa específica aparente seca, massa específica aparente saturada, e porosidade aparente.

Corpos de prova tabulares com dimensões 5x5x2 cm, representativos de cada tipo de litologia estudada, foram pesados em estado seco, em seguida saturados em água, e finalmente medida a massa saturada e imersa, utilizando-se para tanto uma balança de precisão Marconi, modelo AS500C, com capacidade máxima 500g e precisão de duas casas decimais, pertencente ao Laboratório de Rochas Ornamentais, da Pós-Graduação em Engenharia Mineral da UFPE. Em cada caso, os valores finais das propriedades físicas correspondem a uma média de 3 leituras.

Os resultados foram então comparados para acompanhamento do processo de decaimento do material, após ensaio de lixivação estática. Neste sentido foram utilizados valores estabelecidos pela norma ASTM C-615, assim como aqueles propostos por Frazão & Farjallat (1995).

3.2.6. Determinação da massa dos corpos de prova

As determinações da massa dos corpos de prova, tanto antes como após os ensaios de alterabilidade acelerada por imersão em líquidos reativos, foram efetuadas em balança analítica digital Shimadzu, modelo Ay220; com capacidade máxima de 220g e precisão de 4 casas decimais, pertencente ao Laboratório de Química experimental do IFPE (Instituto Federal de Pernambuco).

3.2.7. Determinação do brilho dos corpos de prova

Após a aplicação, as rochas ornamentais utilizadas como revestimento encontram-se expostas a diversas situações agressivas, como poluição atmosférica, chuvas ácidas, produtos de limpeza, sucos ácidos, vinagre, entre outras. Estas substâncias quando em contato com as rochas podem reagir com seus minerais constituintes promovendo modificações significativas no brilho, na coloração e comprometer, desta forma, a estética do produto, devido ao seu decaimento lítico.

A determinação e monitoramento do brilho exibida pela superfície lustrada da rocha torna-se parâmetro de grande relevância, pois atua como indicativo de grau de alterabilidade sofrido pela mesma.

Neste ensaio foram determinados os brilhos dos corpos de prova antes e após os ciclos de imersão total em líquidos reativos, com a finalidade de monitorar sua perda nos fâcies estudados após estes ciclos. Para tanto foram utilizados corpos de prova de dimensões 5x5x2 cm que seriam, posteriormente, imersos nas respectivas soluções lixiviantes.

O referido ensaio baseia-se, portanto, na mensuração da perda de brilho exibida pelo material. Foram realizadas dez medições desta propriedade em cada corpo de prova, utilizando-se um aparelho medidor de brilho, modelo IG-330-Gloss Checker, Sanwa Kenma, abrangendo-se todos os corpos de prova de cada um dos fâcies “comerciais”. Em seguida, estes corpos de prova foram submetidos aos ciclos de imersão, com diferentes soluções lixiviantes, e em condições distintas de tempo de imersão, obtendo-se assim os respectivos valores médios de brilho, para comparações.

3.2.8. Ensaio de alterabilidade

Neste trabalho, foram realizados dois ensaios que representam bem os processos de alteração da rocha relacionados com as características do clima e da qualidade do ar urbano. Através dos ensaios de alterabilidade, procura-se simular

condições a que as rochas estariam expostas após suas aplicações nas edificações, notadamente ao comportamento das litologias, diante de poluentes atmosféricos (resistência à alteração por lixiviação estática) para simulação dos processos de formação de eflorescências decorrentes da ação destes poluentes, e ensaio de determinação da resistência ao envelhecimento por mudança térmica também conhecido como ensaio de susceptibilidade a oxidação por choque térmico.

3.2.8.1. Ensaio por imersão em líquidos reativos

Os ensaios de alterabilidade acelerada, expondo-se as superfícies polidas e não polidas às substâncias representativas dos agentes causadores da deterioração das rochas ornamentais, foram desenvolvidos no Laboratório de Geoquímica do LEMA (Laboratório de Estudos Metalogenéticos Aplicados) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco.

Tomou-se como base o ensaio de lixiviação estática, denominado pelo IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo) como “ensaio de alterabilidade por imersão em líquidos reativos”, conforme metodologia estabelecida neste organismo e recomendada por Frascá (2003), Becerra-Becerra e Costa (2003, 2007), e Silva (2007),

Neste trabalho, o material foi totalmente imerso em soluções reativas, com pH = 3 (mais próximo da faixa de pH das chuvas ácidas em grandes centros urbanos), por um período de 30 e 60 dias, embora Frascá (2003) tenha usado para estes ensaios uma imersão parcial de litologias em soluções reativas com pH entre 1 - 1,5 por período de 30 dias (condições mais aceleradas). Por sua vez, Becerra-Becerra e Costa (2003, 2007) e Silva (2007), fizeram imersão de litologias em soluções reativas por período de 20 dias sob pH = 3.

As litologias selecionadas foram submetidas a ensaios de alteração acelerada frente a soluções dos seguintes reagentes: ácido sulfúrico 0,0005 M, ácido nítrico 0,001 M, mistura de ácido nítrico e sulfúrico na proporção de 1:2 de concentração 0,001 M de íons H⁺, e ácido clorídrico 0,001 M, utilizando-se para cada litologia 12 corpos de prova com de 5x5x2 cm de espessura.

As soluções ácidas foram todas preparadas utilizando-se água obtida de sistema de purificação a base de osmose com eletrodeionização marca Millipore - modelo ELIX 5, pertencentes ao Laboratório de Química Experimental do IFPE (Instituto Federal de Pernambuco). O pH das soluções de lixiviação estática foi devidamente aferido e acompanhado pelo pHmetro de marca Digimed, modelo DN2.

Os corpos de prova de cada litologia estudada (dimensões de 5X5X2 cm) foram totalmente imersos individualmente em 200ml de solução de pH = 3, de cada um dos ácidos selecionados (H_2SO_4 , HNO_3 , $H_2SO_4 + HNO_3$, e HCl), por períodos de imersão de 30 e 60 dias. Tanto a face polida como as não polidas foram imersas. Após período de sete dias, a cada 7 dias foram efetuadas medidas de pH das soluções lixiviadas. A solução lixiviante em que cada corpo de prova se encontrava submerso foi trocada a cada 7 dias, para se manter a concentração destas soluções lixiviantes em pH = 3, e a solução residual armazenada em recipiente fechado.

Após os períodos de imersão, os corpos de prova foram colocados em condições ambientais por período de 30 dias. Realizou-se o monitoramento de formação de possíveis eflorescências e sub-eflorescências, as quais não foram observadas em nenhum dos períodos de imersão ou pós-imersão (30 dias, 60 dias).

3.2.8.2. Ensaio de oxidabilidade.

A oxidabilidade foi avaliada através do ensaio de determinação da resistência ao envelhecimento por mudança térmica também conhecido como ensaio de susceptibilidade a oxidação por choque térmico. Este ensaio foi realizado submetendo-se os corpos de prova a ciclos sucessivos de aquecimento a 105°C seguidos de imersão imediata em água a 20° C, de acordo com a norma EN 14066. O ensaio visa verificar o decaimento da rocha após ciclos de aquecimento e resfriamento rápido, ou seja, das variações térmicas bruscas que propiciem dilatação e contração constantes, causa de uma das principais desagregações de corpos rochosos, Becerra-Becerra (2004).

Corpos de prova de cada fácies da litologia estudada, foram devidamente pesados para determinação da média de suas respectivas massas antes do ensaio de oxidabilidade por choque térmico, e comparadas posteriormente com a média das massas, dos mesmos corpos de prova, submetidos ao ensaio de oxidabilidade, para monitoramento do processo de decaimento apresentado pelos distintos fácies estudados, do Sienito Marrom Imperial, após os 25 ciclos de ataque.

CAPÍTULO IV

4. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Composição mineralógica e química dos litotipos estudados

4.1.1. Mineralogia do Marrom Imperial

4.1.1.1. Marrom Imperial fácies 1 (auréola rosa clara a branca)

Ao exame microscópico exhibe textura porfirítica, com grandes fenocristais de feldspatos alcalinos tendo a microclina como principal constituinte, juntamente com máficos, quartzo e acessórios.

O feldspato (64%) alcalino ocorre como fenocristais e está representado pelo ortoclásio e microclínio perítico, subédrico de hábito tabular, exibindo geminações, respectivamente carlsbad e xadrez (combinada albita+periclina). Possuem dimensões médias de 1 cm, chegando até a 3 cm, circundado por aglomerado de cristais menores de K-F associado ao plagioclásio, o que lembra textura rapakivi. É, comumente, perítico onde a fase sódica dispõe-se principalmente em flames. Apresenta-se bem preservado e possui inclusões de biotita, apatita, e hornblenda.

O plagioclásio (9%) ocorre geralmente intercrescido com o feldspato potássico formando as pertitas, dispondo-se em *flames*, ou compondo agregado de minerais (Pl, K-F e Qz), com geminações polissintéticas do tipo albita e periclina e dimensões inferior a 0,2mm, que circundam o K-F.

O quartzo ($\pm 2\%$) ocorre como material anédrico recristalizado variando de 0,08 a 0,2mm, com extinção ondulante, associado ao plagioclásio e K-F. Podendo resultar do excesso de sílica da substituição piroxênio/anfibólio

Os máficos constituem aproximadamente 25 % da rocha e estão representados, essencialmente, por biotita, anfibólio, tendo, titanita, apatita e opacos como acessórios (4%) e sericita, argilo-minerais, epidoto, como minerais de alteração.

O anfibólio perfaz aproximadamente 12% da rocha e apresenta-se anédrico a subédrico, de pleocroísmo variando de verde-escuro até castanho. Altera-se para biotita e exibindo inclusões de quartzo/feldspato, apatita e opacos.

A biotita (9%) apresenta-se em lamelas isoladas ou associadas à alteração do anfibólio, com dimensões variando entre 0,3 e 0,5 mm

A apatita (0,2mm) é um dos acessórios mais comuns ocorrendo inclusa nos feldspatos e máficos; enquanto a titanita (0,3mm) encontra-se subédrica em menor proporção associado anfibólio e opacos.(Figura 4.1).

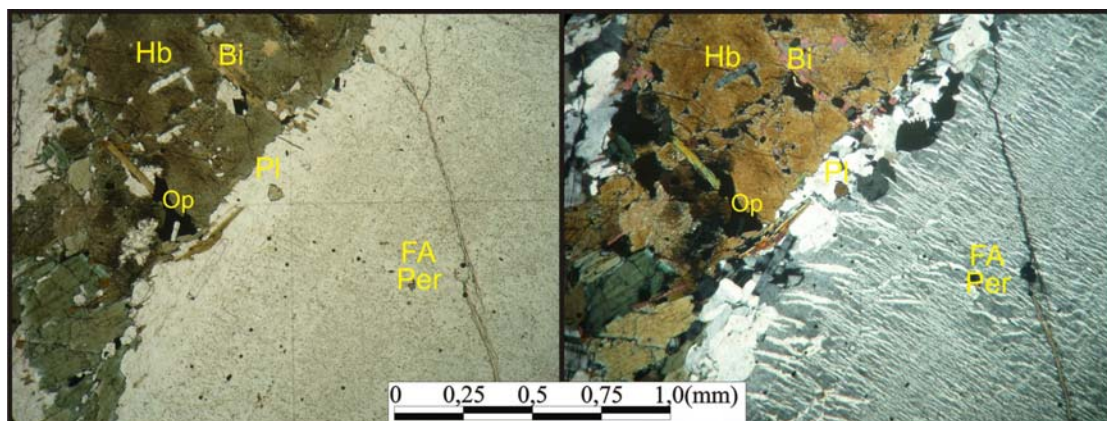


Figura 4.1: Fotomicrografia do Marrom Imperial fácies 1 (auréola rosa clara a branca) – Contato entre fenocristal feldspatos potássicos peritíticos contornado por auréola, e matriz (NX)..

4.1.1.2. Marrom Imperial Fácies 2 (sem auréola)

Ao microscópio as rochas desta fácies apresentam textura porfiritica inequigranular, constituído essencialmente por pórfiros de feldspato alcalino,

plagioclásio, anfibólio, biotita, piroxênio, tendo como acessórios titanita, apatita e opacos, e como minerais de alteração, sericita, opacos e argilo-minerais.

Os feldspatos alcalinos (60%) apresentam-se como fenocristais zonados (1,5 a 2,0cm) pertícticos, dos tipos *stringer* e *drops*, e correspondem ao microclínio e ortoclásio reconhecidos, respectivamente, pela macla em grade e Carlsbad. Mostra-se alterado resultando em sericita.

Plagioclásio (11%) apresenta-se em pequenos cristais recristalizados bordejando o feldspato alcalino, comumente com geminação periclina e fase hóspede das pertitas.

Os minerais máficos (29%) são representados por anfibólio, piroxênio, biotita, titanita.

O anfibólio constitui aproximadamente 14% da rocha e corresponde à hornblenda, com pleocroísmo verde-oliva a verde-claro, dimensão média de 0,7 mm, apresentando-se em agregados anédricos de sub-grãos ou em prismas anédricos.

Piroxênio apresenta dimensão média de 1,5mm (6%), tons de verde a castanho, intensa alteração e coroa de reação, o que denota o processo de uralitização, apresentando inclusões de minerais félsicos e opacos,

A biotita de tamanho médio 0,1mm (5%) de cor castanha com tonalidade avermelhada que corresponde a produto de alteração do anfibólio bem como de desopacitização.

Os opacos, 0,07mm (3%) podem ser primários ou de alteração e ocorrem dispersos em grãos anédricos ou com hábito cúbico. Outros acessórios tem-se titanita que se encontra passando por processo de alteração, apatita (1%) dispersa por toda a rocha.(Figura 4. 2)

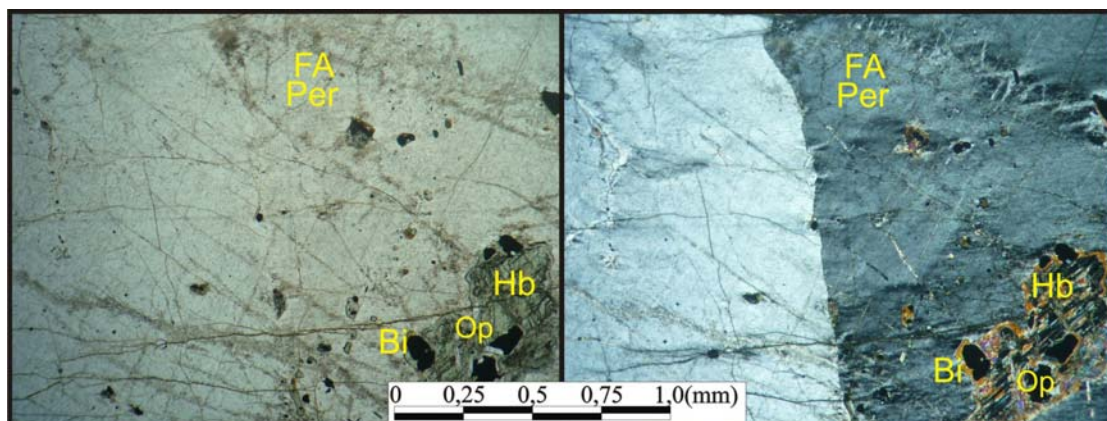


Figura 4.2 – Fotomicrografia de Marrom Imperial fácies 2 (sem auréola) – nicóis paralelos e nicóis cruzados (NX). Contato entre os fenocristais de feldspatos potássicos.

4.1.1.3 Marrom Imperial fácies 3 (auréola rosa)

Exibe textura predominante porfirítica e mais raramente intergranular de fina a média, constituída essencialmente, por feldspato alcalino de hábito tabular, de dimensões variando entre submilimétricas até 2,5cm, circundado por aglomerado de cristais menores de microclina associados ao plagioclásio, a máficos e poucos cristais de plagioclásio e quartzo intergrão.

Os feldspatos alcalinos (70%) são o principal constituinte desta rocha e estão representados por cristais de ortoclásio (predominante) e microclínio, de hábito predominantemente tabular, mais raramente anédrico. Exibem, geralmente, geminação Carlsbad e às vezes mostram uma geminação em grade superimposta, sugerindo microclinização do ortoclásio. Comumente apresentam-se com intercrescimento pertítico, do tipo *stringer*. Podem mostrar aspecto turvo causado por argilização e sericitização.

O plagioclásio (5%) é visto apenas como fase ex-solvida, intercrescida com o feldspato potássico formando as pertitas, dispondo-se em *stringer* ou intersticiais preenchendo fraturas no feldspato alcalino.

O quartzo (2%) mostra-se anédrico com extinção ondulante, disposto ao redor dos pórfiros, com diâmetro inferior a 0,2mm.

Os máficos correspondem a 23% e estão representados por anfibólio, biotita, titanita, raro piroxênio preservado e fases de alteração, sericita, argilo-minerais e opacos. Como acessórios encontram-se em grande quantidade apatita.

O anfibólio (10%), identificado como hornblenda, ocorre anédrico a prismático com dimensões de até 2mm, associados à biotita, com pleocroísmo variando em tons de verde a castanho.

O piroxênio (5%) é subédrico com dimensões média de 0,2mm, cor castanha esverdeada, com corona de uralitização resultando e anfibólio, de extinção oblíqua e sinal óptico negativo identificando-o como da série aegirina-augita.

A biotita (5%) ocorre em palhetas variando de submilimétrica a 0,2mm de pleocroísmo marrom-escuro a castanho, pode ser primária como também de alteração do anfibólio.

Minerais acessórios tem-se predominantemente apatita (1%) que encontra-se inclusa no feldspato alcalino, opacos (2%) estes podem atingir 0,3mm associado a biotita e localmente nota-se cristal de epidoto provavelmente de alteração.(Figura 4.3)

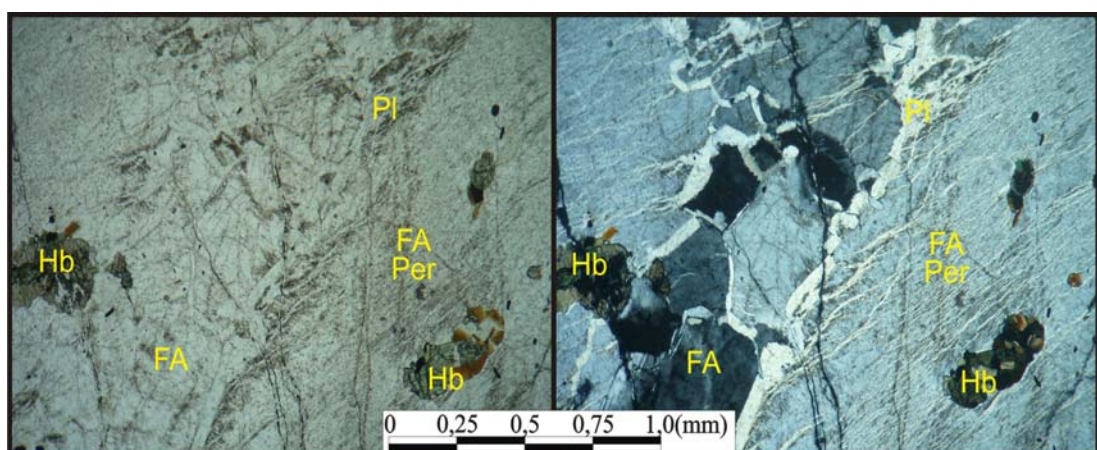


Figura 4.3: Fotomicrografia de Marrom Imperial, fácies 3. Nicóis paralelos e nicóis cruzados. Observa-se contato entre os fenocristais de feldspatos potássicos pertíticos contornados por auréola.

A tabela abaixo corresponde a composição mineralógica de cada um dos fácies comerciais estudados.

Tabela 4.1- Composição Mineralógica das fácies do Sienito Marrom imperial.

Síntese dos parâmetros petrográficos observados (%)	Fácies 1	Fácies 2	Fácies 3
Quartzo	2%	-	2%
Plagioclásio	9%	10%	5%
Feldspatos Alcalinos K-F	64%	60%	70%
Biotita	9%	6%	5%
Anfibólios	13%	14%-- horn	10%- horn
Granada	--	--	-
Zircão	--	--	--
Apatita	1%	1%	1%
Opacos	2%	3%	2%
piroxenios	--	6%	5%-
Titanita/ Epidoto	Tr	Tr	Tr
Sericita/clorita/carbonato	Tr/--/--	Tr/Tr/--	Tr/--/--
Granulação	Média a fina	Média a fina	Média a Fina
Estrutura	Maciça	maciça	maciça
Textura	Porfírica / inequigranular	Porfírica/ inequigranular	Porfírica/ inequigranular
Microfissuramento	Observado	Observado	Observado

4.2. Composição Química das Litologias

Os resultados da análise química dos três Fácies, realizadas pelo Laboratório da ACME (Labs Analytical Laboratories Ltda) em sua unidade no Chile e Analisadas por Espectroscopia de massa determinou a composição química tanto dos elementos maiores (expressas na forma de óxidos), como os elementos menores e traços, presentes em cada um dos fácies. A tabela 4.2 abaixo, exhibe valores para os elementos maiores, que se encontram em % , para cada um dos fácies analisados.

Tabela 4.2 – Composição Química dos fácies. Elementos maiores

	Composição Química		
	Fácies 1	Fácies 2	Fácies 3
SiO ₂	60,18	61,07	60,93
Al ₂ O ₃	15,29	15,33	15,44
Fe ₂ O ₃	5,09	4,53	4,69
MgO	2,50	2,43	2,18
CaO	2,58	2,45	2,28
K ₂ O	7,59	7,74	7,78
Na ₂ O	4,13	3,88	4,20
TiO ₂	0,98	0,94	1,04
P ₂ O ₅	0,49	0,45	0,43
MnO	0,07	0,06	0,06
Loi	0,50	0,50	0,40
Cr ₂ O ₃	0,0012	0,0013	0,009

A tabela 4.2 acima informa os teores encontrados para os óxidos dos diferentes elementos químicos, presentes em cada um dos fácies. Neste observa-se que os teores encontrados, para estes óxidos, quando comparados entre si, apresentam-se próximos.

Abaixo, à figura 4.4 correspondem respectivamente a matriz de correlação dos fácies comerciais incluindo-se os fácies SEG de Guimarães & Silva F° (1992).

Os resultados obtidos confirmam fortes relações entre SiO₂ – Al₂O₃ – K₂O (todas com coeficiente de correlação $r > 0,70$) que refletem a presença de feldspatos potássicos (K-F), como principal mineral silicático destes fácies “comerciais”. Por sua vez a fração feldspatos K-F apresenta forte oposição à fase metálica da rocha. (SiO₂ – Fe₂O₃, SiO₂- TiO₂, SiO₂-MnO, todos apresentando coeficiente de correlação $r < -0,70$), além da oposição ao conjunto SiO₂ – P₂O₅, $r = -0,98$ e SiO₂ – CaO, $r = -0,98$, sendo pela presença acessória de apatita. Este conjunto de observações resulta que os fácies “comerciais” correspondem a uma lenta cristalização de um magma intrusivo, onde o predomínio de Si-Al-K gerou acentuada predominância de fenocristais de feldspatos do tipo K-F, com participação mais subordinada de feldspatos sódicos (SiO₂ – Na₂O, $r = 0,44$). Neste sentido, os fácies “comerciais” são

aspectos particularizados do Fácies SEG, definidos por Guimarães & Silva F° (1992).

Figura 4.4 - Matriz de correlação fácies comerciais incluindo-se os fácies SEG de Guimarães & Silva F° (1992)

	SiO ₂						MC	definit				
SiO ₂	1,00	Al ₂ O ₃										
Al ₂ O ₃	0,85	1,00	Fe ₂ O ₃					n = 6				
Fe ₂ O ₃	-0,94	-0,92	1,00	MgO								
MgO	-0,97	-0,85	0,91	1,00	CaO							
CaO	-0,98	-0,89	0,94	1,00	1,00	K ₂ O						
K ₂ O	0,71	0,69	-0,86	-0,74	-0,76	1,00	Na ₂ O					
Na ₂ O	0,44	0,37	-0,18	-0,50	-0,46	-0,17	1,00	TiO ₂				
TiO ₂	-0,72	-0,79	0,88	0,69	0,73	-0,85	0,16	1,00	P ₂ O ₅			
P ₂ O ₅	-0,98	-0,92	0,93	0,97	0,99	-0,68	-0,52	0,70	1,00	MnO		
MnO	-0,93	-0,92	1,00	0,91	0,94	-0,88	-0,18	0,86	0,93	1,00	Loi	
Loi	0,22	-0,25	0,01	-0,22	-0,17	-0,01	0,18	0,01	-0,09	0,06	1,00	Ba
Ba	-0,10	0,21	-0,25	0,12	0,06	0,51	-0,78	-0,54	0,09	-0,27	-0,56	1,00

4.3. Ensaios de Caracterização Tecnológica

4.3.1. Índices Físicos

4.3.1.1. Índices Físicos – Granito Marrom Imperial (Rocha Sã)

Os resultados obtidos para o “Marrom Imperial” apresentaram os seguintes valores de massa específica aparente seca: 2.705 Kg/m³, 2.705 Kg/m³ e 2.698 Kg/m³, para os fácies “comerciais” 1, 2 e 3, respectivamente. Estes resultados são superiores a 2.560 Kg/m³, atendendo portanto às exigências da norma ASTM C-615, referente a rochas silicáticas.

Em relação à porosidade, observa-se que esta norma ASTM C-615 não estabelece limites, porém Frazão & Farjallat sugerem o valor máximo de 1% para esta propriedade. Observou-se, no entanto, que os fácies estudados apresentaram significativas variações nos valores de porosidade (Figura 4.5).

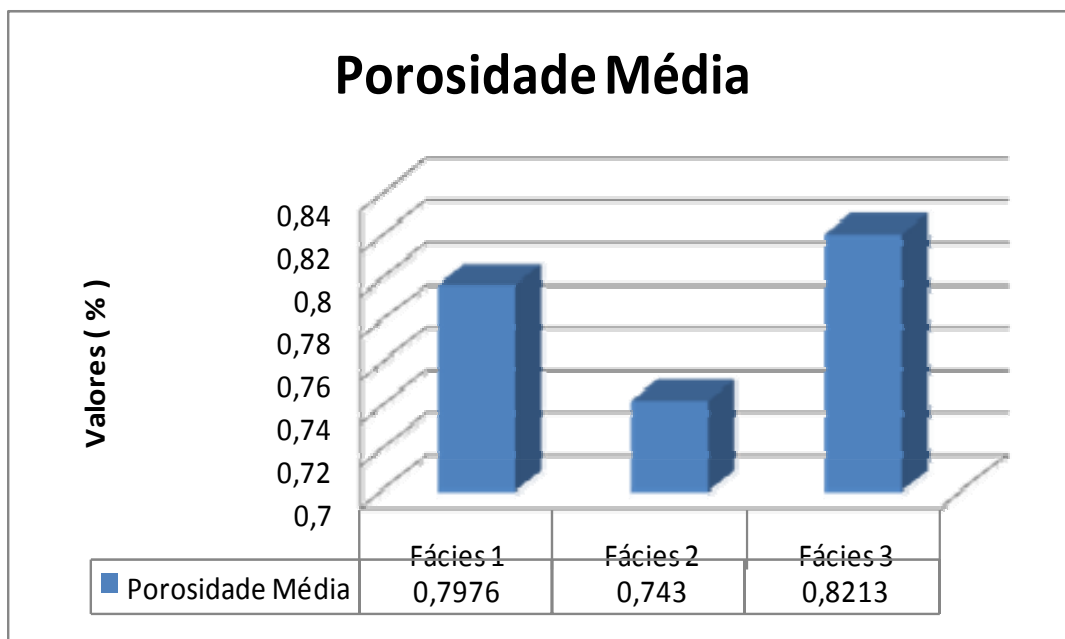


Figura 4.5: Porosidade média dos 3 fácies comerciais do Marrom Imperial são (n = 36).

Analisando-se os dados, observa-se que o fácies 2 apresenta o menor valor de porosidade, sugerindo um menor interconexão entre os poros. Em contraposição, o fácies 3 exibe um maior valor na porosidade, indicando haver maior comunicação entre os poros.

Quanto à absorção aparente constata-se que esta propriedade também exibe uma variação significativa (Figura 4.6).

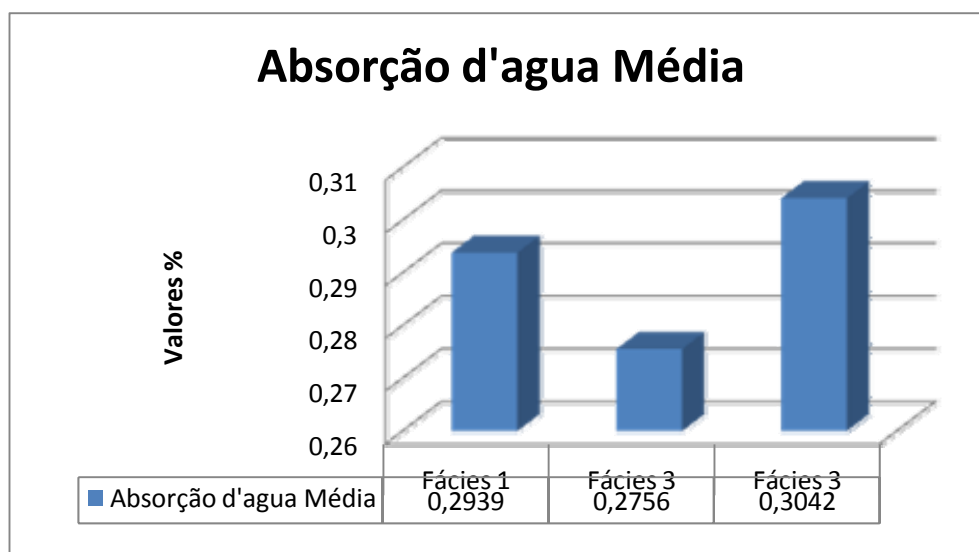


Figura 4.6: Absorção média de água dos fácies comerciais do Marrom Imperial são.

O fácies 2 absorveu a menor quantidade d'água, sugerindo haver contato mais efetivo entre os grãos minerais, conseqüentemente menos vazios. Por sua vez, o fácies 3 absorveu a maior quantidade d'água, indicando uma maior presença de vazios e de microfissuras.

Ao correlacionar essas duas propriedades, infere-se que a variação da composição mineralógica de cada fácies influencia diretamente nestas propriedades (Figura 4.3), de modo que os fácies apresentam um maior grau de dispersão dos valores dos índices de porosidade e absorção d'água devido uma maior variedade dos constituintes mineralógicos, existência ou não de microfissuras, relação de contato entre os minerais, granulação, aspectos estruturais, alterações minerais, entre outras. (Figura 4.7).

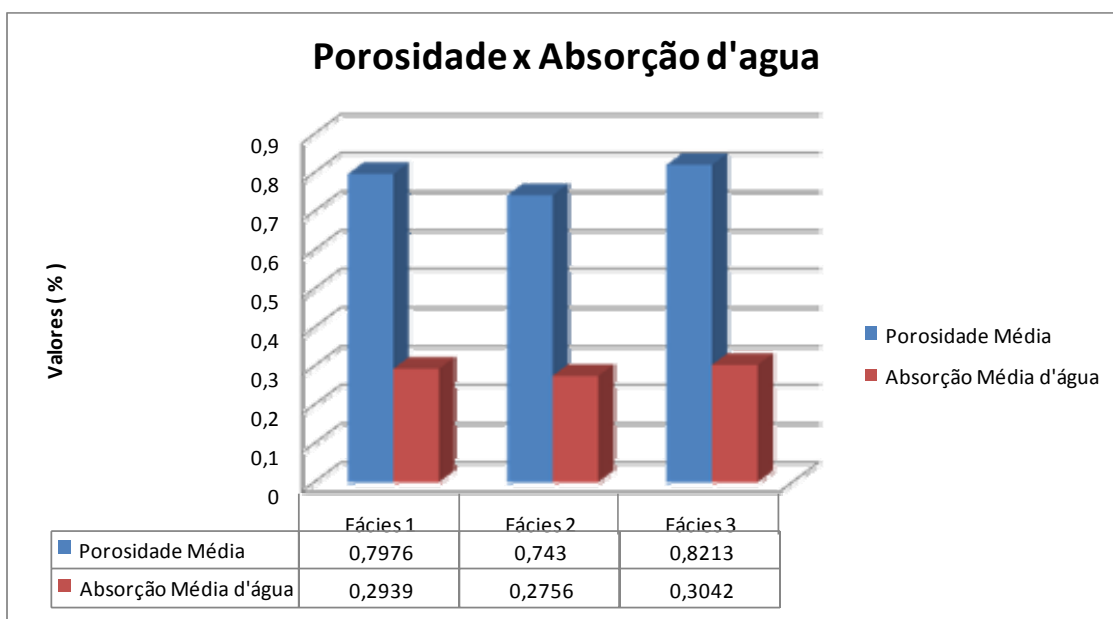


Figura 4.7: Porosidade e absorção de água dos fácies do Marrom Imperial são.

As figuras 4.8 e 4.9, abaixo, relacionam a porosidade média e absorção média d'água de todos os corpos de prova dos três fácies estudados.

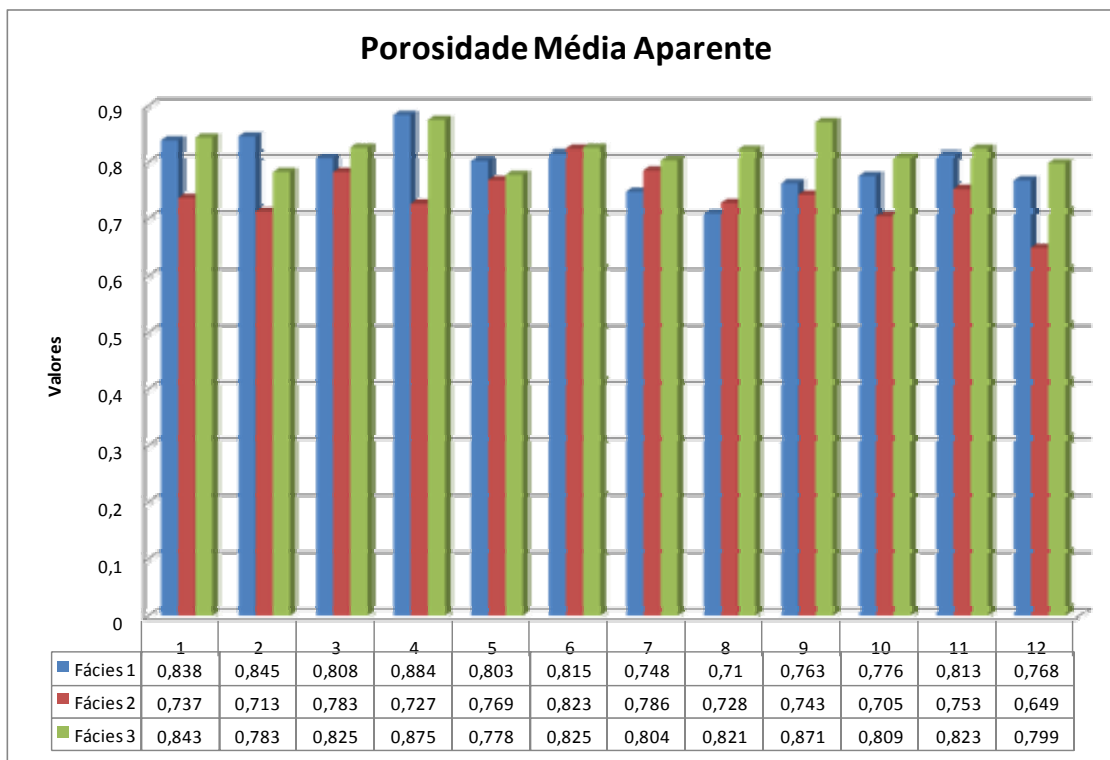


Figura 4.8: Porosidade média aparente dos fácies comerciais do Marrom Imperial são

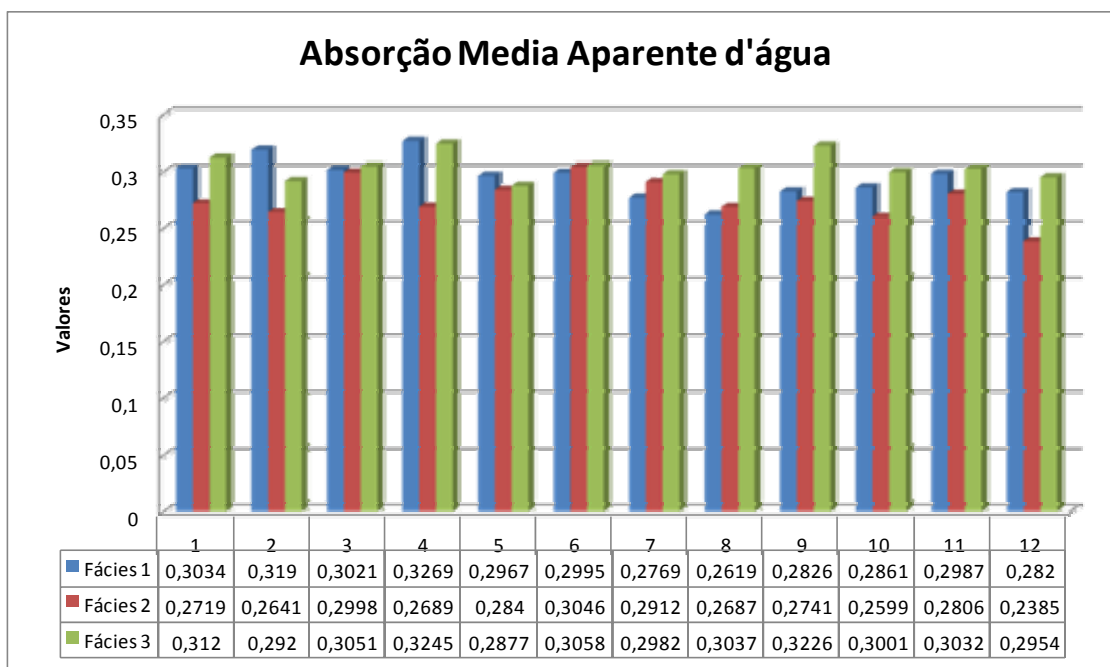


Figura 4.9: Absorção média aparente de água nos fácies comerciais do Marrom Imperial são

Os resultados demonstram que todos os fácies estudados apresentaram porosidade menor que 1% e índices de absorção d'água menores que 0,4%, conforme padrões recomendados por Frazão & Farjallat (1995). Estes resultados permitem recomendar todos os fácies do produto Marrom Imperial para aplicações em diversos ambientes como revestimentos internos ou externos.

4.3.1.2. Índices físicos – após 30 dias de imersão

A análise do comportamento das soluções lixiviantes sobre os diferentes fácies do sienito Marrom Imperial envolve algumas considerações importantes, tanto acerca da mineralogia dos fácies, porosidade, como do teor de máficos presente nos mesmos. Mas também envolve os mecanismos de perda de massa a que o corpo está submetido quando imerso, a natureza e características das soluções lixiviantes e dos prováveis mecanismos de ação que cada ácido pode apresentar. Além disto, devem ser consideradas as solubilidades dos produtos formados, pois estes aspectos em conjunto são os responsáveis por fornecer uma melhor possibilidade de compreensão acerca dos resultados obtidos após ensaios de lixiviação estática.

No tocante à provável perda de massa desencadeada, a partir do ensaio de lixiviação estática por imersão em líquidos reativos, existem dois processos que podem desencadeá-los. O primeiro seria pela dissolução de minerais constituintes do fácies, em decorrência da atuação da solução lixivante; o segundo seria pelo processo de desagregação de fragmentos do corpo de prova provocados também pela ação da solução sobre os minerais mais susceptíveis a decaimentos e que, por sua vez, provoca o enfraquecimento da rocha, com consequente perda de partes desta. Ambos os mecanismos atuam sobre a porosidade fazendo com que esta varie. Porém, o local, as dimensões do grão, e o tipo de mineral que constitui o grão desagregado, são aspectos importantes e atuam de forma diferenciada sobre a porosidade, pois variações de massa na superfície do fácies, provocadas pela desagregação de grãos de minerais mais susceptíveis à ação da solução lixivante, podem apresentar menor significância no aumento da porosidade que os processos desencadeados pela dissolução destes minerais no interior do corpo de prova.

Outro fator importante acerca da ação destas soluções lixiviantes sobre os corpos de prova trata da solubilidade dos produtos formados durante o processo de ataque. Como o ensaio se deu por imersão total, este favoreceria a disseminação dos produtos de alterabilidade formados no seio do solvente, promovendo assim a perda de produtos da reação para o meio, com conseqüente aumento de porosidade no fâcies.

A solução contendo mistura de ácidos mostra-se efetivamente mais agressiva e desagregadora que aquelas onde o processo de agressão do ácido se deu por dissolução, fato que se pode constatar ao se analisar a variação de massa sofrida pelos fâcies, quando submetidos a esta condição.

Nas soluções submetidas ao ataque por ácido nítrico é necessário observar que todos os produtos formados são muito mais solúveis que os produtos na forma de sulfato, fato que pode ter influenciado na menor ação do ácido sulfúrico sobre os fâcies, quando comparados aos ataques com outros ácidos como o nítrico e o clorídrico, que apresentam maior solubilidade com seus produtos resultantes. A possibilidade de alguns ácidos, notadamente no caso de mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$ assim como o ácido nítrico isoladamente, de atuarem como agentes oxidantes, mesmo em soluções diluídas, aumenta a possibilidade de maior reatividade.

A combinação destes ácidos pode, provavelmente, promover a potencialização da ação reativa desta mistura que, por sua vez, favoreceria os processos de lixiviação. Estes aspectos tornam-se relevantes, uma vez que fornecem subsídios para as prováveis hipóteses e compreensão dos dados obtidos experimentalmente.

As figuras 4.10 e 4.11 apresentam a determinação dos índices físicos pós ataque com diferentes reagentes, por imersão de 30 dias. Nestes resultados, constata-se comportamento diferenciado dos índices físicos exibidos por um mesmo fâcies, frente a diferentes reagentes, o que indica um maior aumento de porosidade, em cada caso, dependendo do reagente empregado.

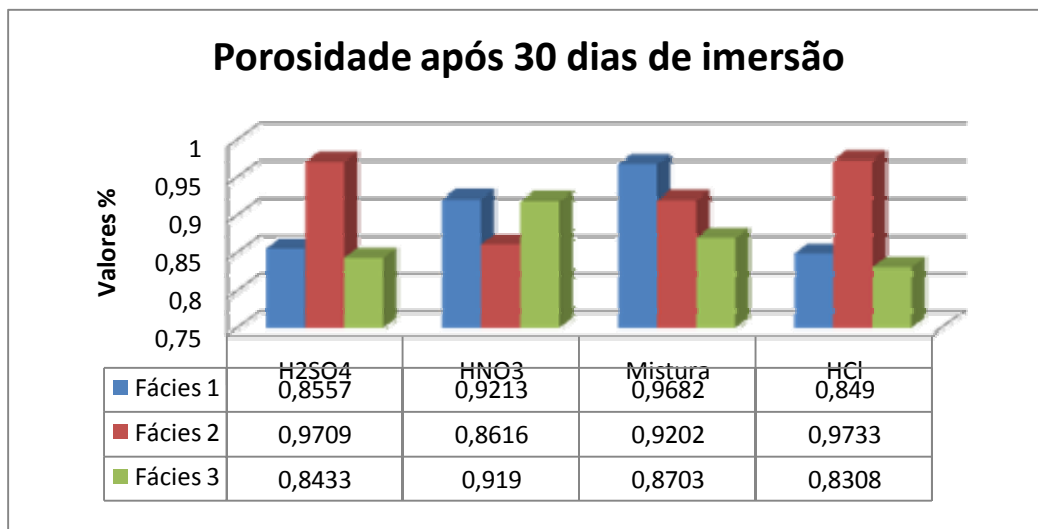


Figura 4.10: Porosidade dos fácies conforme reagente lixiviante empregado, após imersão de 30 dias

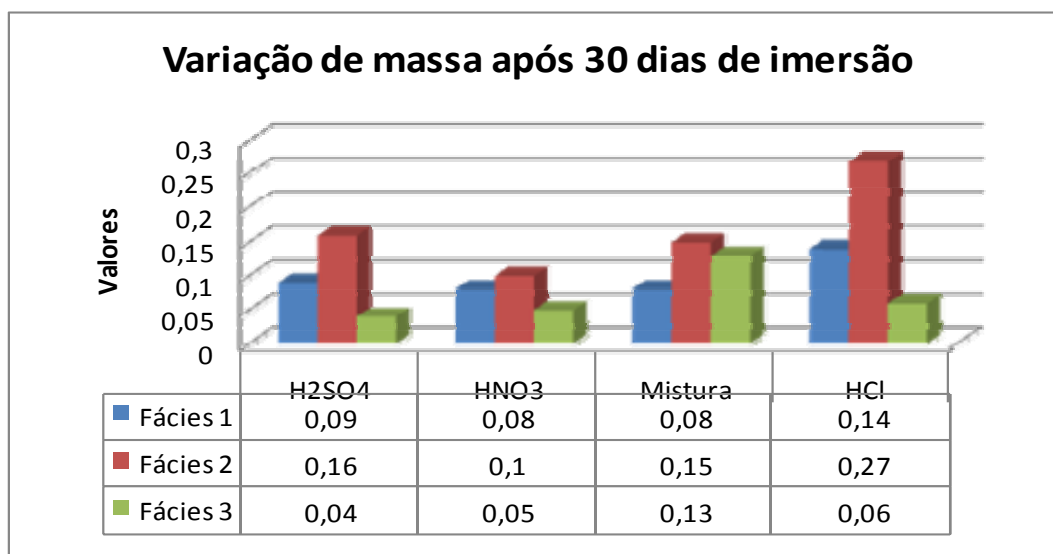


Figura 4.11: Variações de massa exibidas pelos fácies nas solução lixiviante empregada período de 30 dias de imersão.

4.3.1.2.1. Solução lixiviante de H₂SO₄

Analisando-se o comportamento dos diferentes fácies do Marrom Imperial, em relação ao ataque com ácido sulfúrico, observa-se que o fácies 2 apresentou uma maior variação em sua porosidade, o que sugere sua maior susceptibilidade em relação a este tipo de solução lixiviante.

Macroscopicamente, observam-se diferenças entre os fácies estudados. O fácies 1 apresenta fenocristais de feldspatos potássicos envolvidos por uma auréola de cor rosa clara a branca, o que lhe confere uma tonalidade mais clara. O fácies 2 não apresenta auréolas envolvendo os fenocristais feldspáticos, o que lhe confere uma tonalidade mais escura. O fácies 3 apresenta os fenocristais de feldspato alcalino envolvidos por auréola de tonalidade rosa possuindo, também uma coloração clara.

Na análise petrográfica, o fácies 2 revelou, em sua matriz, um maior percentual de minerais máficos, e opacos, os quais são mais vulneráveis à alteração, indicando assim sua maior fragilidade em relação aos processos intempéricos e, portanto, menor resistência química em relação ao ataque por soluções lixiviantes.

Os fácies 1 e 3, nos quais ocorrem auréolas envolvendo os fenocristais de feldspato, mostraram menor participação de minerais máficos nas suas composições rocha-total, resultando em menor susceptibilidade à ação das soluções lixiviantes.

A análise comparada entre a porosidade e a perda de massa em um mesmo fácies, revelou que estas características nem sempre ocorrem concomitantemente. Torna-se necessário levar também em conta outros fatores importantes que podem influenciar de forma mais efetiva o aumento da porosidade do que o próprio processo de perda de massa. Os processos de desagregação de fragmentos do corpo de prova, provocados pela ação da solução lixivante, assim como o tamanho do grão e a localização onde este processo se desenvolveu (se sobre a superfície ou se mais internamente no corpo), a presença ou não de pertitas, a distribuição, tamanho e contato dos poros, podem exercer significativas influências sobre a porosidade da amostra. Além disto, deve-se considerar que estes poros não se apresentam distribuídos homogeneamente ao longo dos corpos de prova, além da possibilidade de estarem preenchidos por minerais com maior ou menor facilidade de alteração. Cabe ainda ressaltar a possibilidade de existência de minerais secundários com relativa solubilidade preenchendo fissuras, assim como a solubilidade dos produtos formados pelas reações de dissolução, condições estas que podem também interferir na porosidade final.

Outros fatores que devem ser levados em conta são o teor de opacos, minerais que apresentam maior susceptibilidade sob ataque de soluções lixiviantes, e o de quartzo, mineral este bastante resistente aos ataques ácidos. Isto provavelmente explica uma maior reatividade do fácies 2, que apresenta maior teor em opacos e ausência de quartzo, em relação ao observado nos outros fácies estudados. Assim, estas observações e o fato que no fácies 2 os feldspatos não mostram auréolas, estão na origem da sua maior susceptibilidade reativa em relação à solução lixivante de H_2SO_4 , resultando em maior perda de massa e aumento de porosidade.

Em relação aos fácies 1 e 3, observa-se que este último apresenta uma maior resistência química (rever figuras 4.10 e 4.11). Apesar destes fácies apresentarem composição mineralógica mais próximas entre si, o fácies 3 apresenta um maior teor de feldspatos alcalinos potássicos, e menor teor de minerais máficos o que explica sua maior resistência ao ataque lixivante.

Outro fator de relevância nesta análise corresponde ao papel da solução lixivante, uma vez que o ácido sulfúrico só se apresenta como oxidante em soluções concentradas, perdendo esta característica à medida que estas se tornam diluídas, como nos experimentos deste estudo.

4.3.1.2.2. Solução lixivante de HNO_3

Submetidos ao ataque da solução lixivante de HNO_3 os fácies 1 e 3 apresentaram maiores aumentos de porosidade (Figura 4.10), muito embora tenham apresentado as menores variações de massa (Figura 4.11). Estes resultados configuram um caso onde a variação de massa sofrida por determinados fácies podem não apresentar concordância com relação a um possível aumento de porosidade, ou seja, nos casos investigados, os fácies que apresentam menor remoção de massa (fácies 1 e 3) corresponderam àqueles que exibiram os maiores aumentos em porosidade. No entanto, é necessário se observar que estes fácies 1 e 3 exibem os maiores valores de porosidade inicial (rocha sã), e portanto este comportamento ocorreria provavelmente, devido a ação da solução lixivante sobre a

porosidade inicial dos fácies promovendo assim o aumento destes poros, sem remoção significativa de massa.

O fato de que os fácies 1 e 3 possuem menores proporções de minerais máficos deveria conferir aos mesmos uma maior resistência ao ataque químico, o que levaria, portanto, a uma menor porosidade final. Entretanto, é importante assinalar a existência de outros fatores que atuam sobre a porosidade (distribuição, tamanho e contato destes poros, dentre outros anteriormente mencionados – item 4.1.2.4). Além disto, deve-se levar em conta neste caso a grande solubilidade em meio aquoso exibido pelos produtos resultantes da reação com este tipo de ácido, ou seja, produtos na forma de nitratos, incluindo-se ainda a capacidade óxido-redutora deste ácido mesmo em soluções diluídas.

O fácies 2 mostrou-se mais resistente ao aumento de porosidade, muito embora tenha apresentado a maior perda de massa que os outros fácies. Esta maior perda de massa estaria associada ao seu maior teor de máficos e opacos, presentes em sua matriz, e ao menor teor de feldspatos alcalinos potássicos e a ausência de aureolas envolvendo os fenocristais de feldspatos alcalinos. Quanto a variação de massa, o fácies 3 apresentou a menor variação de massa em relação aos demais, o que estaria em concordância com seu menor teor de máficos, maior teor de feldspatos alcalinos potássicos e a existência de auréola envolvendo seus fenocristais.

Quanto ao maior aumento de porosidade exibido pelos fácies 1 e 3, estes provavelmente estariam ligados ao fato que estes fácies 1 e 3 exibem os maiores valores de porosidade inicial (rocha sã), e portanto este comportamento ocorreria devido a ação da solução lixiviante sobre a porosidade inicial dos fácies promovendo assim o aumento destes poros, sem remoção significativa de massa. Outro fator importante trata-se da maior solubilidade dos produtos de reação dos minerais com o ácido nítrico, o que promoveria sua dissolução pelo solvente água e, deste modo, provavelmente elevaria a porosidade devido à remoção do produto formado, o qual estaria disseminado no solvente.

Outro provável mecanismo responsável pela elevação da porosidade destes fácies 1 e 3, nesta solução lixiviante, ocorreria a partir de um processo natural e espontâneo de dissolução, que se daria por oxido-redução, configurando-se na

formação de uma pilha eletrolítica, onde a solução funcionaria como ponte salina e as associações de minerais de composições químicas diferentes (por exemplo, as pertitas), funcionariam como eletrodos desta pilha.

O maior teor de máficos presentes no fácies 2, notadamente opacos, provavelmente estabeleceram mecanismos de dissolução por óxido-redução com a solução lixiviante de ácido nítrico. Nestes mecanismos, alguns produtos formados apresentam menor mobilidade como no caso do íon metálico ferro, que apresenta maior solubilidade na forma de Fe^{2+} , mas que se torna insolúvel na forma de Fe^{3+} com a obtenção de produtos menos solúveis. Este fato pode ter contribuído para o menor aumento da porosidade exibida por este fácies, frente a este reagente. Porém, torna-se necessário uma investigação mais detalhada acerca dos mecanismos de dissolução, para que se possa melhor compreender esta variação de porosidade apresentada neste fácies.

4.3.1.2.3. Solução lixiviante mistura de ácido sulfúrico e nítrico 2:1

Submetidos ao ataque desta solução lixiviante os fácies 1 e 2 apresentaram, após um período de imersão de 30 dias, os maiores aumentos de porosidade em relação ao fácies 3 (Figura 4.10). Por outro lado, no mesmo intervalo de tempo, os fácies 2 e 3 foram os que exibiram maior perda de massa (Figura 4.11). Apesar do fácies 1 ter exibido a menor perda de massa, esta se deu de forma a provocar neste fácies uma maior variação de porosidade. De fato, a perda de massa atua sobre a porosidade, porém torna-se necessário observar outros fatores, já descritos, que atuam sobre a porosidade final (item 4.1.2.4). É provável que o processo de perda de massa do fácies 1 tenha se desenvolvido mais internamente nos seus corpos de prova, através de fissuras e planos de clivagem dos minerais, assim como nos interstícios entre os grãos minerais, domínios estes mais sensíveis ao ataque químico desta mistura ácida.

Não se pode deixar de perceber que a presença das pertitas nestes fácies possa ter favorecido a ação das soluções ácidas sobre estes minerais, através de um processo natural de formação de pilhas eletrolíticas de concentração, onde a solução funcionaria como ponte salina e os minerais constituintes das pertitas

(K-feldspato e plagioclásio- albíta), funcionariam como eletrodo da pilha, que seriam consumidos ao longo do processo de funcionamento desta. A ação da solução ácida seria mais efetiva sobre os vênulos de plagioclásio, favorecendo assim a elevação da porosidade no fácies, porém sem uma elevação considerável de perda de massa, já que os feldspatos potássicos mais resistentes que os calcossódicos à deterioração continuariam presentes. Assim é provável que o aumento da porosidade neste fácies 1 se deva não só ao caráter mais agressivo apresentado pela mistura ácida, mas também ao local e forma como este processo de dissolução ocorreu. É relevante ainda considerar a significativa solubilidade exibida pelos produtos formados pela ação desta solução lixiviante sobre os minerais, que seriam removidos do front reativo, sendo disseminados no seio do solvente (a própria solução ácida) possibilitando assim, por sua solubilização, o aumento da porosidade neste fácies.

O fácies 2, exibe a maior variação de massa o que provavelmente estaria relacionado ao maior teor de minerais máficos e opacos presentes em sua matriz, e a ausência de auréolas envolvendo fenocristais de feldspatos alcalinos. No entanto, este fácies exibe a segunda maior variação de porosidade, quando comparada aos demais fácies. Esta estaria ligada não só a perda de massa, mas também a outros fatores que conjuntamente definiriam sua porosidade final. Novamente se constatou que o aumento de porosidade não se apresenta associado apenas ao aumento de perda de massa. É provável que esta variação de massa exibida por este fácies esteja relacionada ao maior teor de máficos e opacos presentes neste, e, que foram lixiviados. Assim, a perda de massa pode ter contribuído para a elevação da porosidade, não sendo este, no entanto, o único fator determinante da porosidade final.

O fácies 3 exibe a segunda maior perda de massa, porém apresenta a menor porosidade., fato que mais uma vez demonstra que a porosidade final depende não só da perda de massa mas também de outros fatores já anteriormente mencionados.

4.3.1.2.4. Solução lixiviante de HCl

O comportamento reativo da amostragem de Marrom Imperial é similar nos casos de ataque com solução lixiviante de HCl ou com H_2SO_4 . Em ambos os casos,

o fácies 2 apresenta-se como mais susceptível a uma maior variação em sua porosidade que os fácies 1 e 3.

Comparando-se os valores de perda de massa dos fácies frente a estas duas soluções lixiviantes, constatamos que a variação de massa imposta pela ação do HCl é superior àquela imposta pelo ácido sulfúrico (Figura 4.11), confirmando uma maior susceptibilidade dos feldspatos ao ataque daquele primeiro ácido.

A elevada solubilidade, em água, dos produtos de reação do HCl, e a facilidade deste em dissolver metálicos, notadamente contendo Fe^{2+} (principal constituinte dos opacos e das biotitas, presentes no Marrom Imperial), foram, provavelmente os responsáveis pelas maiores variações de massa e de porosidade constatadas nos ensaios.

Os fácies 1 e 3 apresentam um menor teor de máficos e auréolas envolvendo os fenocristais de feldspatos potássicos, portanto, mostraram-se quimicamente mais resistentes ao ataque com HCl, quando comparados entre si. Desta forma, esta circunstância aponta para uma maior resistência química dos fácies 1 e 3, frente a algumas soluções lixiviantes, notadamente aquelas cujos processos de dissolução não se desenvolvem por mecanismos de óxido-redução.

A ação lixivante do HCl sobre minerais mais susceptíveis à alteração, tais como: opacos, máficos, anfibólios, e notadamente a ausência de auréolas envolvendo os fenocristais de feldspatos alcalinos, promoveram a maior variação de massa no fácies 2 que também, neste caso levou este ao maior aumento de porosidade.

Os fácies 1 e 3 exibem maior resistência química ao ataque com HCl (Figura 4.11). Observa-se, no entanto, que o fácies 3 apresenta-se como o mais resistente dos fácies, provavelmente em razão dos seus menores teores em plagioclásio, anfibólios e opacos, e biotitas, e as auréolas quem envolvem os feldspatos alcalinos, que neste fácies “comercial”, apresentam-se mais efetivas.

4.3.1.3. Índices físicos – após 60 dias de imersão

Os dados obtidos forneceram um perfil do comportamento da porosidade e perda de massa dos corpos de prova, submetidos aos ensaios, frente a cada um dos reagentes utilizados. (Figura 4.12)

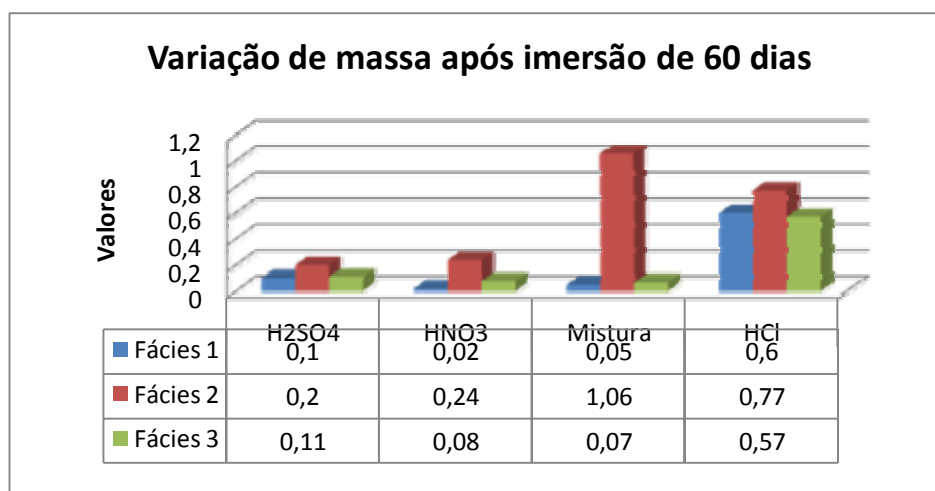


Figura 4.12: Variação de massa exibida pelos fácies para cada uma das soluções lixiviantes.

As figuras 4.12 e 4.13, referem-se aos valores médios de perda de massa e de aumento de porosidade, apresentados pelos corpos de prova após o ensaio de imersão por 60 dias nas diversas soluções lixiviantes. Estes ilustram a variação da porosidade e de perda de massa das amostras dos vários fácies após período de ataque de 60 dias, em soluções lixiviantes de H₂SO₄, HNO₃, mistura de ácidos (H₂SO₄/HNO₃), e HCl.

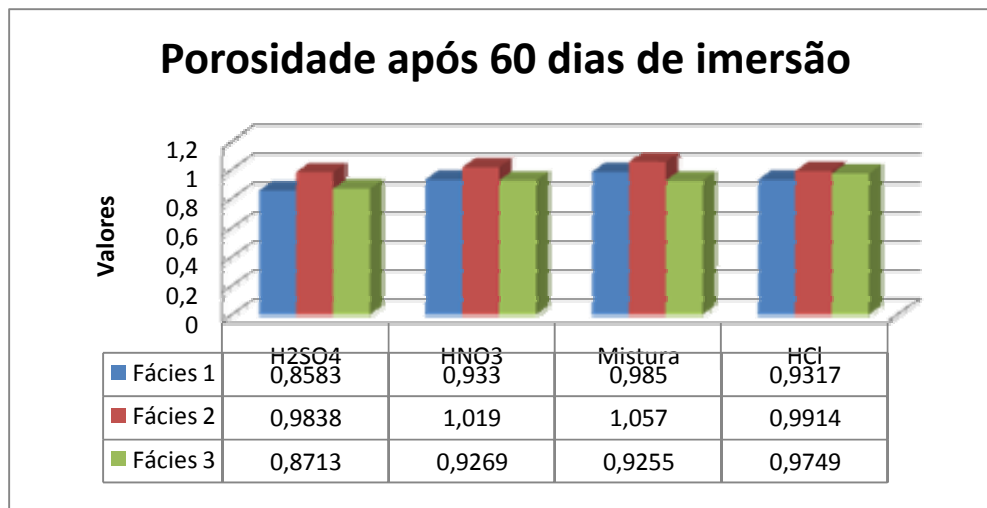


Figura 4.13: Porosidade dos diferentes fácies após 60 dias de imersão em ataque ácido

Fatores como força do ácido, mecanismo provável de ação do ácido sobre os minerais, solubilidade dos produtos formados, distribuição local dos minerais mais susceptíveis à alteração, além da perda de massa, devem ser levados em conta quando da análise do parâmetro porosidade. No entanto, apesar da influência sobre a porosidade, torna-se difícil estabelecer o limite onde estes tornam-se dominantes regendo a porosidade, em detrimento da variação de massa sofrida pela rocha. Este limite no qual este conjunto de fatores sobrepuja a variação de massa necessita de uma melhor definição. Faz-se necessário, assim, investigação mais detalhada que estabeleça com maior clareza o limite de ação destes fatores sobre o parâmetro porosidade.

4.3.1.3.1. Solução Lixivante de H₂SO₄ - 60 dias imersão

A análise dos dados indicam o fácies 2, para este período de imersão, como aquele que sofreu maior variação em sua porosidade, independentemente do tipo da solução lixivante a que a amostra foi submetida, e também como aquele que apresentou as maiores variações de massa durante os processos de lixiviação. O fácies 3 apresentou-se como o de menor porosidade, seguido pelo fácies 1, com diferenças de valores desprezíveis entre estes.

Após este período de imersão os corpos de prova, removidos, lavados, e secos por 30 dias, não mostraram presença de eflorescências. Em seguida, foram efetuadas as determinação dos índices físicos e da variação de massa dos corpos de prova, de cada um dos fácies.

Os fácies 1 e 3 apresentaram valores de porosidade praticamente idênticos (Figuras 4.14 e 4.15). Estes fácies apresentam um menor teor de minerais máficos, e um maior teor de feldspatos potássicos em suas composições mineralógicas, além de auréolas envolvendo os fenocristais de feldspatos alcalinos, o que provavelmente lhes conferem maior resistência ao ataque desta solução ácida. O fácies 2, que apresenta maior teor em minerais máficos e menor teor de feldspatos potássicos, não mostra fenocristais de feldspatos alcalinos envolvidos por auréolas.

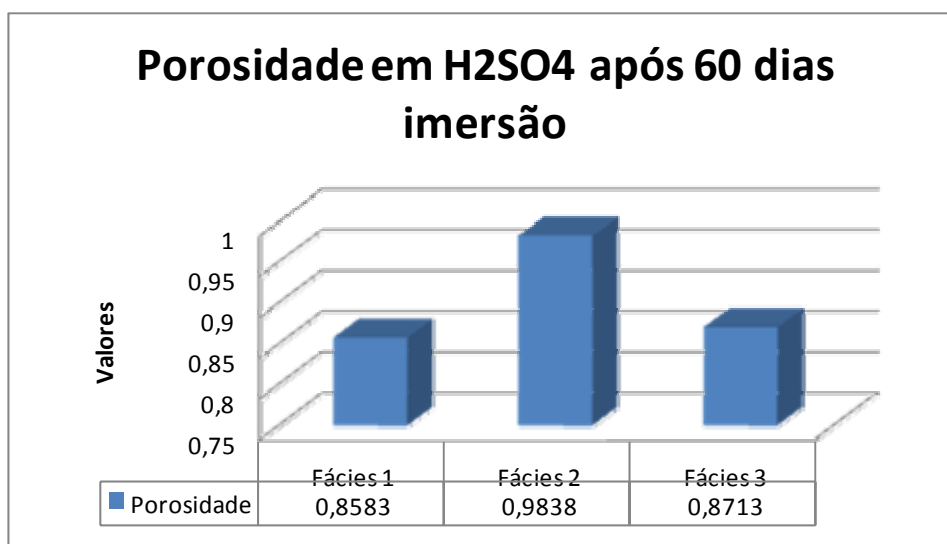


Figura 4.14: Porosidade em H₂SO₄ após 60 dias de imersão.

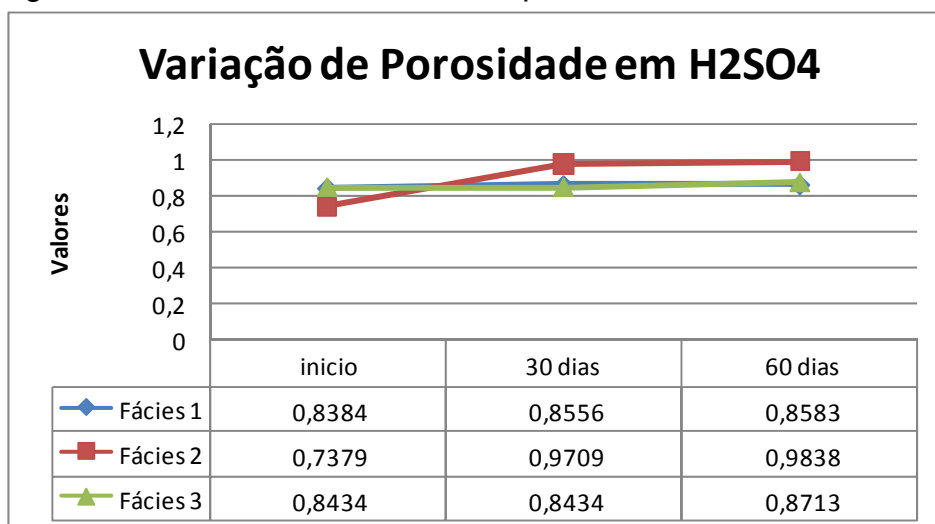


Figura 4.15: Variação de porosidade dos Fácies em solução de H₂SO₄

Os fácies 1 e 3 também exibiram menor susceptibilidade à perda de massa. Provavelmente o menor teor de minerais máficos, conjuntamente ao maior teor de feldspatos potássicos, assim como a presença de auréolas envolvendo os fenocristais de feldspatos potássicos, nestes fácies, lhes conferem uma maior resistência à perda de massa, quando sob a ação lixiviante desta solução ácida.

A maior perda de massa exibida pelo fácies 2 estaria relacionada a um menor teor de feldspatos potássicos, maior teor de minerais máficos, e à ausência de auréolas nos fenocristais de feldspatos potássicos que, desta forma, elevariam sua susceptibilidade aos processos de alteração, os quais levariam a uma maior perda de massa. Importante assinalar que o fácies 2, após o período de imersão de 60 dias, exibe porosidade bordejando o limite estabelecido por Frazão & Farjallat (1995), indicando que este fácies se aproxima de seu limite superior de porosidade. Esta observação sugere uma correlação direta com o grau de alteração deste fácies, pois uma rocha mais porosa e com a presença de microfissuras, absorverá mais água e seus minerais estarão mais susceptíveis às ações de agente intempéricos.

4.3.1.3.2. Solução lixiviante de HNO_3 - 60 dias imersão

Para este período de imersão em solução lixiviante de HNO_3 as figuras 4.16 e 4.17 sinalizam um comportamento de menor susceptibilidade ao aumento da porosidade para os fácies 1 e 3, cujo comportamento é bastante similar entre si, em razão da semelhança na composição mineralógica e também da presença de auréola envolvendo seus fenocristais feldspáticos. Apesar desta semelhança, o fácies 3 exibe menor teor de minerais máficos, maior teor de feldspatos alcalinos potássicos, e menor teor de opacos, de modo que este apresenta uma menor susceptibilidade aos processos de alteração.

O fácies 3 apresentou maior perda de massa que o fácies 1, apesar de menos susceptível a alterações em sua porosidade de modo que, como em casos anteriores, constata-se que nem sempre a perda de massa é o fator determinante sobre a variação de porosidade.

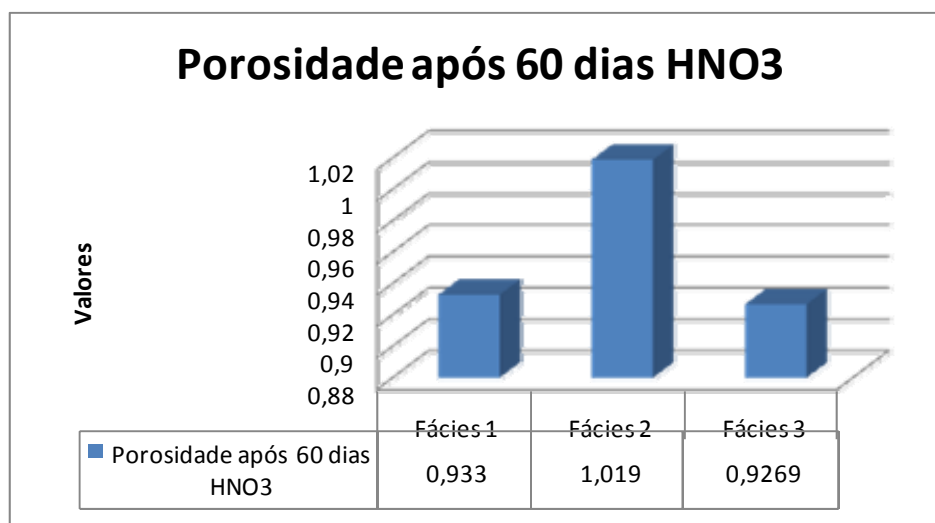


Figura 4.16: Porosidade dos fácies do Marrom Imperial após imersão de 60 dias em HNO₃

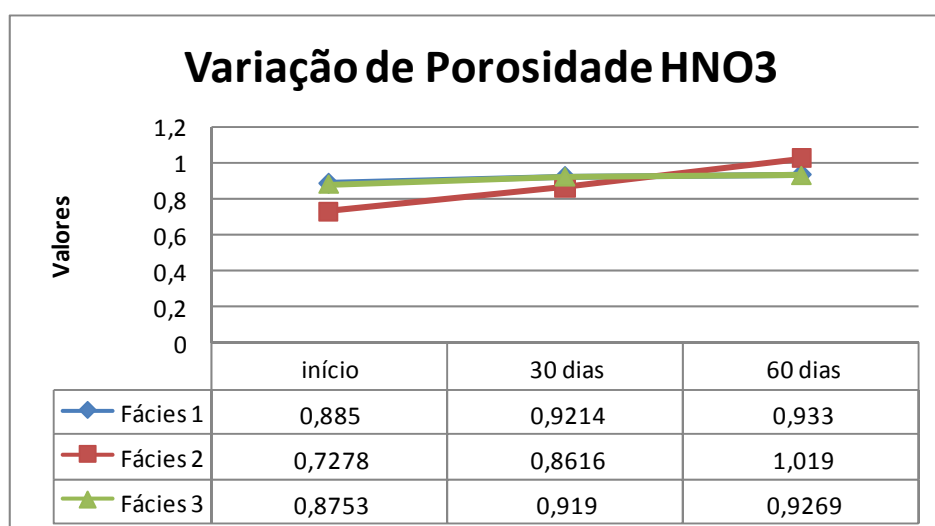


Figura 4.17: Variação de porosidade dos fácies do Marrom Imperial em HNO₃

O fácies 2 continua se apresentando como aquele de maior susceptibilidade tanto à variação de massa como de porosidade, ao cabo de 60 dias de imersão, não importando qual o tipo de lixiviação ácida a que foi submetido (Figura 4.12). A ressaltar que o fácies 2, após o ataque lixiviante por HNO₃ 0,001 molar, por 60 dias, apresentou porosidade superior ao valor limite recomendado por Frazão & Farjallat (1995), demonstrando um significativo processo de decaimento se submetido à ação de ácidos fortes. Portanto, este fácies passa a exibir, nestas condições, menor resistência aos processos de alterabilidade.

4.3.1.3.3. Solução lixiviante: mistura de H_2SO_4 e HNO_3 - 60 dias imersão

As figuras 4.18 e 4.19, mostram a variação de porosidade após período de lixiviação de 60 dias, em mistura de ácidos H_2SO_4 e HNO_3 na proporção de 2:1. Constata-se que a ação oxidante desta mistura de ácidos tem um efeito significativo sobre todos os fácies, provocando uma elevação geral na porosidade. O fácies 2 continua a exibir a maior variação nesta propriedade, embora tenha tido a menor porosidade inicial, enquanto o fácies 3 apresentou a menor variação ao ataque lixiviante, indicando assim uma menor susceptibilidade ao decaimento.

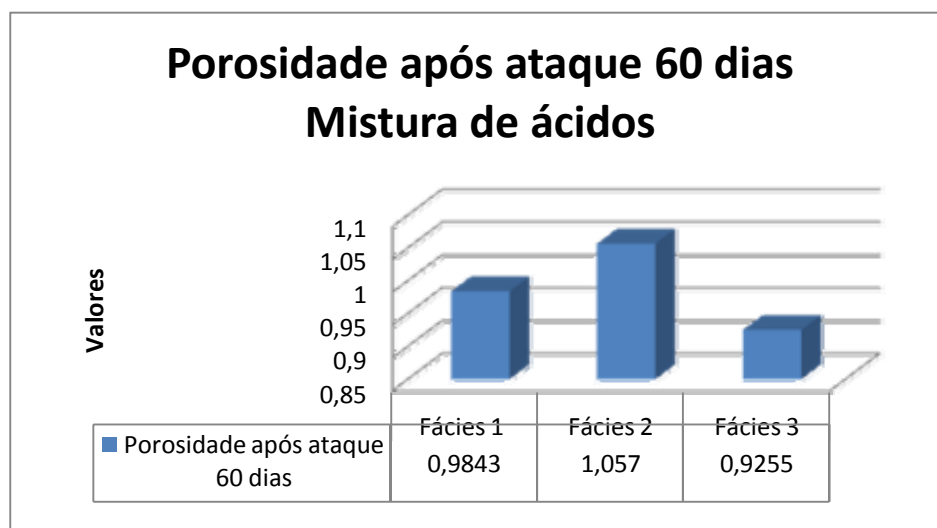


Figura 4.18: Porosidade dos fácies após ataque 60 dias mistura de ácidos

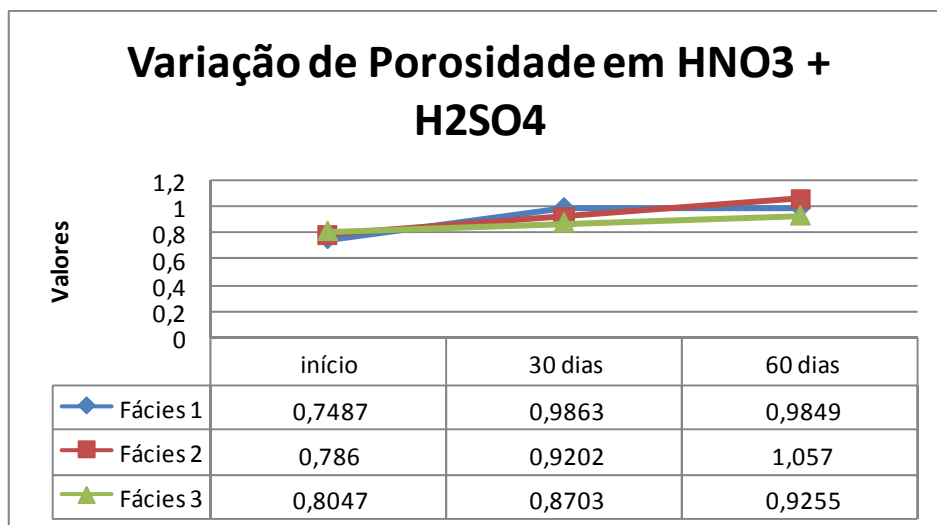


Figura 4.19: Variação de porosidade dos fácies na mistura de ácidos

De um modo geral, os resultados encontrados evidenciam que a maior ou menor susceptibilidade dos fácies é a o de soluções lixiviantes está diretamente relacionada fatores como: composição mineralógica, presença de auréola em fenocristais do fácies, textura da rocha, maior participação de feldspatos alcalinos potássicos na composição modal, maiores proporções de minerais máficos e opacos. É o que se observa nos fácies 1 e 3.

O fácies 2 apresenta-se destituído de auréola envolvendo os fenocristais de feldspatos alcalinos potássicos, possui um menor teor de feldspatos alcalinos potássicos, além de exibir maior teor de minerais máficos e maior teor de opacos, quando comparado aos demais fácies. O fácies 2 também exibe a maior perda de massa, uma vez que se mostra mais susceptível a ação desta solução lixiviante. Para este período de imersão observa-se a ocorrência de fenômeno de desagregação, apresentado pelos corpos de prova do fácies 2, de modo que o valor de 1,06 g de perda de massa, neste caso, inclui tanto a massa efetivamente dissolvida, como aquela que desagregou em função da ação da solução lixiviante.

Por apresentar maior porosidade o fácies 2, após período de imersão de 60 dias nesta solução, exibe porosidade ultrapassando os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995), indicativo de sua maior fragilidade  ação de agentes lixiviantes. Este decaimento, por sua exposição  solução lixiviante de H_2SO_4/HNO_3 sugere, portanto, que este fácies apresenta maior susceptibilidade  ação de poluentes atmosféricos antrópicos. Portanto, as mudanças nos índices físicos do fácies 2, devido a presença de minerais alterados ou susceptíveis de alteração, estão diretamente relacionadas com a diminuição progressiva da resistência mecânica o que, por sua vez, atua sobre a vida útil da rocha, sobretudo quando esta se encontrar exposta a ambientes onde estes reagentes químicos estejam presentes. Assim, o fácies 2, devido a sua maior susceptibilidade a processos de alteração, seria melhor aproveitado como elemento decorativo em ambientes internos ou seja, não expostos diretamente  ação de contaminantes provenientes do meio ambiente.

O fácies 3 apresenta menor susceptibilidade a variações em sua porosidade que o fácies 1, porque apresenta maior teor de feldspatos alcalinos potássicos e um menor teor em minerais máficos e plagioclásio (albita).

A perda de massa exibida pelo fácies 3 (0,07 g) mostrou-se discretamente mais acentuada que no fácies 1 (0,05 g). Esta pequena diferença sugere um comportamento similar destes dois fácies frente a ação da solução lixiviante, muito embora havendo a expectativa de uma menor perda de massa para o fácies 3 (menos susceptível às variações de porosidade). Porém, como já discutido em parágrafos anteriores, variações de porosidade nem sempre são acompanhadas por variações de massa.

4.3.1.3.4. Solução lixiviante HCl - 60 dias imersão

As figuras 4.20 e 4.21 mostram a variação média de porosidade dos fácies após período de lixiviação de 60 dias sob ataque lixiviante de HCl 0,001 M. Os valores obtidos correspondem à média dos valores da porosidade dos corpos de prova selecionados para imersão nesta solução ácida. Observa-se que o fácies 2 é o que apresenta maior porosidade, e o fácies 1 a menor porosidade.

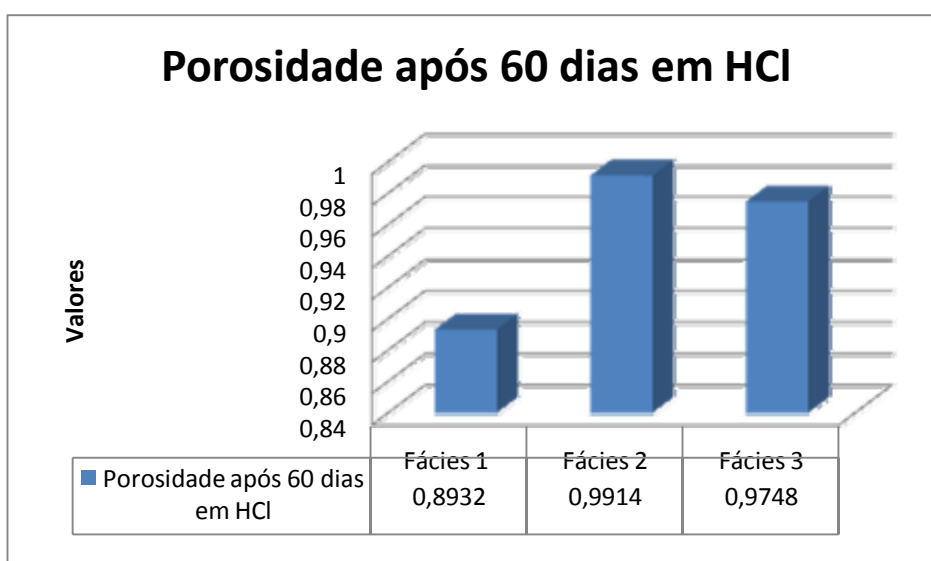


Figura 4.20: Porosidade dos fácies de Marrom Imperial após ataque em HCl por 60 dias

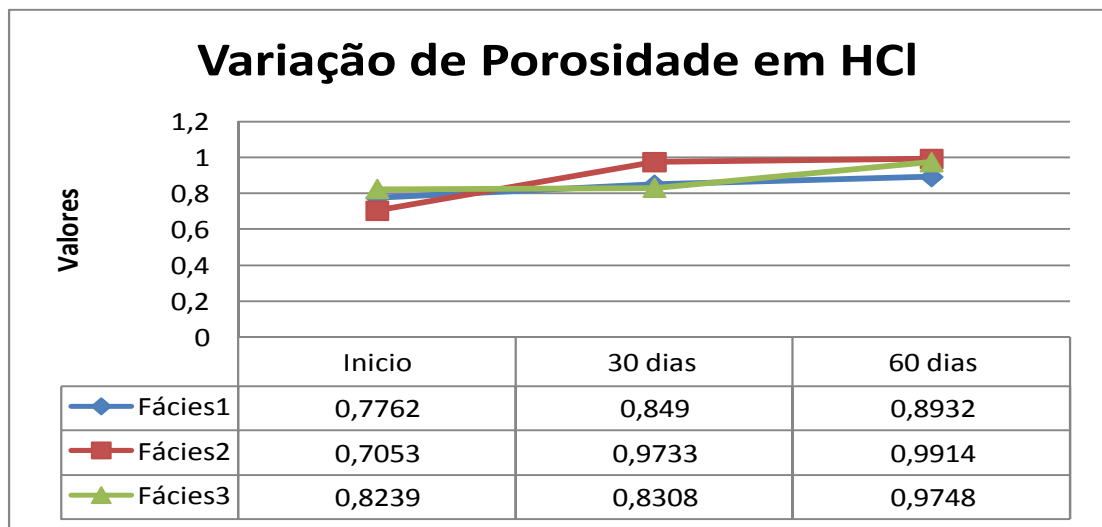


Figura 4.21. Variação de porosidade dos fácies do Marrom Imperial, após ataque por HCl, 60 dias

Apesar do fácies 1 possuir maior porosidade inicial, que o fácies 2 este mostra-se o mais resistente ao ataque ácido. Em contrapartida, o fácies 2 apresenta-se como aquele que exibe inicialmente a menor porosidade na rocha sã, porém com as maiores variações de porosidade após o período de imersão de 60 dias. Os fácies 1 e 3 mostram comportamento muito similar, embora o segundo apresente uma maior variação em sua porosidade.

A figura 4.12 (item 4.3.1.3) apresenta a variação de massa sofrida pelos fácies quando submetidos ao ataque lixiviante de HCl por 60 dias. Nela observa-se que os fácies exibiram suas maiores perdas de massa quando comparados a outras soluções lixiviantes. Esta constatação está de acordo com a maior susceptibilidade exibida por feldspatos e feldspatóides à ação do HCl o que provocou, assim, a maior perda de massa, uma vez que este sienito (Marrom Imperial), apresenta com mineral predominante feldspato alcalino potássico. O fácies 2 exibe a maior perda de massa e também a maior variação de porosidade, indicando assim sua maior susceptibilidade ao ataque desta solução lixiviante. De fato, a ausência de auréolas envolvendo os fenocristais feldspáticos, neste fácies, associada ao um menor teor em feldspatos alcalinos potássicos e maiores teores em máficos e opacos, seriam os responsáveis pela menor resistência química apresentada por este fácies.

Após um período de 60 dias, o fácies 2 apresenta ainda valor de porosidade (0,9914%) bordejando o padrão de 1%, recomendado por Frazão & Farjallat (1995) e, desta forma, apresenta a maior diminuição progressiva da resistência mecânica entre os fácies estudados. Este aumento de porosidade leva a uma maior absorção de água que, por sua vez, conduz a uma diminuição da vida útil da rocha, sobretudo quando esta estiver exposta a ambientes onde estes reagentes químicos estiverem presentes. Especificamente, este é o caso dos ambientes litorâneos, onde a névoa salina, combinada a poluentes atmosféricos reagem quimicamente, promovendo a formação de HCl.

A maior perda de massa exibida por todos os fácies do sienito Marrom Imperial, quando expostos a ação do HCl, poderia vir a acarretar variações significativas nos seus índices físicos, em decorrência da exposição continuada de todos eles em ambientes susceptíveis da presença de HCl, notadamente nas regiões litorâneas.

O fácies 1 e 3 exibem perdas de massa, praticamente idênticas 0,60 e 0,57g respectivamente, embora o fácies 3 apresente maior porosidade, fato este que estaria em concordância com o comportamento apresentado por estes fácies, pois em rocha são o fácies 3 que exibe os maiores valores de porosidades, de modo que a ação da solução de HCl sobre este fácies, ocorreu por dissolução e elevou a porosidade já existente no fácies. Este fato pode ser constatado pelo comportamento dos fácies que exibem perdas de massa praticamente idênticas e apresentam composição mineralógica muito semelhante entre si.

Os dados de porosidade apresentados pelos fácies em relação a todas as soluções ácidas lixivantes se encontram resumidas na figura 4.13, onde se constata a maior fragilidade do fácies 2 em relação a estas soluções lixivantes, sendo este fácies o que maior variação de porosidade apresentou. Como já mencionado, esta constatação estaria diretamente associada à diferença de composição mineralógica e textura apresentada por estes fácies, e à ausência de auréola envolvendo os fenocristais de feldspatos alcalinos, associados ao maior teor de minerais máficos. A presença de opacos e plagioclásios, neste fácies, e a ausência de quartzo, seriam os responsáveis pela sua maior susceptibilidade ao ataque das soluções lixivantes.

Desta forma, é forte a constatação de que as diferenças de composição mineralógica e de textura exibidas por este fácies sejam as responsáveis por lhe conferirem menor resistência ao ataque químico.

4.4. Índices físicos - absorção aparente de água

Os dados obtidos para absorção de água, após períodos de imersão de 30 e 60 dias, estão disponíveis nas figuras 4.22, 4.23 e 4.24, fornecendo um perfil do comportamento da absorção d'água exibida pelos fácies estudados, frente a cada um dos reagentes utilizados.

Os dados obtidos revelam que os fácies 1 e 3 apresentam os menores valores de absorção d'água, após os períodos de imersão, embora tenham exibido inicialmente os maiores valores de porosidade e de absorção d'água, na rocha sã. Os valores de variação de absorção d'água apresentam correlação positiva com os valores de porosidade, de forma que o comportamento apresentado pela absorção também é acompanhada pela porosidade. Assim observa-se que os maiores valores de porosidade estão associados aos maiores valores de absorção d'água (Figuras 4.10, 4.13, 4.22, 4.23 e 4.24).

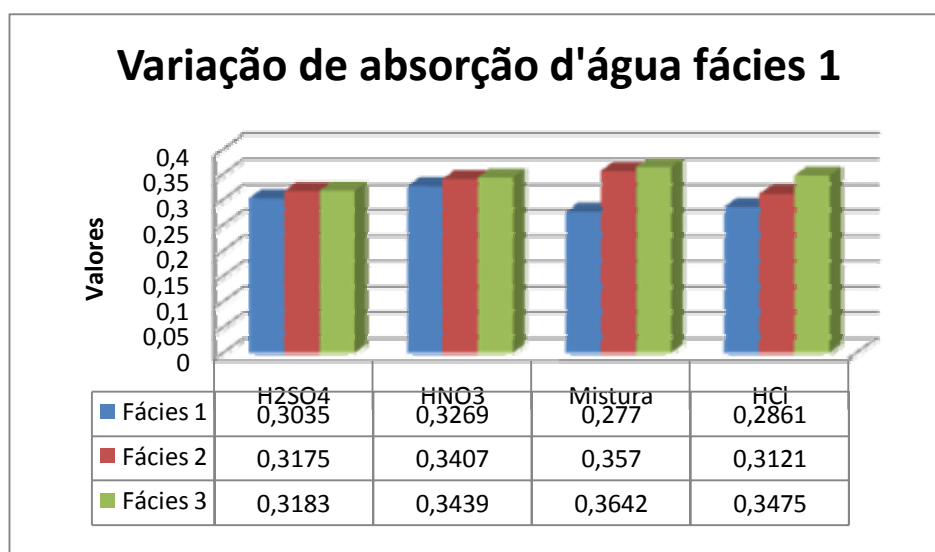


Figura 4.22 - Variação da absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 1

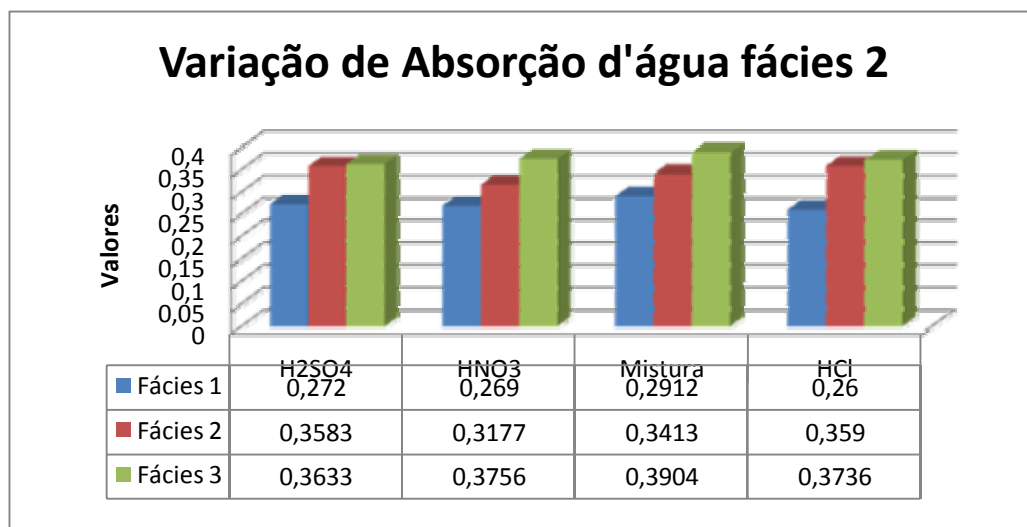


Figura 4.23 - Variação da absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 2.

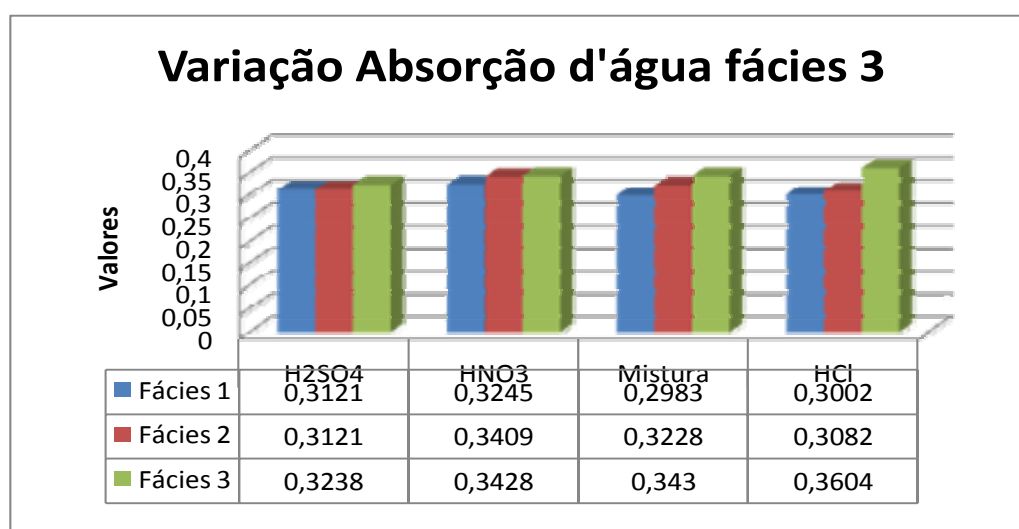


Figura 4.24: Variação da absorção d'água do Marrom Imperial, fácies 3

Os fácies 1 e 3 apresentam valores praticamente semelhantes de variação da absorção d'água e de porosidade, quando submetidos às soluções lixiviantes de ácido sulfúrico e ácido nítrico. No entanto, observa-se que a solução lixivante composta pela mistura de ácidos (H₂SO₄/HNO₃) promove uma maior variação de porosidade no fácies 1, o que origina também maior variação de absorção d'água no mesmo. Esta variação provavelmente está relacionada ao maior teor de minerais mais susceptíveis a alteração (máficos), presentes neste fácies.

A solução lixiviante de HCl provocou variação de porosidade e absorção d'água no fácies 3 maior que no fácies 1, embora esta seja uma diferença pequena. Este comportamento provavelmente está associado ao maior teor de feldspatos alcalinos presentes no fácies 3, os quais são reconhecidamente mais susceptíveis à ação do HCl, provavelmente seria a causa responsável pela sua maior variação de porosidade e conseqüente absorção d'água exibida por este fácies.

O fácies 2 apresentou os maiores valores de absorção de água e de porosidade após 60 dias de imersão, embora tenha inicialmente exibido os menores valores de porosidade e de absorção d'água, na rocha sã. Estas observações sinalizam fortemente para a íntima relação existente entre este parâmetro, a porosidade, e a composição mineralógica de cada um dos fácies estudados.

Em todos os fácies observa-se a elevação do índice de absorção d'água em relação aos períodos de imersão, para todas as soluções lixiviantes empregadas, muito embora que algumas delas exibam variações significativamente maiores que outras. A existência de casos de algumas soluções lixiviantes promoverem uma maior variação de absorção d'água e de porosidade decorre tanto da variação na composição mineralogia exibida pelos fácies como também pelos possíveis mecanismos de dissolução exibidos pelas soluções lixiviantes, incluindo-se ainda fatores que atuam sobre a porosidade.

A presença de auréolas envolvendo os feldspatos alcalinos potássicos (fácies 1 e 3), teor de minerais máficos e de opacos, solubilidade dos produtos formados, distribuição, tamanho, localização e contato dos poros presentes nos fácies, preenchimento destes vazios por minerais de maior ou menor facilidade de alteração, presença de pertitas, entre outros, são fatores que atuam sobre os parâmetros absorção d'água e porosidade.

A relação direta entre porosidade e absorção d'água, exibida pelos fácies do Marrom Imperial, após período de 60 dias de imersão em soluções reativas, pode ser observada nas figuras 4.25, 4.26 e 4.27. Os fácies exibem os maiores valores de

absorção de água em soluções lixiviantes que provocaram as respectivas maiores variações de porosidade.

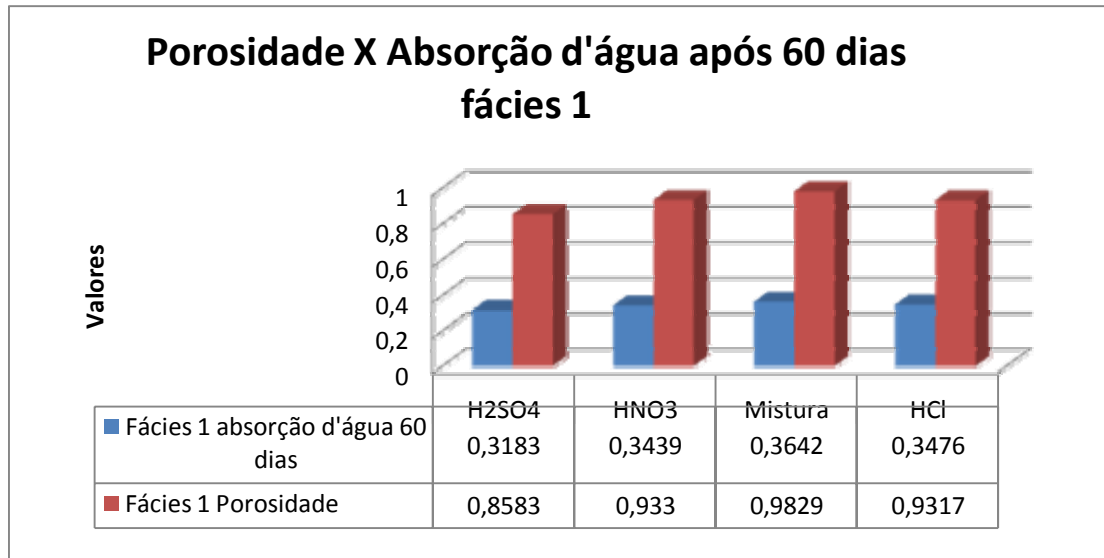


Figura 4.25 - Relação entre porosidade e absorção d'água do Marrom Imperial, fácies 1

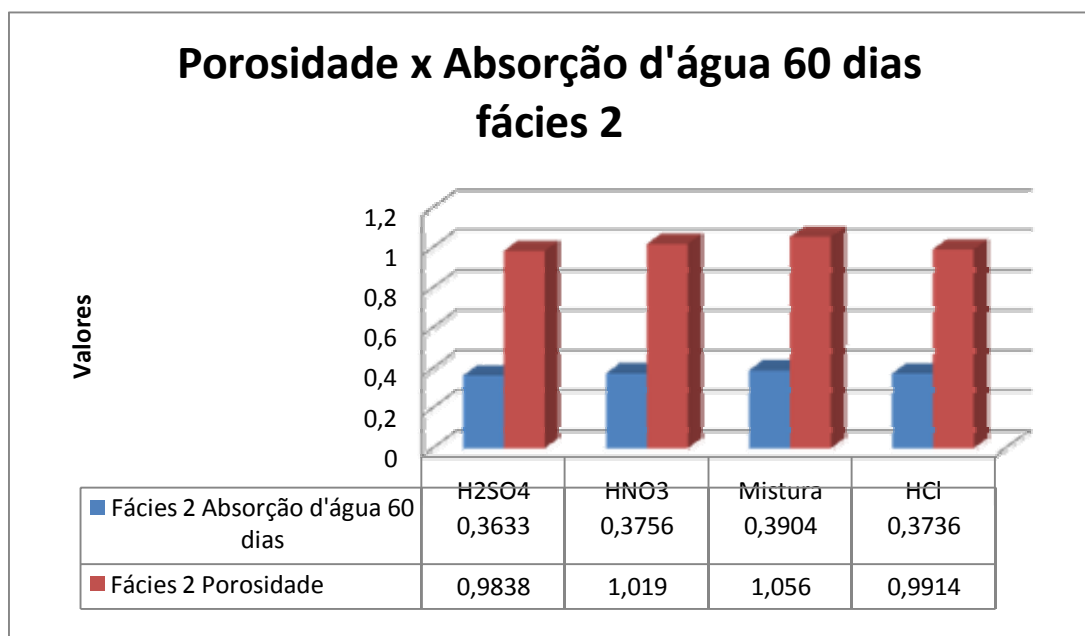


Figura 4.26: Relação entre porosidade e absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 2.

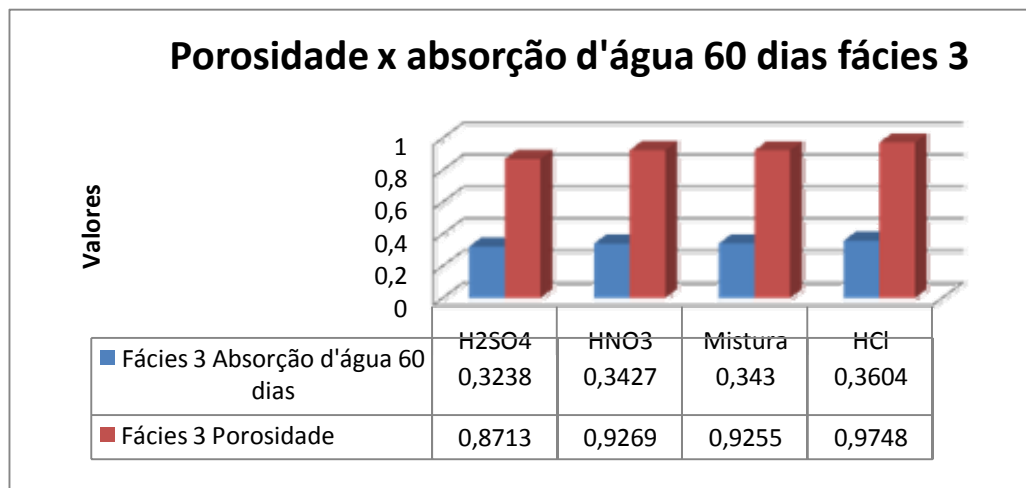


Figura 4.27: Relação entre porosidade e absorção d'água, Marrom Imperial, fácies 3.

O fácies 1 exibe a maior variação de absorção d'água e de porosidade quando submetido à ação da solução de ácidos sulfúrico/nítrico, por período de 60 dias (figura 4.25), confirmando o maior poder agressivo desta mistura. Os corpos de prova submetidos a soluções lixiviantes de ácido nítrico e de ácido clorídrico, apresentaram valores de porosidade e de absorção de água muito próximos.

O fácies 2 exibe as maiores variações de porosidade e de absorção d'água, quando submetido a lixiviação por 60 dias, nas soluções de ácido nítrico e mistura dos ácidos nítrico/sulfúrico (Figura 4.26). Seus valores de porosidade, para estas soluções lixiviantes, e para este período de imersão, apresentaram-se superiores ao recomendado por Frazão & Farjallat (1995). Os valores de absorção de água exibidos por este fácies, mesmo após os períodos de imersão, ainda se encontram dentro do padrão recomendado por estes autores, que fixam os índices de absorção d'água em valores menores que 0,4%.

Os maiores valores de absorção d'água do fácies 3, considerado um período de imersão nas diferentes soluções lixiviantes, ocorreram quando a solução lixiviante foi de HCl (Figura 4.27). No entanto, é fato que o maior teor de feldspatos potássicos presentes neste fácies pode, provavelmente, apresentar-se como o responsável por esta maior diferença na absorção d'água, uma vez que feldspatos e feldspatóides são mais sensíveis a ação deste ácido (HCl).

Os valores de porosidade e de absorção d'água, do fácies 3 sob diferentes condições de ataque lixiviante, durante uma imersão de 60 dias, mostram-se próximos entre si (Figura 4.27).

4.5. Resultados dos ensaios de alterabilidade

4.5.1. Lixiviação estática à pressão e temperatura ambientes.

4.5.1.1. Modificações estéticas.

Os fácies 1 (auréolas rosa claras a brancas), 2 (sem auréolas) e 3 (auréolas rosas) do Marrom Imperial, imersos em diferentes soluções ácidas durante 30 a 60 dias (todas em $\text{pH} = 3$), apresentaram comportamentos distintos quanto às mudanças estéticas, de acordo com o período e com a natureza química da solução lixiviante. Mudanças estéticas qualitativas mais significativas ocorreram no fácies 2 (sem auréolas).

A imersão total dos fácies em soluções ácidas objetivou verificar suas respectivas estabilidades face às modificações antrópicas causadas pela acidificação das águas, notadamente em áreas costeiras, através de possíveis modificações estéticas qualitativas de tonalidades, surgimento de vazios, e valores quantitativos de perda de massa. Grande parte dos corpos de prova dos fácies 1 e 3 não exibiu modificações qualitativas significativas em suas superfícies polidas, em relação aos períodos de imersão de 30 e 60 dias. (Figuras 4.28 a 4.35)

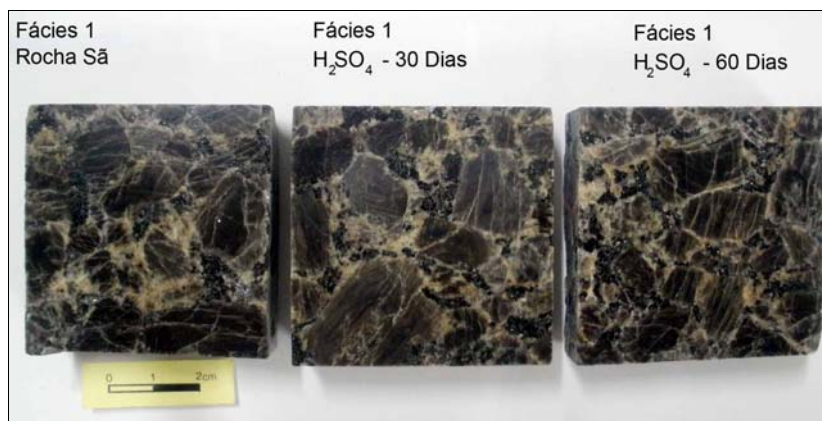


Figura 4.28: Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, em H_2SO_4 , rocha sã, 30 e 60 dias.

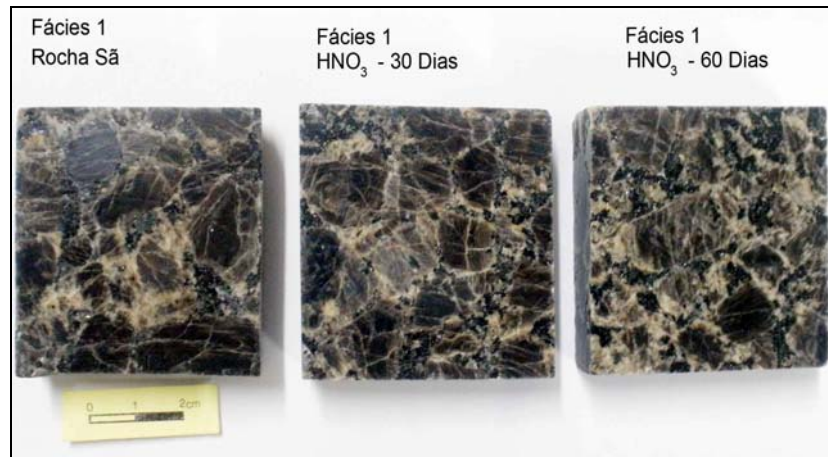


Figura 4.29: Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, em HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias.

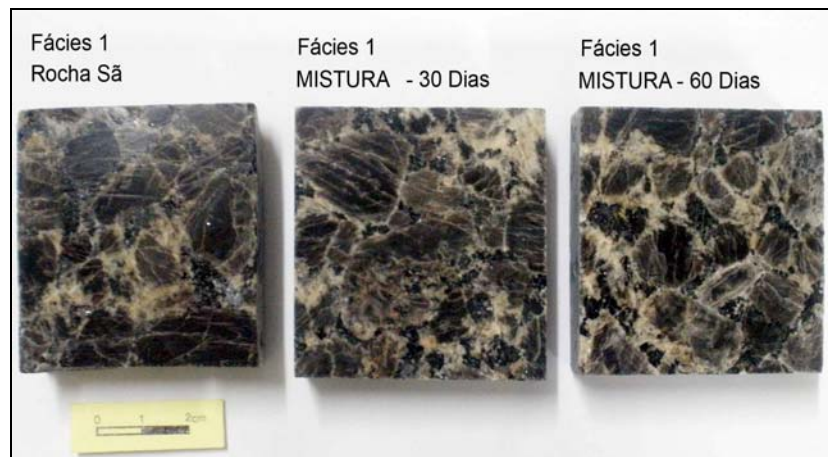


Figura 4.30. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, mistura $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{HNO}_3$, rocha sã, 30 e 60 dias.

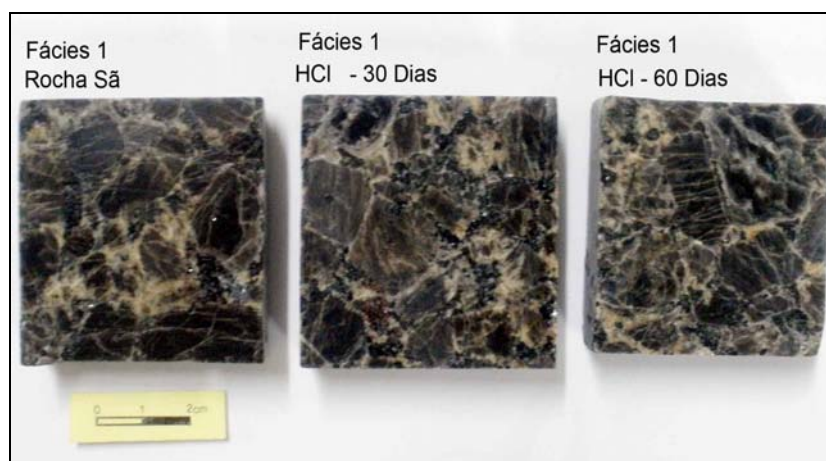


Figura 4.31: Aspectos do Marrom Imperial, fácies 1, em HCl , rocha sã, 30 e 60 dias.

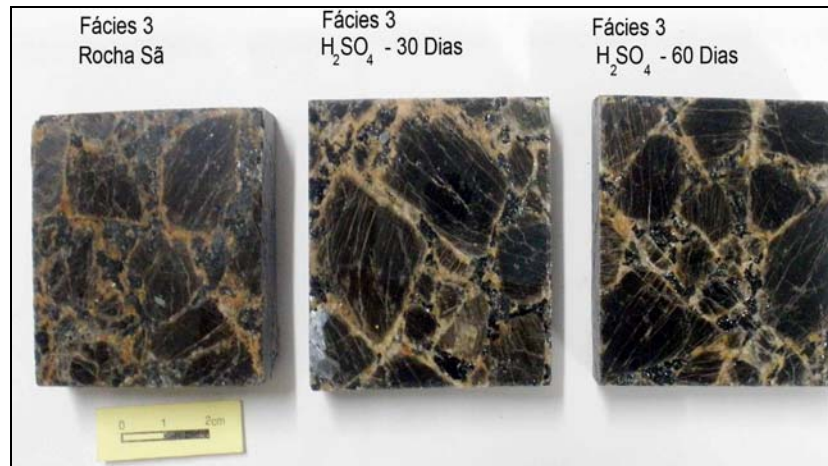


Figura 4.32. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em H₂SO₄, rocha sã, 30 e 60 dias.

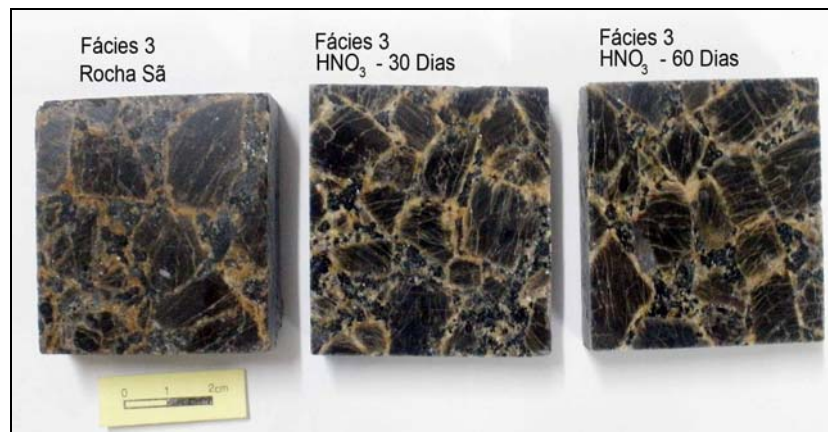


Figura 4.33. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em HNO₃, rocha sã, 30 e 60 dias.

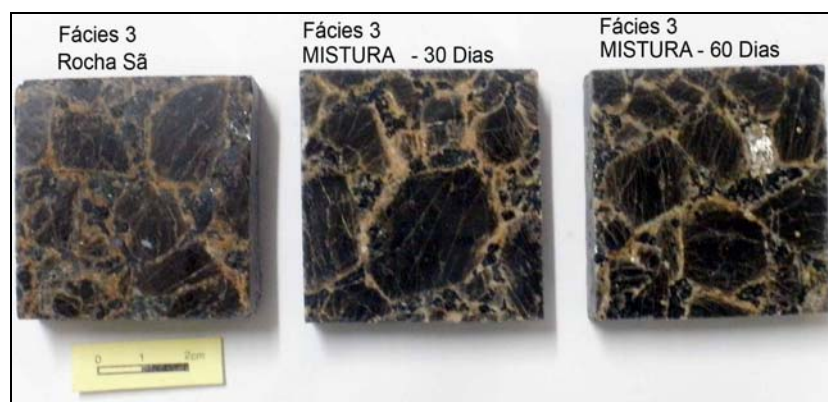


Figura 4.34. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em mistura H₂SO₄ / HNO₃, rocha sã, 30 e 60 dias.

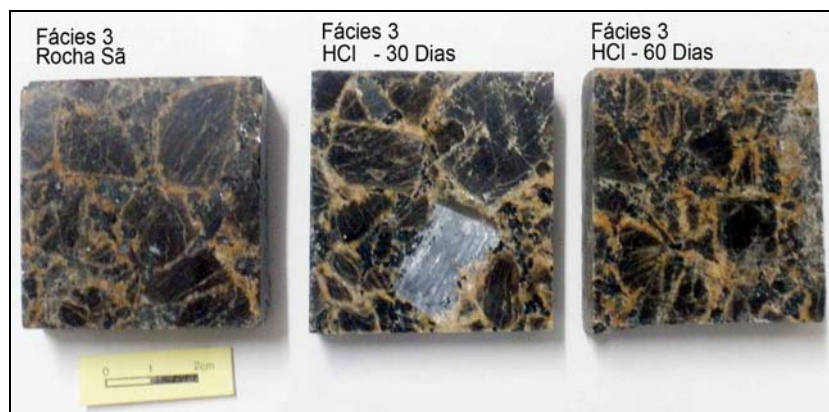


Figura 4.35. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 3, em HCl , rocha sã, 30 e 60 dias.

O fácies 2 apresentou modificações estéticas mais intensas em suas superfícies polidas. As principais modificações qualitativas observadas foram perda de brilho e rugosidade superficial, devido à lixiviação parcial de constituintes; descoloração devido à oxidação de minerais ferromagnesianos; formação de microcavidades e evidências de microfissuras intergranulares nos planos de clivagens formando linhas paralelas e anastomosadas (Figuras 4. 36 a 4.39).

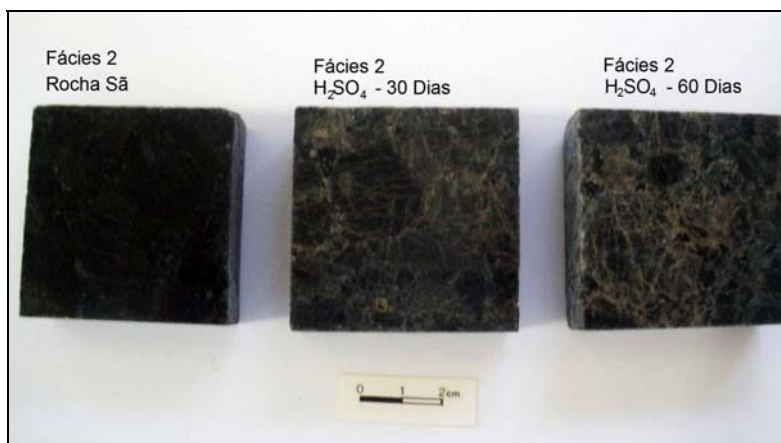


Figura 4.36. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em H_2SO_4 , rocha sã, 30 e 60 dias.

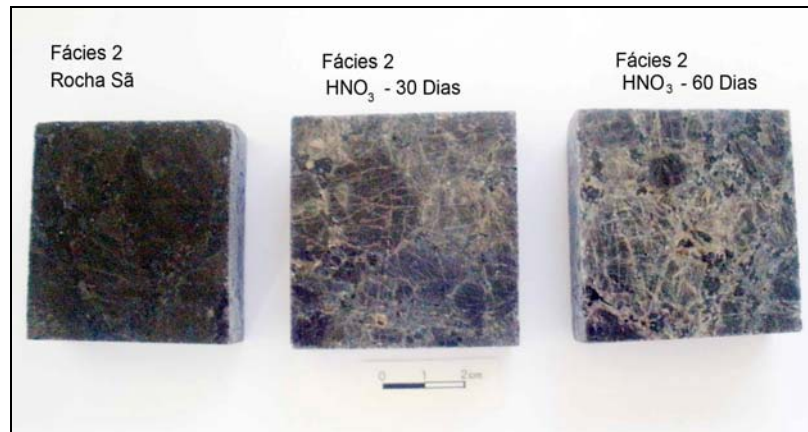


Figura 4.37. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em HNO_3 , rocha sã, 30 e 60 dias.

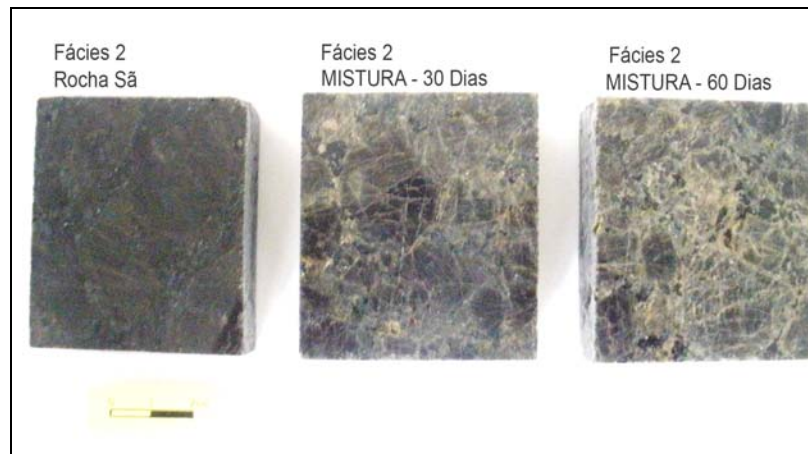


Figura 4.38. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em mistura $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$, rocha sã, 30 e 60 dias.

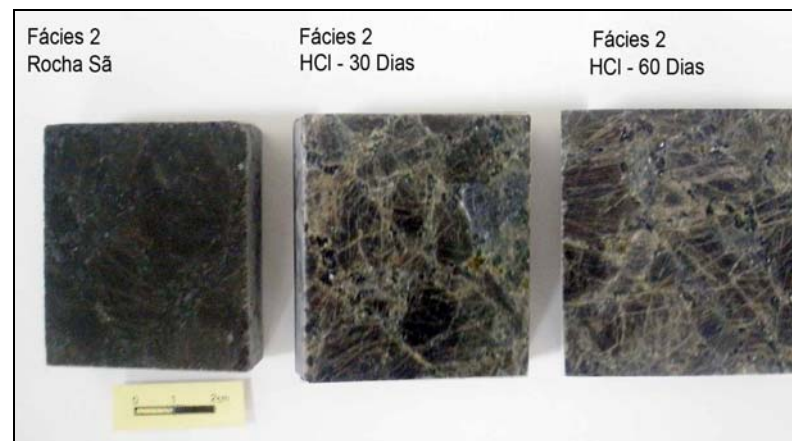


Figura 4.39. Aspectos do Marrom Imperial, fácies 2, em mistura HCl , rocha sã, 30 e 60 dias.

Entre as mudanças estéticas observadas se destacaram: perdas de cor e brilho, e o realce de algumas feições como microfissuras. O fácies 2 (sem auréolas) foi aquele que exibiu mudanças mais significativas, já os fácies 1 e 3 apresentaram mudanças estéticas muito discretas. Estes fatos evidenciam que a existência de auréolas confere ao fácies maior resistência química ao ataque de ácidos.

Outro fator importante corresponde ao maior ou menor conteúdo de matriz contendo minerais máficos e opacos, mais susceptíveis a alteração o que provavelmente colabora para evidenciar as alterações cromáticas sofridas pelos minerais. Os ensaios de imersão total mais prolongados (60 dias) apresentaram as maiores mudanças estéticas na superfície da rocha, mais notadamente perceptíveis nos fácies submetidos à mistura dos ácidos sulfúrico/nítrico, seguindo-se os ácidos sulfúrico e clorídrico, que revelaram intensidades de modificações estéticas muito próximas entre si.

Dos fácies estudados, o fácies 2, com maior conteúdo de matriz foi o que mais mudanças estéticas apresentou, indicando assim que o maior ou menor teor de matriz presente na litologia responde por uma maior ou menor resistência frente as soluções lixiviantes. Quanto à agressividade destas soluções, este parâmetro esteve intimamente ligado ao tempo de imersão do corpo de prova e ao tipo de ácido constituinte do reagente. A mistura de ácidos sulfúrico/nítrico apresenta-se como o agente mais agressivo em relação à preservação do aspecto estético dos fácies (notadamente do fácies 2) provocando, em diferentes graus de intensidade, modificações na superfície da rocha.

Para um período de imersão de 30 dias, o fácies 2 apresentou modificação estética em suas características em todas as soluções ácidas a que foi submetido. Comparando-se os fácies polidos, submetidos às diferentes soluções, para o mesmo período de imersão, observa-se um comportamento semelhante em todas eles, com um pequeno destaque para as amostras submetidas ao ataque da mistura de ácidos sulfúrico/nítrico. Neste período de imersão, o fácies 2 sofreu os maiores danos em seus aspectos mineralógicos e texturais, passando da tonalidade natural marrom escura para marrom esverdeada em algumas porções, ocorrendo realce do

microfissuramento existente, geração de pequenas cavidades devido à lixiviação de constituintes mineralógicos, e perda de brilho original.

As alterações de tonalidade visíveis a olho nu evidenciadas pelas descolorações das placas polidas, em especial no fácies 2, sugerem que estas modificações são devidas a uma lixiviação parcial dos constituintes minerais da rocha quando soluções ácidas são absorvidas e penetram nas microfissuras.

Em contraste, os fácies 1 e 3, que apresentam menor teor de matriz, e presença de aureolas envolvendo os fenocristais de feldspatos potássicos, estes não apresentaram modificações estéticas significativas tanto para o período de imersão de 30 dias, como de 60 dias, embora tenham apresentado modificações muito discretas de perda de brilho e de descoloração. Os fácies 1 e 3 exibiram maior susceptibilidade ao ácido clorídrico, para um período de imersão de 60 dias. No entanto, esta solução lixiviante, apesar de ter provocado as maiores variações de massa nestes fácies, não desenvolveu as maiores modificações estéticas nos mesmos.

Modificações estéticas poderão comprometer o uso do Marrom Imperial, notadamente do fácies 2, se utilizado como revestimento externo, principalmente em ambientes susceptíveis à ação das soluções ácidas testadas. Regiões costeiras urbanas, por exemplo, possuem a desfavorável convergência de combinar *spray* salino com ácidos provenientes da queima de combustível fóssil, que gera ácido clorídrico.

4.5.1.2. Diminuição do brilho

Após a aplicação, as rochas ornamentais utilizadas generalizadamente como revestimento encontram-se expostas a diversas situações agressivas, como poluição atmosférica, chuvas ácidas, produtos de limpeza, sucos ácidos, vinagre, entre outras. Estas substâncias, quando em contato com as rochas, podem reagir com os minerais constituintes das litologias, promovendo modificações significativas no brilho, na coloração, comprometendo a estética do material lítico, devido ao seu decaimento físico-químico.

Apesar do brilho ser um dos parâmetros indicadores do grau de alterabilidade sofrido pela rocha, é necessário se observar que o processo de polimento não é homogêneo e, portanto, varia de uma placa para outra, ainda que tratadas pelo mesmo procedimento industrial. Assim, para que o monitoramento possa ser significativo, ele deve ser conduzido sobre corpos de prova obtidos de uma mesma placa polida, o que elimina em parte as possíveis variações que podem ocorrer ao longo do processo de polimento.

As medidas de brilho efetuadas nos corpos de prova de cada um dos fácies estudados, antes e após os ensaios de imersão total de 30 e 60 dias, encontram-se na tabela 4.3. A tabela 4.4 contém os respectivos percentuais de perdas de brilho apresentadas pelos fácies “comerciais” estudados, enquanto a figura 4.39 exibe a relação de perda de brilho, por reagente e período de imersão de cada um dos fácies estudados.

Tabela 4.3: Perda de brilho dos fácies de Marrom Imperial sob ataque de diferentes soluções lixiviantes, e em diferentes períodos de imersão.

Fácies	Início	30 dias	60 dias
Facies 1 em H ₂ SO ₄	71,7	64,7	56,9
Facies 1 em HNO ₃	74	64,5	60,3
Facies 1 em H ₂ SO ₄ / HNO ₃	66,5	60,5	53,2
Facies 1 em HCl	73,9	65,1	54,9
Fácies 2 em H ₂ SO ₄	69,3	59,2	42,2
Fácies 2 em HNO ₃	69,1	57,3	48,4
Fácies 2 em H ₂ SO ₄ / HNO ₃	69,5	60,3	54,8
Fácies 2 em HCl	64,5	53,6	37,6
Fácies 3 em H ₂ SO ₄	66,3	60,7	55,1
Fácies 3 em HNO ₃	64,6	58	55,4
Fácies 3 em H ₂ SO ₄ / HNO ₃	65	61,5	54,6
Fácies 3 em HCl	61,8	49,5	45,73

Tabela 4.4: Perda de brilho percentual por período de imersão em ataque ácido.

PERÍODO	Solução	0-30 dias	0-60 dias
Fácies 1	H ₂ SO ₄	9,76	20,64
	HNO ₃	12,84	18,51
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	9,02	20
Fácies 2	HCl	11,9	25,71
	H ₂ SO ₄	14,57	39,1
	HNO ₃	17,1	19,82
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	13,23	21,15
Fácies 3	HCl	16,9	41,7
	H ₂ SO ₄	8,45	16,90
	HNO ₃	10,22	14,24
	H ₂ SO ₄ / HNO ₃	5,38	16,00
	HCl	19,90	26,0

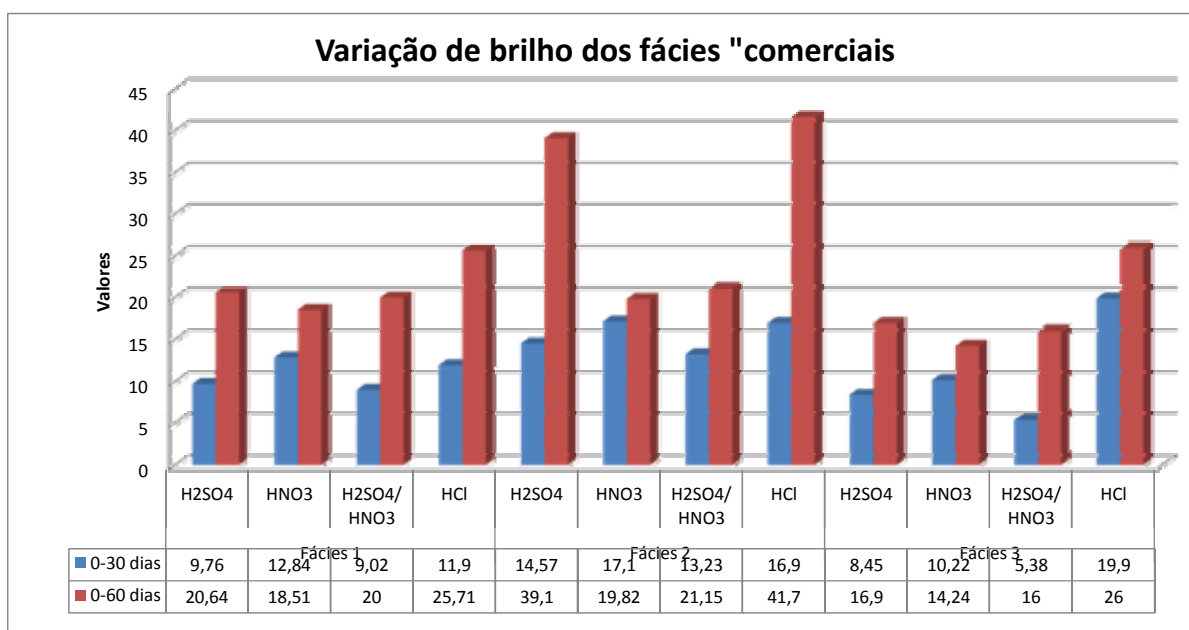


Figura 4.40 - Perda de brilho por reagente e período de imersão do Marrom Imperial

Os dados contidos nas tabelas acima 4.3 e 4.4 , e na figura 4.39, indicam que as perdas de brilho exibidas pelos fâcies apresentam variações em relação ao tempo de imersão e a solução lixiviante a que os fâcies foram submetidos. O fâcies 2 apresenta-se como aquele que exibe as maiores perdas percentuais de brilho nos períodos de imersão de 60 dias (Figura 4.39). Apesar das placas polidas de cada um dos fâcies estudados apresentarem polimentos diferenciados entre si, a gradação de

perda de brilho é constatável com o tempo não importando o tipo de solução lixiviante (Tabela 4.3). De fato, a composição mineralógica apresentada pelo fácies 2 assinala que este apresenta um menor teor de feldspatos potássicos, associados a um maior teor de minerais máficos e opacos, presentes em sua matriz, além da ausência de aureola, envolvendo os fenocristais de feldspatos potássicos. Por estas características mineralógicas este fácies possui a maior susceptibilidade à alteração.

Os fácies 1 e 3 apresentam comportamentos compatíveis entre si em relação às soluções lixiviantes, guardando-se no entanto as devidas diferenças entre estes. Ambos apresentaram as maiores perdas de brilho quando submetidos à lixiviação em HCl, por período de 60 dias, embora que as perdas percentuais de brilho exibidas pelo fácies 1 para as soluções lixiviantes de ácido sulfúrico e mistura de ácidos, ao termo deste mesmo período de imersão, apresentem resultados próximos.

Em relação ao fácies 3, este apresentou sua maior perda de brilho quando submetido à ação da solução lixiviante de ácido clorídrico, tanto para o período de imersão de 30 como para o de 60 dias. Comparando-se os percentuais de perda de brilho apresentados pelos fácies estudados, observa-se que as perdas exibidas pelo fácies 3 correspondem aos menores valores de perda percentual de brilho, sinalizando assim para sua menor susceptibilidade em relação à ação das soluções lixiviantes.

Quando se compara a perda de brilho percentual exibida pelos fácies 1 e 3 observa-se que o primeiro exibe maior perda de brilho e, portanto, o fácies 3 apresenta-se como aquele menos susceptível a ação das soluções lixiviantes. Os resultados de determinação de brilho, perda de massa e porosidade, sinalizam fortemente para a relação existente entre estes parâmetros e a composição química, mineralógica e textural, exibida por cada um dos fácies.

De fato, os dados de todos os parâmetros estudados têm revelado que a maior ou menor susceptibilidade à alteração demonstrada pelos fácies está associada à ausência ou presença de auréolas envolvendo os fenocristais feldspáticos, maior ou menor teor de matriz, e por conseqüente, maior ou menor teor

de minerais máficos e opacos, assim como maior ou menor teor de feldspatos potássicos presentes. De modo que as diferenças mineralógicas entre os fácies comerciais revelam-se como os vetores de diferenciação no que se refere a uma maior ou menor susceptibilidade destes fácies à ação intempérica.

O aumento de participação de minerais mais susceptíveis à alteração em um fácies eleva a reatividade deste frente às soluções lixiviantes, tornando-o mais vulnerável aos processos intempéricos. Alguns outros minerais, como os micáceos, não permitem um “fechamento completo” da superfície polida devido a estrutura placoide exibida por estes, promovendo a formação de pequenas cavidades nas placas e, portanto, comprometendo o polimento da rocha. Além disto, minerais micáceos, favorecem a ação corrosiva das soluções lixiviantes, assim como os feldspatos que podem se alterar para argilominerais, notadamente os plagioclásios cálcicos e sódicos, já que estes apresentam-se menos resistentes à ação do intemperismo que os feldspatos potássicos. De modo que, quanto mais susceptível o mineral à alteração, e quanto maior sua participação na composição do fácies, maior também será a diminuição de brilho exibida por este último.

4.5.1.3. Perda de massa

As figuras 4.11 e 4.12 (item 4.3.1.2 e 4.3.1.3) relacionam a perda de massa sofrida pelos corpos de prova nos dois períodos de imersão (30 e 60 dias). Esta variação de massa, durante os ensaios de lixiviação estática, se dá através de dois mecanismos distintos:

- Perda de massa por dissolução, ou seja, por reação com as soluções lixiviantes;
- Perda de massa por enfraquecimento e desagregação do material pétreo.

Ambos os processos respondem pela variação de massa sofrida pelos corpos de prova, porém por processos distintos, um deles envolvendo dissolução e o outro envolvendo a desagregação de material, por enfraquecimento, de modo não se pode atribuir a perda de massa total como sendo apenas aquela deslocada por reatividade frente às soluções lixiviantes.

4.5.1.3.1. Perda de massa em período de imersão de 30 dias

A figura 4.11 mostra as variações de massa sofridas pelos fácies sob ataque das diferentes soluções lixiviantes, durante um período de imersão total de 30 dias. Nesta figura observa-se que a menor variação de massa do fácies 1 (feldspatos com auréolas rosa claras a brancas), foi de 0,080 g, tendo ocorrido quando este foi submetido à lixiviação com HNO_3 e mistura de ácidos (H_2SO_4 / HNO_3). A maior variação de massa exibida por este fácies foi de 0,140 g, quando submetido à lixiviação por solução de HCl , durante 30 dias.

O fácies 2 (feldspatos sem auréola) apresentou sua menor variação de massa (0,100 g) quando submetido ao ataque por solução de HNO_3 , e maior variação (0,270 g) quando submetido à lixiviação com solução de HCl , durante imersão por 30 dias.

O fácies 3 apresentou a menor variação (0,040 g) quando submetido à ação de solução de H_2SO_4 , e de 0,060 g quando submetido a ação de solução de HCl .

O comportamento dos fácies varia de acordo com a solução lixivante a que estiveram submetidos, o que está associado a características como: composição químico-mineralógica de cada fácies, teor de minerais máficos, presença de intercrescimentos minerais, teor de opacos, e presença de minerais contendo íons metálicos reduzidos, solubilidade dos produtos formados, mecanismo de ação das soluções lixiviantes, dentre outras.

Os dados indicam que o fácies 2 (maior teor de matriz) apresentou a maior perda de massa quando submetido a qualquer das soluções lixiviantes. No entanto, o comportamento dos fácies 1 e 3 variou de acordo com a solução lixivante a que estiveram submetidos. A perda de massa foi maior no fácies 1 que no fácies 3, no caso de três das soluções lixiviantes: ácido sulfúrico, ácido nítrico e ácido clorídrico. No entanto, o fácies 3 apresentou maior perda de massa quando submetido à ação da mistura de ácidos (H_2SO_4 / HNO_3), em período de imersão de 30 dias.

Os dados encontrados indicam que os fácies com maior teor de minerais máficos apresentam menor resistência às soluções lixiviantes. Os valores de perda de massa do fácies 1 mostraram-se muito próximos entre si, quando submetidos às soluções lixiviantes dos ácidos sulfúrico, nítrico, e mistura de ácidos (rever Figura 4.11). Em relação ao ácido clorídrico, o valor de perda de massa foi a mais elevada, fato que sinaliza para uma maior susceptibilidade dos minerais constituintes deste fácies à ação deste ácido, fato que estaria em acordo com o elevado teor de feldspatos alcalinos presentes no Marrom Imperial.

As perdas de massa do fácies 1 foram mais significativas quando submetidos à ação isolada dos ácidos sulfúrico, nítrico e clorídrico. Esta constatação está associada à composição mineralógica deste fácies, que apresenta um maior teor de minerais máficos que o fácies 3, de forma a torná-lo mais susceptível à ação das soluções lixiviantes. Em contrapartida, o fácies 3 exibiu uma maior perda de massa quando submetido à ação da mistura de ácidos ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$) que, por sua vez apresenta uma maior capacidade oxidante, fato que estaria ligado ao maior poder de ação desta mistura, potencializando a ação dos respectivos ácidos, como mistura óxido-redutora. Esta, por sua vez, fornece um outro caminho de dissolução dos minerais através de processos de óxido-redução, que são mais ativos na presença de metais com baixo número de oxidação, além de potencializarem a possibilidade de formação de pilhas eletrolíticas. É provável que os maiores teores de feldspatos potássicos pertílicos no fácies 3, favoreçam a formação de processo de dissolução por óxido-redução (pilha eletrolítica) durante o ataque lixiviante de $\text{H}_2\text{SO}_4 / \text{HNO}_3$.

A constatação da preferência dos fácies 1 e 3 por determinados reagentes aponta para uma ação seletiva destes ante os reagentes, que pode estar associada às pequenas diferenças de composição mineralógica entre os mesmos.

4.5.1.3.2. Perdas de massa no período de imersão de 60 dias.

Em imersão na solução lixiviante de HNO_3 por 60 dias, o fácies 1 (feldspatos com auréola rosa clara a branca) mostrou-se como a menor perda de massa 0,020g (Figura 4.11; item 4.3.1.3), enquanto a maior (0,270 g) ocorreu sob ataque de solução lixiviante de HCl. Aliás, em um período de imersão de 60 dias, observam-se

processos de desagregação resultando, na prática, em variação de massa que, nestes casos, passam a ter significância.

O fácies 2 (feldspatos sem auréola) apresenta as maiores variações de massa quando submetido a ação das soluções ácidas. Os resultados sugerem que a presença de auréolas nos fácies 1 e 3 seja a causa responsável por esta menor perda de massa, uma vez que estes apresentam-se menos susceptíveis a ação deste ácido., que o fácies 2 O período de contato das soluções com os fácies também deve ser considerado pois maior tempo de contato eleva o teor de massa removido pela lixiviação, o que se pode constatar pela comparação dos teores de massa removidos nos períodos de 30 e 60 dias de imersão.

Mais uma vez, os dados sugerem que a ausência de auréola envolvendo os fenocristais de feldspatos e o maior teor de matriz contendo minerais máficos e opacos, apresentado pelo fácies 2, indica menor resistência deste a ação das soluções lixiviantes. Constata-se ainda que a maior variação de massa sofrida pelo em todo o processo, ocorreu no fácies 2 quando submetido à ação lixiviante da mistura de ácidos (H_2SO_4/HNO_3), para período de 60 dias de imersão e correspondeu a 1,06 g nesta também houve a presença do fenômeno de desagregação. (Figura 4.41)



Figura 4.41: Fácies 2 - 60 dias (imersão) mistura de ácidos

No tocante a ação do HCl sobre os fácies para este período de imersão de 60 dias, observa-se que este reagente atuou mais severamente sobre o fácies com maior teor de matriz onde estão presentes os minerais máficos e opacos (fácies 2). No entanto, todos os fácies exibiram neste reagente e neste tempo de imersão, perdas de massa consideráveis, o que esta associada a maior susceptibilidade dos feldspatos e feldspatóides a ação do HCl já anteriormente mencionado neste trabalho.

Associada a este fato, tem-se ainda, um tempo de imersão mais prolongado (60dias), o que proporciona um maior tempo de contato entre os minerais e a solução de HCl, e também a grande solubilidade em água apresentada pelos produtos da reação deste ácido com os minerais constituintes destes fácies, o que tornam a ação desta solução lixiviante, bastante significativa.

Outro fator de relevância seria a constatação de que as auréolas presentes nos fácies 1 e 3, não se apresentam espessura homogênea, fato concordante com a descrição petrográfica, de modo a possibilitar, em pontos distintos, a ação do HCl, que portanto pode romper, nestes pontos, a resistência desta barreira protetora dos fenocristais de feldspatos alcalinos potássicos, expondo-os finalmente a ação deste, ao ácido.

Portanto, o elevado teor de feldspatos alcalinos dos três fácies, associados a prolongados períodos de lixiviação e a elevada susceptibilidade destes minerais a ação deste ácido produzem significativa variação de massa, nos fácies ,notadamente, nos fácies 1 e 3 que exibem suas maiores variações de massa quando submetidos a esta solução lixiviante de HCl.

A exposição prolongada dos fácies deste sienito em ambientes costeiros onde há presença de HCl, se torna significativa, e efetiva, não se apresentaria como indicação adequada à sua aplicação como material de revestimento de exteriores, uma vez que o contato prolongado com este ácido leva os fácies a exibirem as maiores perdas de massa, que por sua vez podem vir a interferir na variação dos índices físicos do material.

4.5.1.4. Oxidabilidade por choque térmico.

O ensaio de choque térmico para avaliar a susceptibilidade da rocha à oxidação foi realizado sobre quatro corpos de prova de dimensões 5x5x2cm, de cada um dos fácies “comerciais” do sienito Marrom Imperial. Os corpos de prova de cada um dos fácies estudados foram submetidos a 25 ciclos de aquecimento e resfriamento.

As variações de massa apresentadas pelos fácies estudados, encontram-se na tabela 05 e na figura 4.42. A tabela 05 exhibe a média de valores de perdas de massa de quatro corpos de prova de cada uma das litologias estudadas, após o ensaio, e a figura 4.42 corresponde a variação de perda de massa exibida pelos fácies após os ensaios de oxidabilidade por choque térmico.

Tabela 4.5: Marrom Imperial - valores médios das massas iniciais e após ensaio de oxidabilidade, por choque térmico

	início	após os 25 ciclos	Diferença de massa
Fácies 1	139,184	139,1369	0,0471
Fácies 2	133,7728	133,6857	0,0871
Fácies 3	130,7387	130,6612	0,0775

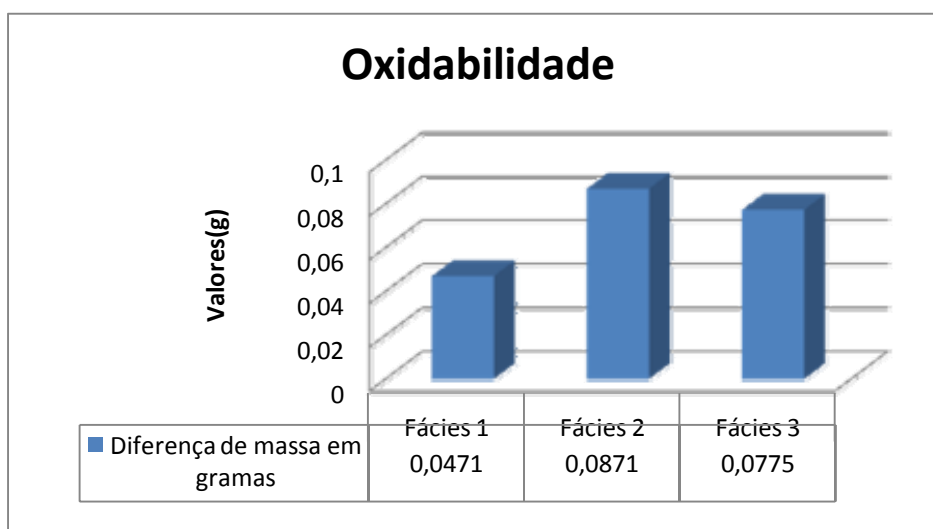
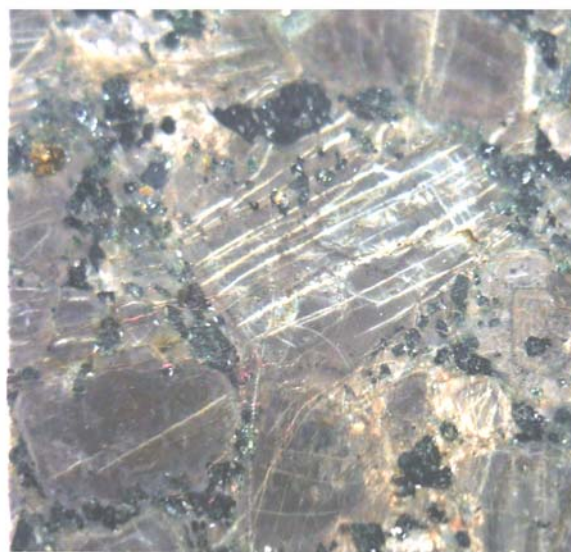


Figura 4.42 – Variação de massa exibida pelos fácies do Marrom Imperial

As condições impostas pelo ensaio sobre os corpos de prova não produziram efeitos degradativos visíveis a olho nu, embora se tenha percebido, mais facilmente em alguns pontos esparsos na superfície dos fâcies 1 e 3, manchas avermelhadas típicas de oxidação de minerais metálicos contendo ferro, indicadoras da presença de processos de óxido-redução (Figura 4.43)



ENSAIO OXIDABILIDADE POR CHOQUE TÉRMICO
MARROM IMPERIAL FÁCIES 1



ENSAIO OXIDABILIDADE POR CHOQUE TÉRMICO
MARROM IMPERIAL FÁCIES 2



ENSAIO OXIDABILIDADE POR CHOQUE TÉRMICO
MARROM IMPERIAL FÁCIES 3

Figura 4.43 Ensaio Oxidabilidade por choque térmico

Comparando-se as medidas de massa apresentadas pelos corpos de prova antes e após os ensaios de oxidabilidade por choque térmico, observa-se que todos os fácies exibiram perdas de massa, indicando assim que em todos eles ocorreram processos de óxido-redução. Tais fatos são concordantes com a mineralogia descrita para os fácies, nos quais são descritos minerais opacos, além da presença de minerais máficos, ambos possuidores de íons metálicos capazes de serem oxidados nas respectivas composições químicas.

Embora discretas, as variações de massa são significativas uma vez que evidenciam o comportamento distinto dos fácies investigados. O fácies 2 apresenta-se como aquele que exibiu a maior variação de massa após ensaio de oxidabilidade (0,0871g), fato condizente com o maior teor de opacos e de piroxênios que possui. O fácies 3 exibe a segunda maior variação de massa, fato que se deve provavelmente ao maior teor de piroxênio presente neste fácies quando comparado ao fácies 1.

Neste ensaio, se faz necessário analisar não só a presença de opacos mas também a de outros minerais que contenham íons metálicos fazendo parte de sua constituição química, como é o caso das biotitas, piroxênios e anfibólios. Estes minerais são oxidáveis após choque térmico.

CAPÍTULO V

5. Conclusões

A composição química dos fácies comerciais estudados colocam em evidência que estes correspondem a aspectos particularizados do fácies SEG definido por Guimarães & Silva F^o (1992), pois correspondem a uma lenta cristalização de um magma intrusivo, onde o predomínio de Si-Al-K gerou acentuada predominância de fenocristais de feldspatos do tipo K-F, com participação mais subordinada de feldspatos sódicos ($\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O}$: $r = 0,44$).

Verificou-se que a alterabilidade está diretamente associada a fatores como composição química, mineralógica, textural, porosidade e absorção d'água, assim como a existência ou não de auréola envolvendo os fenocristais feldspáticos, além do teor de matriz apresentada por cada um dos fácies, e também aos mecanismos de dissolução apresentados por cada solução lixiviante.

A composição química destes fácies comerciais é bastante semelhante entre si, embora existam diferenças na composição mineralógica e textural de cada um deles, conforme análise petrográfica.

A porosidade inicial não se mostrou como fator determinante em relação aos processos de alterabilidade, uma vez que o fácies que exibiu maior porosidade inicial apresentou menor susceptibilidade à ação das soluções lixiviantes (fácies 3)

O aumento de porosidade esteve diretamente associada ao tempo de imersão a que o fácies foi submetido, ao tipo de ácido constituinte da solução lixiviante, e aos mecanismos de dissolução desenvolvidos por este. As maiores variações de porosidade foram exibidas pelo fácies 2, nos períodos de imersão de 60 dias, onde as soluções lixiviantes foram respectivamente: ácido nítrico e mistura ácido sulfúrico/nítrico 2:1, constatando-se porosidades finais de 1,019 e 1,054%,

respectivamente. Nestes, os valores de porosidade exibidos ultrapassaram o limite recomendado por Frazão & Farjallat (1995), sugerindo portanto um processo de decaimento significativo quando submetido a contato mais prolongado com soluções lixiviantes de ácidos fortes.

Os valores de perda de massa nem sempre acompanharam o aumento de porosidade, visto que outros fatores lhe estão também associados, como tamanho do grão, localização onde o processo de desagregação se desenvolveu (se sobre a superfície ou se mais internamente no corpo de prova), além da distribuição, tamanho e contato entre estes espaços vazios. Além disto, podem ocorrer outros fatores como o preenchimento por minerais de maior ou menor facilidade de alteração, presença de minerais secundários em fendas e fraturas, além de maior solubilidade, em água, de produtos formados nas reações de dissolução.

Quanto à absorção d'água, o fácies 2 exibe a menor absorção de água inicial. No entanto, após os períodos de lixiviação, apresentou os maiores valores de absorção d'água, indicando não só aumento da sua porosidade mas também aumento significativo na conectividade de seus poros, esta desencadeada pela ação das soluções lixiviantes.

As determinações de brilho, antes e após os períodos de lixiviação, indicaram o fácies 3 como aquele de menores perdas de brilho, enquanto o fácies 2 exibe as maiores perdas de brilho após lixiviação. Isto em concordância com os demais parâmetros analisados nesta pesquisa.

Em termos de oxidabilidade o fácies 2 demonstrou ser o mais susceptível à ação de processos de decaimento provocados por períodos de molhagem e secagem, seguidos de resfriamento e aquecimento. Por outro lado, os ensaios de oxidabilidade também revelaram que o fácies 3 exibiu maior perda de massa que o fácies 1, o que indica maior susceptibilidade deste, com relação ao fácies 1, à oxidabilidade por choque térmico.

O fácies 3 também exibe perdas de massa superiores ao do fácies 1, quando lixiviado por soluções óxido-redutoras como ácido nítrico (HNO_3) e mistura de ácidos ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$). Tais observações sinalizam para uma maior susceptibilidade deste

fácies 3 a dissolução que se desenvolvam a partir de processos de que envolvam óxido-redução, como, por exemplo, o ataque de mistura ácidos ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$), e processos de oxidabilidade por choque térmico.

A ausência ou presença de auréolas envolvendo feldspatos, maior ou menor teor de matriz (e conseqüentemente de minerais máficos e opacos, presentes nesta), apresentaram-se como fatores determinantes para a maior susceptibilidade dos fácies aos processos de alterabilidade através de soluções lixiviantes. Portanto, o conjunto das observações indica que a composição química e mineralógica dos fácies estudados tornam-se os parâmetros determinantes da maior ou menor susceptibilidade aos processos de deterioração exibida pelos fácies comerciais do Marrom Imperial.

Os ensaios de alterabilidade acelerada propiciaram uma avaliação prévia dos processos de deterioração que podem afetar rochas ornamentais aplicadas em ambientes externos, como revestimentos ou elementos decorativos, onde a ação das modificações de composição química de nossa atmosfera, sobretudo induzidas por ação antrópica e névoa salina, se fazem mais atuantes. Além disto, os ensaios permitiram uma visualização mais abrangente do comportamento previsível para o material pétreo após sua aplicação, possibilitando assim uma melhor indicação para uma aplicabilidade mais correta deste, consideradas as suas características mineralógicas, texturais e químicas.

Os ensaios permitiram estabelecer uma ordem de susceptibilidade em relação à alterabilidade para os fácies “comerciais” do Marrom Imperial. O fácies 2 apresenta-se como o de maior susceptibilidade à alteração, seguido pelo fácies 1 e este pelo fácies 3, ou seja: $F2 > F1 > F3$. Assim, o fácies 3, com menor teor de matriz (conseqüentemente, de minerais máficos e de opacos) e auréola rosa escura no entorno de seus cristais de feldspato potássico, é aquele que apresenta menor susceptibilidade aos processos de alteração. No entanto, as perdas de massa exibida pelo fácies 3 para os ensaios de oxidabilidade e de imersão em soluções lixiviantes oxido-redutoras mostraram que o fácies 1 é mais resistente à óxido-redução que o fácies 3. (salvaguardados os casos em que ocorre óxido-redução, ou seja: $F2 > F3 > F1$).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES-BARROS L., 1991. Alteração e alterabilidade das rochas. Lisboa, *INIC*, 384p.
- AIRES-BARROS L., 2001. As rochas dos monumentos portugueses. Tipologia e patologias. Volume 1. Lisboa, *Instituto Português do Patrimônio Arquitetônico*, 590 p.
- ABNT, 1992. NBR 12768. Rochas para revestimento: análise petrográfica. Rio de Janeiro, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2 p.
- ABNT, 1992. NBR 12766 - Rochas para revestimento: determinação da massa específica aparente, porosidade e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2 p.
- ABNT, 1995. NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*, 2 p.
- ARTHUR A.C., MEYER A., WERNICK E., 2001. Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influencia da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e Implicações de utilização. Salvador, *CETEM*, *In Anais I Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais*, p. 13-19.
- BAINES J., 1993. Chuva ácida. São Paulo, *Ed. Scipione*, 48 p.
- BECERRA-BECERRA J. E., 2004. Alterabilidade de rochas com aplicação ornamental: procedimentos analíticos para avaliação. Belo Horizonte, *IGC-UFMG*, Diss. Mestrado em Geol. Econ. Aplic., 117 p.

- BECERRA-BECERRA J. E. & COSTA A. G., 2003. Procesos de alterabilidad em granitos ornamentales brasileños. Diagnósticos y técnicas de evaluación. Medellín, Colombia, *Soc. Colomb. Geol.*, In Memorias IX Congr. Colombiano Geología, p. 275-278.
- BECERRA-BECERRA J.E. & COSTA A.G, 2007. Ensaio de alteração acelerada para avaliação da durabilidade de seis granitos ornamentais brasileiros. *Geonomos*, **15(2)**: 33-42.
- BIRKELAND P. W., 1974. Pedology, weathering and geomorphological research. New York, *Oxford University Press*, 285 p.
- BAIRD C., 2005. Química ambiental. Porto Alegre, *Bookman Ed.*, 605 p. (2ª Ed.).
- DIONÍSIO A., AIRES-BARROS L., BASTO M. J., 2004. *A degradação das rochas do patrimônio cultural construído: o caso das rochas carbonatadas*. Lisboa, *boletim Soc. Portug. Química*, **93**: 61-68.
- DIONÍSIO A., AIRES-BARROS L., BASTO M.J., GRAÇA R., 1999. Deposição de aerossol marinho na área urbana de Lisboa - um factor determinante no decaimento geoquímico das rochas dos monumentos. Lisboa, *Proceed. 2º Congr. Ibérico Geoq.*, p. 157-160.
- LÓPEZ GONZÁLES-MESONES, F., 2002. La interpretación de los ensayos de caracterización de la piedra natural en el marco de la nueva normativa europea. Rio de Janeiro, *CETEM*, In Anais III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. (CD-Rom).
- BIRKELAND, P. W., 1974. Pedology, weathering and geomorfological research. New York, Oxford University Press, 285 p.
- FLAIN E. P., 2002. Processos de assentamento de rochas ornamentais. Recife, *CETEM*, In: Anais III Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 7 p.

- FRASCÁ M. H. B. O., 2003. Estudos Experimentais de alteração Acelerada em rochas graníticas para revestimento. São Paulo, *Escola Politécnica/USP*, Tese Doutorado, 218 p.
- FRAZÃO E. B. & PARAGUASSU A. B., 1998. Materiais rochosos para a construção. São Paulo, *Ass. Brasil. Geol. Engenharia*, In: *Geologia de Engenharia*, A.M.S. Oliveira & S.N.A. Brito (Org.), p. 331-342.
- GOMES C., VELHO J. E., ROMARIZ C., 1998. Minerais Industriais, Geologia, Propriedades, Aplicações, Especificações, Produções e Mercados. Coimbra, *Gráfica de Coimbra*.
- GUIMARÃES I. & SILVA FILHO A., 1992. Evolução Petrológica e Geoquímica do Complexo Bom Jardim, Pernambuco. São Paulo, *Rev. Brasil. Geoc.*, **22**: 29-42..
- GOLDICH S., 1938. A study in rock weathering. *Journal of Geology*, **46**: 17-58.
- LEINZ V. & AMARAL S. E., 1995. Geologia Geral. São Paulo, *Cia. Edit. Nacional*, 399 p. (12ª ed.).
- MARANHÃO F. L., 2002. Patologias em revestimentos aderentes com placas de rocha. São Paulo, *Escola Politécnica USP*, Diss. Mestrado, 165 p.
- MELO E. B. & OLIVEIRA F. M .C., 2005. Pesquisa Geológica de detalhes em jazidas de rochas ornamentais. Recife, *Soc. Brasil. Geologia*, In V Simp. Rochas Ornamentais Nordeste, p. 230-243.
- OLGYAY V., 1998. Arquitetura y clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona, *Ed. Barcelona*, 203 p.
- OLLIER C. W., 1984. Weathering. New York, *Longman Ed.*, 270 p. (2th Ed.).

- OLIVEIRA A. M. S. & BRITO S. N. A.(ed), 1998. Geologia de Engenharia. São Paulo, *Associação Brasileira de Geologia de Engenharia / ABGE*, 573 p.
- PETRUCCI E. G. R , 1998. Materiais de Construção. São Paulo, *Ed. Globo*, 435 p. (11^a ed.).
- ROLIM FILHO J. L., SOUZA J. C., BARBOSA B. L., BARROS M. C., OLIVEIRA F. M. C., 2002. Avaliação dos procedimentos de ensaios para caracterização de rochas ornamentais. Recife, *Soc. Brasil. Geol.*, In III Simp. Rochas Ornamentais Nordeste, p. 79-83.
- ROLIM FILHO J. L., SOUZA J. C., BARBOSA B. L., BARROS M. L. C., OLIVEIRA F. M. C., 2005. Ensaio tecnológicos para aplicação de rochas ornamentais. Recife, *Soc. Brasil. Geol.*, In V Simp. Rochas ornamentais Nordeste, p. 218-224.
- SALES F. A. C. B. & MORAIS J. O., 2002. Proposta Metodológica de Pesquisa para rochas ornamentais. In:Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste. Recife, *CETEM*, p. 2-12.
- SILVA M. E., 2007. Avaliação da Susceptibilidade de Rochas Ornamentais e de Revestimentos à Deterioração – Um enfoque a partir do estudo em monumentos do Barroco Mineiro. Belo Horizonte, *UFMG*, Tese Dout., 180 p.
- SILVA S. A., 2008. Estado da arte na alterabilidade de placas pétreas: estudo de casos na região litorânea do Recife – PE. Recife, *UFPE/PPGEM*, Diss. Mestrado, 215 p.
- SIMON C. & DEFRIES R. S., 1992. Uma terra, um futuro; o impacto das mudanças ambientais na atmosfera, terra e água. São Paulo, *Makron Books*, 120 p.
- SZABÓ G. A. J., BABINSKI M., TEXEIRA W., 2000. Rochas Ígneas. São Paulo, *São Paulo Ed.*, In Decifrando a Terra; W. Texeira , M.CM. Toledo, T.R. Fairchild, F. Taioli, (Orgs.), p. 327-346.

- THOMAS E., 1999. Trincas em edifícios, causas, prevenção e recuperação. São Paulo, *Ed. Pini*, 194 p.
- TOLEDO M. C. M, OLIVEIRA S. M. B., MELFI A. J., 2000. Intemperismo e formação do solo. São Paulo, *São Paulo Ed.*, In Decifrando a Terra; W. Texeira, M.CM. Toledo, T.R. Fairchild, F. Taioli (Orgs.), p. 139-166.
- VARGAS T., MOTOKI A., NEVES J. L. P., 2001. Rochas ornamentais do Brasil, seu modo de ocorrência geológica, variedade tipológica, exploração comercial e utilidades como materiais nobres de construção. Niterói, *UFF/Inst. Geoc.*, Revista de Geociências, **2(2)**: 119-132.
- VICENTE M.A., DELGADO-RODRIGUES J., ACEVEDO J.(Ed.), 1996. Degradation and conservation of granitic rocks in monuments. Brussels, *European Commission*, Protection and Conservation of the European Cultural Heritage – Research Report Nr. 5, 471 p.
- VIDAL F. W. H., 1995. A indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará. São Paulo, *Escola Politécnica USP*, Diss. Mestrado, 178 p.