

REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

"Análise da Integridade Estrutural do Quartzito Itacolomi Colado com Diferentes Resinas"



Autor: José Henrique Neves
Orientador: Prof. Luiz Cláudio Cândido



Junho de 2006



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

José Henrique Neves

"Análise da Integridade Estrutural do Quartzito Itacolomi Colado com Diferentes Resinas"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais
Orientador: Prof. Luiz Cláudio Cândido

Ouro Preto/MG
Junho de 2006

Aos meus saudosos pais José Benedito Neves e
Doracy “Dora”, que não se encontram mais aqui.

Ao sempre Mestre Canteiro José Raimundo Pereira “seu Juca da Cantaria”.

(In Memoriam)

Lentamente a pedra de cantaria adquire a forma imposta com carinho pelas mãos do artista. Obra pronta, já não divide semelhança com a matéria-bruta extraída à força da natureza. Participa de um mundo novo. É a arte.

(Adaptado-Autor desconhecido)

Agradecimentos

À “Ju” pelo amor, dedicação, carinho, incentivo e, pela sua sensatez ao conduzir as conversas nos momentos mais difíceis, enfim, pelo apoio incondicional.

Ao professor Luiz Cláudio Cândido, meu orientador, pela atenção, paciência e abertura na condução dos diálogos em todos os momentos de dúvidas e angústia. Agradeço também pela amizade, entusiasmo, e o incentivo para execução desse trabalho.

Ao professor Leonardo Barbosa Godefroid, meu co-orientador, pela dedicação com a qual acompanhou, passo a passo, todo o decorrer dos experimentos no laboratório, intervindo sempre de maneira positiva, quando necessário ao bom andamento.

Ao professor Vagner Roberto Botaro, meu co-orientador, por ter contribuído com indagações que geraram o acréscimo de informações e de ter sido sempre prestativo mesmo antes de iniciar-se a pesquisa.

Ao pesquisador Jefferson José Vilela, pela presteza em participar desta banca.

À professora Maria da Glória dos Santos Laia, Diretora do CEFET/OP, pelo empenho em viabilizar o acesso ao material e aos laboratórios do DEGEO/UFOP.

Ao professor Rodrigo Vicente Toffolo, meu colega e amigo que muito me incentivou e contribuiu para o êxito deste trabalho.

Ao professor José Carlos Sales Campos pelo auxílio na descrição das lâminas.

A todos os professores da UFOP, do CEFET/OP e da REDEMAT que de maneira direta ou indireta contribuíram para a execução desse trabalho. Em especial à:

César Ferreira Mendonça, Eduardo Magela Rodrigues da Silva, Fernando Flexa Alkimim, Jorge Luiz Humberto, Júlio César Mendes, Kátia Monteiro Novack, Lorene Dutra Moreira e Ferreira, Luiz Roque Ferreira, Maria Célia da Silva Lanna, Maria José Ibrahim de Oliveira e Mauricio Carneiro.

Agradeço também aos funcionários da UFOP, CEFET e REDEMAT. Em especial à:

César Augusto Fernandes, Herculano Santos, Leandro Martins, Luis Carlos Santiago Lopes, Mario Veisack, Reginaldo L. Pazzi de Jesus, Sérgio Alfenas de Oliveira, Sidney Cardoso de Araújo e Vicente de Paulo da Costa Reis.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Índice | vii |
| Lista de Figuras | ix |
| Lista de Tabelas | xii |
| Lista de Notações e Siglas | xiii |
| Resumo | xiv |
| Abstract | xv |
| 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 – OBJETIVOS | 3 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 – Caracterização de um Quartzito | 4 |
| 3.2 – A Conservação da Pedra | 6 |
| 3.2.1 – Métodos de eliminação de sais solúveis | 8 |
| 3.2.2 – Proteção contra ataque biológico | 9 |
| 3.3 – Critérios para Seleção de uma Pedra | 11 |
| 3.3.1 – Métodos empregados para identificação das rochas | 12 |
| 3.4 – Fatores Físico-Químicos que Alteram uma Pedra | 13 |
| 3.4.1 – Terminologias para a descrição de alterações macroscópicas dos materiais pétreos | 14 |
| 3.4.2 – Mecanismos de deterioração das rochas | 17 |
| 3.5 – Restauração de uma Pedra | 18 |
| 3.5.1 – Consolidação de materiais pétreos | 18 |
| 3.5.2 – Reparação de objetos de pedra | 19 |
| 3.5.3 – Limpeza | 21 |
| 3.6 – Resina | 22 |
| 3.6.1 – Resina poliéster | 23 |
| 3.6.2 – Resina poliéster insaturada | 24 |
| 3.6.3 – Resina epoxídica | 26 |
| 3.6.4 – Diferenças entre resinas epóxis e resinas poliésteres | 28 |
| 3.7 – Ensaio Mecânicos | 28 |
| 3.7.1 – Ensaio de resistência à flexão | 28 |
| 3.7.2 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial | 29 |
| 3.7.3 – Ensaio da resistência ao impacto | 30 |

| | |
|---|----|
| 3.8 – Microscopia Ótica----- | 30 |
| 3.8.1 – Descrição de uma lâmina----- | 31 |
| 3.9 – Análise Térmica----- | 32 |
| 3.10 – Espectroscopia na região do Infravermelho----- | 34 |
| 4 – MATERIAIS E MÉTODOS----- | 36 |
| 4.1 – Materiais----- | 36 |
| 4.1.1 – Descrição da lâmina do quartzito----- | 36 |
| 4.1.2 – Preparação de corpos-de-prova----- | 39 |
| 4.1.3 – Seleção de amostras para a análise térmica----- | 41 |
| 4.2 – Métodos----- | 43 |
| 4.2.1 – Ensaio de resistência à flexão----- | 44 |
| 4.2.2 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial----- | 45 |
| 4.2.3 – Ensaio de resistência ao impacto----- | 47 |
| 4.2.4 – Análise térmica----- | 47 |
| 4.2.5 – Análise da espectroscopia de infravermelho----- | 47 |
| 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO----- | 48 |
| 5.1 – Ensaios de Resistência em Flexão com Resina Ortoftálica----- | 48 |
| 5.2 – Ensaios de Resistência em Flexão com resina Isoftálica e Epóxi----- | 53 |
| 5.3 – Ensaios de Resistência à Compressão Uniaxial----- | 56 |
| 5.4 – Ensaios de Resistência ao Impacto do Corpo Duro----- | 57 |
| 5.5 – Análise de Espectroscopia na Região do Infravermelho----- | 58 |
| 5.6 – Análises Termogravimétricas----- | 60 |
| 6 – CONCLUSÕES----- | 63 |
| 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS----- | 64 |
| 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ----- | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura 3.1 – | Obra em quartzito itacolomi produzida por Neves (2001)----- | 6 |
| Figura 3.2 – | Presença de Plantas no “Chafariz de Marília” – Ouro Preto/MG----- | 10 |
| Figura 3.3 – | Fotografias de Regiões degradadas da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias, Ouro Preto/MG, (a) e (b) próteses de cimento na ombreira de janelas,. (c) trinca proveniente da dilatação da barra metálica incrustada na verga de quartzito numa janela----- | 19 |
| Figura 3.4 – | Reação de um poliéster insaturado com um monômero de estireno (Silaex, 2004)----- | 24 |
| Figura 3.5 – | Fórmula de uma resina poliéster ortoftálica (Silaex, poliéster, 2004)----- | 26 |
| Figura 3.6 – | Fórmula de uma resina poliéster isoftálica (Silaex, poliéster, 2004)----- | 26 |
| Figura 3.7 – | Fórmulas de alguns grupos epóxicos (Silaex, epóxi, 2004)----- | 27 |
| Figura 3.8 – | Representação esquemática de um digrama simplificado de um instrumento dispersivo de espectroscopia de infravermelho (Polibrasil, 2005)----- | 35 |
| Figura 4.1 – | Representação esquemática da seqüência da retirada de lâminas em CPs, para análises microscópicas: (a) CP(1) para ensaios de flexão e (b) CP(2) para os de compressão----- | 37 |
| Figura 4.2 – | Fotomicrografias de lâminas de um quartzito itacolomi; lâmina 1A; (a) ligação de grãos com cimento (sericita); (b) destaca-se o contato retilíneo dos grãos; polarização cruzada; 10X----- | 37 |
| Figura 4.3 – | Fotomicrografias de lâminas de um quartzito itacolomi; (a) lâmina 1B - materiais opacos; polarização descruzada; 10X; (b) lâmina 2A - contraste realçando o fenômeno de extinção ondulante em cristais de quartzo (placa λ); 5X----- | 38 |
| Figura 4.4 – | Preparação da rocha para corte de corpos-de-prova----- | 39 |
| Figura 4.5 – | Obtenção de material para confecção de CPs, em 1 ^o plano, porção que foi desprezada; em 2 ^o plano: porção que deu origem aos CPs----- | 39 |
| Figura 4.6 – | CP prismático para ensaios de flexão com as dimensões (20x10x5)cm, Norma (NBR12763, 1992)----- | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.7 – CP para ensaio de compressão uniaxial; dimensões cúbicas de 7cm; Norma NBR12767 (1992)----- | 41 |
| Figura 4.8 – CP para ensaio de impacto de corpo duro; dimensões de (20x20x3)cm; Norma NBR12764 (1992)----- | 41 |
| Figura 4.9 – Rocha em estado bruto (Pocinho/Ouro Preto/MG); vestígios de que os blocos foram parcialmente trabalhados----- | 43 |
| Figura 4.10 – Local de origem da rocha usada para confecção dos CPs----- | 44 |
| Figura 4.11 – Cilindros usados no dispositivo dos ensaios em flexão----- | 44 |
| Figura 4.12 – Adaptação do dispositivo usado para os ensaios de flexão (a); detalhe do dispositivo e aplicação da carga inicial (b)----- | 45 |
| Figura 4.13 – Ajuste de prato no ensaio de compressão (a); controle do tempo (b)----- | 46 |
| Figura 4.14 – CPs rompidos em ensaios de compressão; (a) CP ₁ ; (b) CP ₂ e (c) CP ₄ ----- | 46 |
| Figura 4.15 – Equipamento para ensaios de impacto com esfera (seta)----- | 47 |
| Figura 5.1 – Gráfico carga x deslocamento para CPs de quartzito itacolomi em ensaios de flexão; sem colar----- | 48 |
| Figura 5.2 – CP ₁ (a) e CP ₅ (b) rompidos fora da região colada com a resina no ensaio de flexão----- | 49 |
| Figura 5.3 – Gráfico carga x deslocamento para CPs de quartzito itacolomi, colados com resina ortoftálica, em ensaios de flexão----- | 50 |
| Figura 5.4 – Gráfico comparativo dos valores das cargas de ruptura para os CPs de quartzito, sem colar e colado com resina ortoftálica, em ensaios de flexão-- | 50 |
| Figura 5.5 – CPs rompidos após colados com a resina poliéster ortoftálica: (a) e (c) rompimento a 30° em relação ao plano da superfície; (b) e (d) rompimento a 45° em relação ao deslocamento do cutelo----- | 51 |
| Figura 5.6 – Gráfico comparativo de deslocamento do cutelo em CPs de quartzito sem colar e colado em ensaios de flexão----- | 52 |
| Figura 5.7 – Gráfico comparativo de tempo de ruptura para CPs de quartzito sem colar e colado em ensaios de flexão----- | 52 |
| Figura 5.8 – Gráfico da carga x deslocamento para CPs de quartzito sem colar em ensaios de flexão----- | 54 |
| Figura 5.9 – Curvas carga x deslocamento para CPs de quartzito após colados com resina poliéster isoftálica e epóxi, em ensaio de flexão----- | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.10 – Gráfico comparativo dos valores das cargas de ruptura dos CPs de quartzito sem estar colados e depois de colados com resina poliéster isoftálica e epóxi----- | 55 |
| Figura 5.11 – Gráfico de carga para colapso de CPs de quartzito em ensaio de compressão----- | 56 |
| Figura 5.12 – Altura da esfera para surgir a primeira trinca nos CPs em ensaio de impacto----- | 57 |
| Figura 5.13 – Fotografia do CP ₈ após ensaio de impacto de corpo duro; destacam-se trincas----- | 58 |
| Figura 5.14 – Resultados da espectroscopia na região do infravermelho. Transmitância no infravermelho de amostras, de resina poliéster ortoftálica, selecionadas entre 1989 e 2005. Legenda, páginas 41 e 42----- | 59 |
| Figura 5.15 – Análise térmica das amostras de resinas poliéster ortoftálicas selecionadas no período de 1989 a 2005. Legenda, páginas 41 e 42----- | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------------|--|----|
| Tabela III.1 – | Composição mineralógica macroscópica do quartzito itacolomi em % volumétrica (Ferreira, 1991)----- | 05 |
| Tabela III.2 – | Composição mineralógica microscópica do quartzito itacolomi em % volumétrica (Ferreira, 1991)----- | 05 |
| Tabela III.3 – | Ácidos e glicóis usados na fabricação de resina poliéster (Hollaway, 1994)----- | 23 |
| Tabela III.4 – | Características de algumas resinas (Silaex, poliéster 2004)----- | 25 |
| Tabela III.5 – | Propriedades da resina Epóxi CMR-029 (Casa das Resinas, 2005)----- | 27 |
| Tabela III.6 – | Comparação de propriedades de resinas segundo Brent Strong (Kotasek, 2003)----- | 28 |
| Tabela IV.1 – | Composição mineralógica observada microscopicamente em %volumétrica----- | 38 |
| Tabela IV.2 – | Densidade dos CPs usados nos ensaios em flexão----- | 38 |
| Tabela V.1 – | Valores obtidos dos ensaios em flexão do quartzito sem estar colado----- | 48 |
| Tabela V.2 – | Valores obtidos dos ensaios em flexão dos CPs de quartzito colados com resina ortoftálica ----- | 49 |
| Tabela V.3 – | Valores dos tempos obtidos para a ruptura dos CPs de quartzito----- | 52 |
| Tabela V.4 – | Valores obtidos dos ensaios em flexão de CPs de quartzito sem colar----- | 53 |
| Tabela V.5 – | Valores obtidos dos ensaios em flexão dos CPs de quartzito colados com as resinas poliéster isoftálica e epóxi----- | 54 |
| Tabela V.6 – | Localização dos CPs para ensaios em flexão, na placa A da rocha----- | 55 |
| Tabela V.7 – | Composição mineralógica em %volumétrica observada microscopicamente (Campos e Neves, 2005)----- | 55 |
| Tabela V.8 – | Valores obtidos dos ensaios em compressão dos CPs de quartzito----- | 56 |
| Tabela V.9 – | Localização dos CPs para ensaios em compressão, na placa E da rocha--- | 56 |
| Tabela V.10 – | Localização dos CPs para ensaios de impacto de corpo duro nas placas B,C e D, no bloco de rocha----- | 57 |
| Tabela V.11 – | Valores das alturas da esfera obtidos nos ensaios de impacto----- | 57 |
| Tabela V.12 – | Principais bandas de transmitância presentes em todas as amostras de resinas na região do infravermelho através de espectroscopia (Silverstein, 2000)----- | 58 |
| Tabela V.13 – | Evolução da banda de carbonila com o tempo de exposição da resina poliéster ortoftálica PA-154 à ação das intempéries----- | 59 |

LISTA DE NOTAÇÕES E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – *American Society for Testings and Materials*
CEFET – Centro Federal de Ensino Tecnológico
DECIV – Departamento de Engenharia Civil
DEGEO – Departamento de Engenharia Geológica
DEMET – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
DEQUI – Departamento de Química
FAOP – Fundação de Arte de Ouro Preto
ICEB – Instituto de Ciências Físicas e Biológicas
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MIOP – Museu da Inconfidência de Ouro Preto
UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto
- CP – Corpo-de-prova
CPs – Corpos-de-prova
CTG – Curva Termogravimétrica
DTA – Análise Térmica Diferencial
DTG – Curva Termogravimétrica Derivativa
EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy* (espectroscopia por energia dispersiva)
EEW – *Equivalent Epoxy Weight* (Peso equivalente em epóxi)
ERIV – Espectroscopia na Região do Infravermelho
FTIR – Infravermelho com Transformada de Fourier
IQT – Índice de Qualidade Tecnológica
IV – Infravermelho
NPG – Neo Pentil Glicol
TG – Termogravimétrica
UV – Ultravioleta
- A – Área da base do CP [cm²]
b – Largura do CP [cm]
d – Altura do CP [cm]
D – Diâmetro do cilindro [cm]
F – Carga [N]
L – Distância entre as duas linhas extremas traçadas no CP [cm]
P – Carga máxima de ruptura [kN]
W – Espessura do CP [cm]
 ρ – Viscosidade [cPs]
 σ – Tensão [MPa]

RESUMO

Os monumentos da cidade de Ouro Preto/MG foram construídos no período que alcança meados do século XVIII e alguns dos monumentos, encontram-se, atualmente, em avançado grau de deterioração. Algumas estruturas foram recuperadas, de maneira empírica, empregando-se geralmente resina poliéster ortoftálica. Assim, com o objetivo de prover conhecimento científico aos pesquisadores, restauradores que utilizam peças em pedra de cantaria e artesãos que usam a pedra em suas esculturas, foram efetuados nesse trabalho ensaios de resistência à flexão no quartzito itacolomi com e sem cola, empregando-se diferentes tipos de resinas, empregadas na indústria de rochas ornamentais para aumentar sua resistência ao ataque de substâncias químicas, sua resistência mecânica e ou agregar valores ao produto, tais como cor, brilho e facilidade de limpeza. Nos ensaios verificou-se que o rompimento ocorreu geralmente paralelo ao plano de colagem. No entanto, para os corpos-de-prova utilizados em ensaios de resistência à compressão uniaxial e de resistência de corpo duro foram realizados apenas em condições sem colagem, em decorrência de que, no primeiro caso, ocorreu colapso do material e para o segundo caso notou-se progressão de trincas sem implicar no rompimento de corpos-de-prova. Ainda, efetuaram-se análise térmica e a espectroscopia de infravermelho para acompanhar a degradação de uma resina ortoftálica no período de 1989 a 2005.

ABSTRACT

The monuments of Ouro Preto were built in the middle of the 18th century and they are now in an advanced stage of deterioration. Some structures were empirically recovered employing a kind of orthophthalic resin. Then, with the purpose of providing scientific knowledge to restores and researchers that use peaces in stone of *cantaria* and artisans that use the stone in their sculptures, it was done resistance's tests in flexion of quartzite *itacolomi* with and without glue, employing different types of resins. These resins are employed in ornamental industry to increase its resistance to the attack of chemical substances, to test its mechanic resistance and/or its capacity to accrete values to the product, such as color, bright and facility to clean. During the tests, it was observed that the breakage occurred generally in the central region and parallel to the glue's plane. Nevertheless, the tests of resistance to uniaxial compression and resistance to the impact of the hard body were done only with the specimen without glueyness, due to the consequences to the material. In the first case, occurred the total collapse of the specimen and, in the second case, it was observed the progression of cracks without the breakage of the specimen. Besides, it was done a thermic analysis and infrared spectroscopy to accompany the degradation of an orthophthalic resin in the period of 1989–2005.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.

1 – INTRODUÇÃO

A história do homem está intimamente ligada à história da pedra. Assim, também a história de Ouro Preto/MG está ligada a um pequeno pedregulho que ao ser analisado constatou-se tratar de ouro de alta pureza. A partir daí a ambição traçou a história dessa cidade que se tornou a maior cidade da América Latina por volta de 1750 (Linguanoto, 1972). O ouro gerou riqueza e esta gerou belíssimas construções rococós e barrocas através das mãos de habilidosos artesãos portugueses, além da miscigenação de seus descendentes com os mais diversos povos que contribuíram para a construção de nosso país. A Prefeitura de Ouro Preto, sensibilizada com o acervo existente nessa cidade, em 1931, proibiu construções que alterassem o aspecto colonial da cidade. A mudança da capital para Belo Horizonte, em 1897, também contribuiu para a sua preservação, pois a cidade ficou praticamente abandonada o que propiciou a inalterabilidade da cidade por vários anos. Ouro Preto permanece, praticamente, com a mesma estrutura que possuía no século XVIII.

Quando o povo brasileiro tomou consciência do valor artístico e cultural dessa cidade iniciou-se então o movimento de preservação. Embora o quartzito itacolomi (itacolomito) não se encaixe industrialmente como rocha ornamental na atualidade, ele foi usado como elemento na construção estrutural e ornamental de prédios civis, religiosos e governamentais. Para a restauração de objetos de pedra tem-se usado uma quantidade enorme de materiais orgânicos (cera de abelha, goma laca, etc), inorgânicos, cimento (*Portland*), materiais poliméricos (polimetacrilato de metila, poliésteres, époxis, etc.).

Em 1698, foi encontrado ouro na região dos Cataguas (Antonil, 1982), a Vila prosperava e foi elevada a cidade em 1711. Junto ao progresso, construções mais sólidas e mais modernas foram surgindo. A “pedra” passou a ser selecionada, cada uma para um uso específico: paredões, muros e paredes com canga e quartzito foliado; calçamentos e passeios de pedra rolada e quartzito foliado; acabamentos e trabalhos mais finos: quartzito itacolomi e o esteatito (algumas caíram em desuso como o itabirito e o filito) (Coelho, 1993).

O ofício da cantaria é um dos mais antigos do mundo. A cantaria é a arte de trabalhar a pedra para construção. Na história das grandes civilizações, existem construções de palácios, igrejas, pontes, muralhas todas feitas na arte de cantaria. A importância dos trabalhos de cantaria é observada nas igrejas e nas grandes catedrais européias. Hoje em dia, um outro setor, além da construção civil e o de ornamentações, que vem utilizando a cantaria é a criação de peças para decorações, como por exemplo, uma fonte ou uma carranca.

As cidades de Ouro Preto e Mariana/MG possuem uma arquitetura barroca rica de detalhes e elementos estruturais construídos em cantaria e, também, Congonhas/MG, com o conjunto dos 12 profetas esculpidos em pedra sabão por Aleijadinho. Com o passar dos anos, algumas obras e monumentos, castigados pela ação do tempo e de líquens, vêm sofrendo degradações como: desgaste, alterações físicas e químicas pela ação da natureza e pela ação do homem.

Os artesãos atuais usam, de maneira empírica, em seus trabalhos resinas poliéster, epóxi e acrílica para fazer a união de várias peças que compõem a sua escultura. Alguns restauradores perceberam essa possibilidade e iniciaram o uso dessas resinas em restauração dos monumentos em cantaria.

Para prover os restauradores, escultores e pesquisadores de dados científicos sobre o quartzito itacolomi usado na arte da cantaria empregado pelos construtores, mestres e oficiais portugueses nos monumentos históricos de Ouro Preto, procurou-se desenvolver nesse trabalho uma metodologia para a caracterização petrográfica e a análise comportamental desse quartzito. Efetuaram-se ensaios de resistência em flexão com o quartzito com e sem cola. Para a colagem, foram selecionadas três diferentes resinas que são empregadas na indústria de rocha ornamental, a fim de aumentar sua resistência mecânica, aumentar a sua resistência a produtos químicos e agregar valores ao produto, tais como brilho, cor e facilidade para limpeza. Efetuou-se ainda a análise térmica e de espectroscopia de infravermelho para acompanhar a deterioração da resina com o decorrer do tempo, no período de 1989 a 2005.

2 – OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivos:

- ◆ Caracterizar mineralogicamente o quartzito do tipo itacolomi para prever o comportamento quando utilizado como rocha ornamental;
- ◆ Caracterizar resinas poliésteres e epoxídicas para auxiliar os diversos profissionais envolvidos na restauração do quartzito, usado como elemento de construção e ornamentação, dando-lhes subsídios para melhor utilização na colagem dessa rocha;
- ◆ Estudar o comportamento mecânico de corpos-de-prova de quartzito, colados e não colados, com diferentes resinas após serem submetidos a ensaios de determinação de resistência em flexão;
- ◆ Determinação da resistência à compressão uniaxial em CPs de quartzito itacolomi;
- ◆ Determinação da resistência ao impacto em CPs de quartzito itacolomi;
- ◆ Realizar ensaios de análise térmica e de espectroscopia na região do infravermelho para acompanhar o estágio de deterioração em que se encontram as amostras selecionadas de quartzito itacolomi com o decorrer do tempo.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma breve revisão bibliográfica será desenvolvida sobre os temas necessários ao entendimento desse trabalho, iniciando pela caracterização de um quartzito, conservação da pedra, critérios usados para a sua seleção, até chegar na restauração e finalmente caracterizar os materiais através de ensaios laboratoriais.

3.1 – Caracterização de um Quartzito

Os quartzitos são rochas metamórficas constituídas essencialmente por quartzo (superior a 80%) e geralmente resultam do metamorfismo sofrido por certos arenitos e de sua transformação química, na qual o cimento que ligava os grãos de areia se cristalizou (Soares Filho, 1990). Os contornos de grãos se entrelaçam, conferindo à rocha uma grande resistência mecânica. Elas são pouco porosas, resistentes, apresentam textura porfiroblástica (proveniente da origem da sedimentação) e geram solos muito arenosos. Uma de suas variações, o itacolomi, é constituído por quartzo e sericita, apresentando uma composição química muito variada.

O quartzito do tipo laje também é comercialmente classificado como pedra Ouro Preto, pedra São Tomé, pedra Pirenópolis, etc., dependendo do local de onde o mesmo é retirado. Essa rocha é explorada em camadas (folhas ou chapas) devido à sua formação geológica. Normalmente, ela é usada em construções de muros, “passeios”, meios-fios, bases de casas, pisos, entre outras aplicações.

Os quartzitos resultam do metamorfismo dos arenitos, sendo por isso também denominados arenitos metamórficos. Existem em Minas Gerais dois tipos de quartzitos: o itabirito e o itacolomito (Cavalcanti, 1951).

O quartzito Itacolomi, por sua característica geológica de não soltar placas e ser formado por grãos que se soltavam, à medida que era trabalhado manualmente por um picão¹, foi usado em monumentos construídos nas cidades históricas, principalmente em Ouro Preto/MG, onde o ouro gerava muita riqueza no século XVIII. O quartzito, depois de ser apicoado², isto é, esculpido pelos artesãos, era usado nas construções para ornamentar prédios

¹ **picão**: ferramenta do tipo picareta manual.

² **apicoar**: consiste na quebra da camada superficial da rocha para esculpi-la, torná-la antiderrapante ou com aparência de rusticidade, através do emprego de ferramentas manuais(picão) ou elétrica (Moreira,2003).

religiosos, civis e públicos, substituindo o mármore usado na Europa (algumas peças de mármore chegaram a ser talhadas na Europa, principalmente em Portugal, e foram trazidas e vendidas aos brasileiros por altíssimos preços, para empregá-las nas mais diversas obras, que se tornavam imponentes, como, por exemplo, a Igreja de Nossa Senhora da Conceição da Praia/ Ba: foi usado na sua construção mármore de Portugal).

O itacolomito é um quartzito micáceo, formado de grãos de quartzo ligados por um cimento de mica (sericita), produzido pela alteração de vários aluminossilicatos; é ocasionalmente flexível em alto grau, em virtude da lixiviação parcial da mica, permitindo o entrosamento dos cristais, como se fossem articulados entre si. Também conhecido como *quartzito flexível do Brasil*, tem a origem do seu nome ligada ao Pico do Itacolomi situado na Serra do Itacolomi, onde ocorre (Villela, 2003).

A descrição microscópica foi feita através de lâminas delgadas impregnadas com resina colorida, e de seções polidas. Na Tabela III.1, apresenta-se a composição mineralógica observada macroscopicamente das amostras (A, B, C, D, E), retiradas da encosta NW da Serra do Itacolomi, próximo ao local chamado “Geladeira” e usadas nos ensaios para caracterizar os respectivos tipos litológicos utilizados na construção dos monumentos históricos de Ouro Preto, os respectivos tipos de degradação e sua evolução. Na Tabela III.2, apresenta-se a composição mineralógica volumétrica observada microscopicamente das amostras citadas anteriormente (Ferreira, 1991).

Tabela III.1 – Composição mineralógica macroscópica do quartzito itacolomi em % volumétrica (Ferreira, 1991).

| Quartzo | Sericita | Limonita | Porosidade |
|---------|----------|----------|------------|
| 76 a 96 | 3 a 46 | 0 a 1 | 1 a 8 |

Tabela III.2 – Composição mineralógica microscópica do quartzito itacolomi em% volumétrica (Ferreira, 1991).

| Composição/amostra | A | C | B | D | E |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| Quartzo | 63,0 | 78,0 | 53,0 | 71,0 | 95,0 |
| Sericita | 32,0 | 17,0 | 41,0 | 18,5 | 3,0 |
| Limonita | 0,3 | - | - | - | 0,5 |
| Opacos ^(*) | 3,0 | 2,6 | 1,4 | 1,3 | 0,5 |
| Porosidade | 1,7 | 2,4 | 4,6 | 9,2 | 1,0 |

^(*) Os minerais opacos nos quartzitos, geralmente são a hematita ou a magnetita.

3.2 – A Conservação da Pedra³

A história é transmitida de geração a geração através dos séculos pelo estudo de monumentos históricos. Toda a cultura neles representada, por mais distantes que estejam do nosso tempo, mantem-se como referência e acompanha os diversos momentos da existência humana.

Reis (2005) cita Fernando Pedro, que propõe o conceito de arte pública analisada de forma ampla, da instalação de monumentos em praças públicas, passando pela realização de desempenhos , à revitalização de espaços degradados (inclusive monumentos). Trata ainda do tema em relação à apropriação ecológica, bem como à intervenção em espaços públicos em diálogo com as comunidades.

A discussão não é recente: tem-se dado mundialmente desde os anos 70, do século passado. Nos Estados Unidos, a arte pública passou por um amplo debate nos anos 80. Toda essa discussão, juntamente com uma maior gama de recursos de financiamento da obra de arte, fez, segundo Fernando Pedro, com que esse tipo de manifestação surgisse com maior importância nos últimos anos.

No Brasil, o debate de arte pública ganhou destaque nos anos 90 com o projeto Arte Cidade, pois se constata que, ao deixar de lado o seu referencial histórico e a memória, os habitantes de uma cidade ou região podem perder a sua identidade e auto-estima (Reis, 2005).



Figura 3.1 – Obra em quartzito itacolomi produzida por Neves (2001).

Atualmente as esculturas presentes nos logradouros públicos têm nos despertado a atenção, não só pela beleza de suas formas, mas principalmente pelo péssimo estado em que se encontram. O desconhecimento, por parte da maioria dos municípios, do seu acervo escultórico-monumental e da falta de profissionais especializados para a realização da manutenção desse acervo só vem comprometê-lo. Desde os primórdios da humanidade o

³ **Pedra lavrada (de cantaria)** é a pedra natural destinada à construção e que foi esquadrejada pelo canteiro (escultor de pedra) em uma forma determinada.

principal material usado pelo escultor foi e continua sendo a rocha. Podem-se citar o mármore, o granito, o quartzito (lajeado e itacolomito), e o esteatito (pedra-sabão) como sendo as rochas de maior utilização, cada qual com propriedades físicas, químicas e morfológicas diferenciadas, influenciando na qualidade final da obra e na ocorrência de manifestações patológicas (Benedetti, 2001). A Figura 3.1, mostra uma obra em quartzito produzida por Neves (2001) durante o curso de revitalização de edificações (Especialidade em Cantaria), em 1997 e 1998.

Quando os objetos de pedra estão expostos a todas as variações de temperatura de um clima tropical, as possibilidades de proteção são muito limitadas, e há uma preferência em transportar as esculturas importantes para museus ou a lugares onde se podem mantê-las preservadas das variações extremas em condições favoráveis. Aspectos importantes da preservação são a proteção dos objetos de pedra nos museus ou coleções particulares e a embalagem ou transporte daqueles encontrados em escavações. Não é menos importante a preservação de pedras expostas ao intemperismo (deterioradas). Uma vez que estas operações não dependem só da natureza química e física do material, mas também da composição e a estrutura dos produtos de alteração (Sneyers e Henau, 1969).

Desde os tempos mais remotos, tem havido a preocupação para manutenção adequada de monumentos e obras construídos em pedras; no entanto, a maneira de pensar naquela época difere da atual. Antes substituíam partes danificadas ou perdidas sem maiores problemas, inclusive modificavam a variação da forma. No século passado, com o desenvolvimento industrial, houve uma maior conscientização a respeito da deterioração dos materiais pétreos, surgiram literaturas e correntes que se confrontavam e seriam fundamentais para a evolução dos conceitos de conservação e restauração. Uma das correntes pensava que as obras teriam que ser reconstruídas e completadas, inclusive eliminando partes originais. Em oposição a essa corrente estão os adeptos de que a interferência sobre os monumentos degradados deveria ser mínima. As primeiras teorias foram desenvolvidas pela segunda corrente, à qual devemos o atual conceito de restauração. Os critérios de conservação e intervenção foram agrupados na *carta de restauração de Atenas* em 1931, “conservacionistas”, e na *carta de restauração de Veneza* em 1964, “modernistas”(Godos, 1996). A partir desse período foram escritas outras cartas, compromissos, convenções, declarações, recomendações e resoluções. Dentre as cartas podem-se citar além das cartas de Atenas e de Veneza , a Carta do Restauo (1972), a Carta de Florença (1981), a Carta de Washington (1986), Carta de Petrópolis (1987) (Villela, 2003).

Até pouco tempo atrás não se usavam tratamentos para proteção da pedra, mesmo em processos decorativos, tais como pintura ou douramento que trariam uma proteção eficaz. A partir do final do século XIX, têm se usado e aplicado métodos para retardar a deterioração dos objetos de pedra expostos ao intemperismo. Um procedimento consistia em aplicar adesivos à base de óleo de linhaça cozido, óleo de “tung”, resinas, betume, borracha, água de cal, silicatos, fluorsilicatos, fluoreto de sódio e potássio, silicones, ésteres silicosos e tetrafluoreto de silício. Também têm-se feito ensaios para consolidar as superfícies de pedras, impregnando-as com solução de substâncias como: cera de abelha, parafina e goma laca, água de cal, resinas vinílicas (acetato de polivinila), resinas acrílicas (polimetacrilato de metila), sabonetes metálicos (esteriato de alumínio e de zinco), poliésteres e sistemas epoxidícos. Todos esses métodos aplicados à pedra exposta têm dado resultado pouco satisfatório (Sneyers e Henau, 1969).

3.2.1 - Métodos de eliminação de sais solúveis

Existem materiais pétreos que apresentam alta porcentagem de porosidade facilitando a penetração de sais solúveis através de chuva e outros mecanismos. A cristalização de sais solúveis é uma causa importante na deterioração desses materiais e, para cuja conservação, é necessária a eliminação desses sais. Os processos descritos por Sneyers e Heneau (1969) são:

Imersão em água. Submergir o corpo em água é um processo demorado e deve tomar alguns cuidados: medir condutividade elétrica, se a pedra tem muito cloro observar o andamento do banho, na troca da água a pedra não pode secar (para não produzir nova cristalização), a água não pode fermentar ou permitir a proliferação de algas.

Circulação de água através da pedra. A peça é envolvida num plástico e a água é bombeada por baixo e succionada por cima. Os sais são dissolvidos e transportados pela água.

Tratamento com água quente. O calor aumenta a ação dissolvente e a difusão da água. A temperatura usada é geralmente de 60°C.

Oclusão de sais. A pressão do sal, às vezes, é tão grande que produz um desmoronamento geral da peça. Nesse caso pode-se pensar na possibilidade de impregnar a amostra com uma mistura de parafina e cera de abelha.

3.2.2 – Proteção contra ataque biológico

As plantas (ervas e árvores), criptógamos (algas, musgos e líquens), mofos e bactérias se desenvolvem rapidamente nos objetos de pedra quando a umidade do ar é da ordem de 75% e as temperaturas oscilam entre -5°C e 40°C (os mofos e bactérias podem também atacar os materiais empregados na conservação ou restauração). Existem alguns procedimentos que resolvem ou minimizam esse problema: solução diluída de amoníaco, soluções anticéticas e soluções aquosas com permanganato (Sneyers et al.1969). Figura 3.2, pode-se ver várias plantas no “Chafariz de Marília”, risco de Manuel Francisco Lisboa, pai do Aleijadinho, construído em 1759, situado no largo Marília de Dirceu, Ouro preto/MG.

Segundo Resende (1997), muitos agentes biológicos participam da degradação das pedras, entre eles estão as bactérias, cianobactérias, algas, líquens e os fungos. Entre os mecanismos típicos de biocorrosão está a excreção de ácidos inorgânicos, como o ácido nítrico, o ácido sulfúrico e os ácidos orgânicos, produzidos e liberados pelas bactérias e fungos na superfície das rochas. Os filmes microbianos constituídos de algas, líquens, fungos e bactérias, que crescem praticamente em todas as pedras expostas às condições atmosféricas variadas, também podem modificar a composição química e mineralógica da pedra original. O clima e as condições de poluição atmosférica também influenciam os processos biológicos de degradação das rochas. Assim é que a situação ecológica dos microrganismos e sua conexão relativa com o tipo de pedra (pedra-sabão, calcária, silicática etc.) e muitos outros fatores ambientais têm um importante papel nos processos de intemperização das rochas. Os microrganismos estão fortemente envolvidos nos processos de degradação dos monumentos históricos. Entretanto, os mecanismos de deterioração e a inter-relação entre organismos, assim como entre organismos e pedras, não estão ainda satisfatoriamente explicados. Sabe-se que a colonização e a contaminação das rochas são basicamente controladas por impactos ambientais, tais como: tipo de pedra, condições climáticas e fatores edáficos (relativos ao solo). A importância dos processos biológicos e outros fatores na deterioração das pedras usadas em construção de monumentos históricos tem sido repetidamente questionada. O fenômeno biológico é, sem dúvida, o fator chave no processo de intemperismo de rochas e, portanto, das pedras usadas nas construções dos monumentos. Em casos extremos, o controle do processo de bioterioração faz-se necessário. Krumbein (1988) apresenta uma lista de substâncias mais comumente empregadas na preservação de monumentos e construções em pedra tais como: antibióticos, enzimas, biocidas (bactericidas, fungicidas e algicidas), tensoativos e sabões, taninos e fenóis (naturais e sintéticos), gases e irradiação (por exemplo, radiação UV). Antes de seu uso, devem-se fazer uma anamnese e um diagnóstico para chegar-se ao tratamento adequado. Resende (1997) cita em seu artigo o projeto IDEAS como

exemplo de pesquisa sobre deterioração em pedras: “Deterioração de monumentos históricos de pedra sabão e quartzito do estado de Minas Gerais”.



Figura 3.2 (a) e (b) – Presença de Plantas no “Chafariz de Marília” – Ouro Preto/MG.

Em 2002, o Instituto de Ciências Biológicas e Exatas, da Universidade Federal de Ouro Preto, promoveu um Curso de Biodeterioração e Conservação em Museus, Bibliotecas, e Patrimônio Cultural sob a coordenação da Dra. Maria Aparecida de Resende – ICB/UFMG e o Seminário do CYTED (Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo) sobre Biodeterioração do Patrimônio Cultural Ibero-Americano. Pretendeu-se nesse curso estudar a deterioração dos monumentos arqueológicos e objetos de valor artístico e cultural tanto para as sociedades locais como a para comunidade internacional, observou-se que pela razão da diversidade climática, existem vários fatores envolvidos com menor ou maior intensidade em relação à deterioração dos materiais, podendo-se citar:

- a) processos de biodeterioração;
- b) deterioração ambiental dos materiais expostos à atmosfera;
- c) poluição natural e antropogênica .

No curso, anteriormente citado, foram ministradas várias palestras, iniciando com uma introdução à biodeterioração, caracterização dos microorganismos, processos de biodeterioração causados por fungos, microorganismos envolvidos na deterioração de prédios históricos, princípios de controle, monitoramento de pedras expostas ao relento tratadas com biocidas, sistemas de gerenciamento, conservação preventiva e etc.

No trabalho realizado por Reis et al.(2002), foram isoladas e identificadas as espécies de fungos contaminantes de esculturas em pedra e madeira das Igrejas de Nossa Senhora do Pilar, de Nossa Senhora do Carmo, de Nossa Senhora da Conceição e do Museu do Aleijadinho, observando-se a ocorrência de atividade bioquímica de produção de ácidos e enzima celulase, nos vários monumentos, onde foi encontrado *Penicillium sp.*

Benedetti (2004) executou a restauração da escultura considerada como a última grande obra em mármore de grandes proporções do artista plástico Francisco Stockinger, que ornamenta os jardins do Foro Central de Porto Alegre. A intervenção foi necessária pois a peça já apresentava desgaste provocado pelo intemperismo: a obra de mármore tem sofrido a ação direta de poluentes atmosféricos e ataque biológico. Um dos agentes causadores desse ataque biológico são partículas de poeira em suspensão no ar, veículos de esporos de microrganismos que, juntamente com a elevada umidade relativa do ar fornecem ambiente propício para o aparecimento de microrganismos, pois os ciclos biogeoquímicos utilizam como elementos o carbono, nitrogênio e enxofre todos encontrados na atmosfera gerando substâncias danosas à rocha, podendo alterá-la. Nesse caso, para eliminação da microflora superficial, foram realizadas lavagens com a utilização de biocidas específicos com concentração e composição manipuladas e determinadas por ensaios preliminares. Após a desinfestação pontual foram realizadas lavagens em toda a peça com o intuito de remover sujidades superficiais como esporos e material particulado. Após a remoção das colônias, foram feitas outras intervenções para corrigir ou minimizar os danos causados por esses agentes.

3.3 - Critérios para Seleção de Pedra

No princípio do século passado, algumas ciências ainda se encontravam no limiar do desenvolvimento, por isso critérios de seleção de pedras naturais nos monumentos de Ouro Preto foram apenas macroscópicos. Os construtores da época faziam a seleção empírica dos materiais com os conhecimentos rudimentares (para a atualidade), trazidos da Europa pelos mestres e artífices; O material selecionado não poderia pulverizar, possuir trincas, rachaduras, furos, veios, alterações de cor, crostas, etc. Não era possível, à época, fazer análise química, física, mineralógica, petrográfica e tantas outras análises que permitissem selecionar com mais precisão o material a ser usado.

Atualmente, com máquinas e aparelhos cada vez mais sofisticados, com adaptação de *softwares*, é possível analisar as microestruturas de materiais de maneira mais detalhada. Assim, os equipamentos de ensaios, os microscópios eletrônicos onde podem ser instalados os mais diversos tipos de acessórios, permitem análises mais precisas e menores riscos de erro nas avaliações.

3.3.1 - Métodos empregados para a identificação das rochas

Esses métodos, descritos por Sneyers e Heneau (1969), são:

- Exame Macroscópico: uma inspeção visual ou com ajuda de uma lupa nos permite avaliar as seguintes características: textura, cor, brilho, transparência, tipo de fratura, etc.
- Ensaio Físicos (Mecânicos): permitem determinar as seguintes propriedades: resistência mecânica, coesão, densidade, porosidade, permeabilidade, efeito da temperatura, etc.
- Ensaio Químicos: determinação da solubilidade em água e em ácidos a frio e a quente podem ser seguida da identificação dos íons na solução.
- Análise Química: pode ser total ou parcial segundo a necessidade. O conhecimento da composição química é necessário para mostrar a presença de compostos, que mesmo em pequenas quantidades, podem ser facilmente alteráveis, comprometendo a durabilidade do material em sua fase de utilização. Habitualmente, procura-se determinar a porcentagem de uns poucos elementos químicos que definem o tipo da rocha.
- Exame Microscópico: emprega-se o microscópio ótico petrográfico polarizante de luz transmitida, onde os minerais podem ser caracterizados pelo estudo de suas propriedades óticas ou quando o mineral é desconhecido determinar o índice de refração do material pulverizado.
- Análise Petrográfica: a análise de seções delgadas da rocha (lâmina), visando à identificação e as alterações de minerais constituintes. É importante para estabelecer sua classificação petrológica (classe e tipo) e colocar em evidência uma série de características como a existência de poros, descontinuidades, trincas, alterações, deteriorações patológicas como manchamentos, inchamentos, escamações, etc.
O estudo do diagnóstico baseado em análises petrográficas e mineralógicas constitui uma ferramenta básica para o entendimento dessas características (Frasca e Quitete, 1999).

- Análise Biológica: tem por objetivo estudar a macro e a microflora. As análises são feitas em laboratório mediante microscópio ótico, microscópio eletrônico, termografias, etc. Esta análise é realizada, pois os microorganismos durante o seu metabolismo liberam ácidos e compostos químicos danosos aos minerais, causando a desagregação das esculturas.

- Análises Especiais:
 - Difração de raios X: é uma técnica para identificação dos minerais presentes na amostra neoformados e os de alteração e o estudo de sua cristalinidade;
 - Espectroscopia Mössbauer: determina a presença de ferro;
 - Microscopia eletrônica de varredura: analisa a fratura na superfície do material;
 - Microscopia eletrônica de varredura com espectrômetro de raios X por dispersão de energia (EDS) acoplado: faz análises químicas pontuais para determinar novos minerais gerados nos processos de alteração (Frasca, 2005).
 - “*Mouse*” de ressonância magnética nuclear: é um microaparelho desenvolvido por pesquisadores na Alemanha e nos Estados Unidos com ênfase na análise química, com aplicações na medicina, arqueologia, prospecção de petróleo ou restauro do patrimônio histórico (Equipe de pesquisadores – Jornal EM, 2005).

3.4 – Fatores Físico-Químicos que Alteram uma Pedra

O material pétreo alcança com o tempo um certo equilíbrio com o ambiente que o rodeia, cujo resultado é a permanência e uma provável estabilidade. As ações externas e as reações internas constituem um sistema de forças compensadoras, mas, se esses materiais se danificam ou existem fatores que variam o entorno dos mesmos, essas ações e reações tendem a desnivelar esse sistema, e o material tenderá a adaptar-se ao novo “habitat”, renovando e variando por sua vez. Essas transformações do material são as denominadas alterações (Godos, 1996).

A alteração de rochas se inicia, naturalmente, ao serem expostas às condições atmosféricas reinantes na superfície da terra, que levam à decomposição física e química dos

materiais e à formação de novos e estáveis nas condições superficiais. Trata-se de um processo, denominado intemperismo, que consiste no reajuste dos minerais constituintes das rochas, geralmente formados em altas pressões e temperaturas vigentes no interior da terra, ao longo de um tempo em escala geológica.

Os agentes atmosféricos que atuam diretamente nas rochas, segundo Frascá (2005), são:

- **Umidade:** na forma de chuva, névoa, ou a própria umidade relativa do ar;
- **Temperatura do ar:** tende a acelerar as reações químicas;
- **Insolação e resfriamento noturno:** responsáveis pelas alterações dimensionais ou fadiga térmica;
- **Vento e energia cinética:** promovem ações abrasivas sobre as paredes;
- **Constituintes do ar e poluentes atmosféricos (gasosos e aerossóis):** condicionam as taxas de ataque químico.

3.4.1 - Terminologias para a descrição de alterações macroscópicas dos materiais pétreos

Segundo Godos (1996), as principais terminologias são:

- Alteração cromática: acontece através das variações de um ou mais parâmetro que define a cor: tinta, claridade, saturação e substâncias químicas agressivas.
- Alveolização: degradação que se manifesta com a formação de cavidades de forma e dimensões variáveis. Os alvéolos freqüentemente estão interconectados e não têm uma distribuição uniforme.
- Concreção: depósito compacto geralmente formado de elementos de extensão limitada, desenvolvido preferencialmente em uma só direção não coincidente com a superfície da pedra, há situações em que pode assumir a forma de estalactites ou estalagmites.
- Crosta: camada superficial de alteração do material pétreo ou de produtos utilizados em eventuais tratamentos (de limpeza ou restauro). Tem uma espessura variável, é dura, frágil e distingue-se das partes inferiores pelas características morfológicas e, freqüentemente, pela cor. Pode despregar-se também espontaneamente do substrato que se apresenta desagregado e ou pulverulento.

- Deformação: variação da forma que afeta a espessura total do material e que se manifesta, sobretudo em elementos lastrifomes (materiais diferentes usados como suporte).
- Degradação diferencial: aquela que ocorre em relação à heterogeneidade da composição ou estrutura do material, de forma que se evidenciam às vezes as texturas dos motivos originais.
- Depósito superficial: acumulação de materiais estranhos de natureza diversa, como poeira, algas, barro, excrementos, etc.
- Desagregação: decoação de separação de grãos ou cristais com pequenas pressões mecânicas.
- Despregamento ou separação: dos estratos superficiais do material, seja entre eles ou com relação ao substrato, prevendo em geral a queda do material. Quando os materiais pétreos naturais com elementos despregados ou separados assumem formas específicas em função das características de textura e estrutura, há preferência pelos termos: crosta, escamação, esfoliação, etc.
- Eflorescência: formação geralmente esbranquiçada, de aspecto cristalino, pulverulento sobre a superfície. No caso das eflorescências salinas, a cristalização pode desenvolver no interior do material provocando com frequência o desprendimento das partes mais superficiais.
- Erosão: transporte do material da superfície devido a processos de naturezas diversas. Quando são conhecidas as causas da degradação, podem ser utilizados os termos abrasão ou corrosão (causas mecânicas), corrosão (causas químicas e biológicas) e desgaste (causas antrópicas).
- Esfoliação: degradação que se manifesta com desprendimento de material, seguido de queda de uma ou mais camadas superficiais subparalelas entre elas (lâminas).

- Fraturas ou trincamentos: degradação que ocorre com a formação de aberturas no material independente do deslocamento recíproco das partes.
- Incrustação: depósito estratiforme, compacto e geralmente aderente ao substrato, composto de substâncias inorgânicas ou estruturas de natureza biológica.
- Mancha: alteração que se manifesta com pigmentação acidental e localizada da superfície. Ocorre com a presença de material estranho ao substrato (por exemplo, óxido, sais de cobre, substâncias orgânicas, vernizes, ceras, etc.).
- Falta: caída ou perda de partes. Esse termo de caráter geral é usado na forma de degradação que não é descrita nos outros termos do léxico (terminologias adotadas).
- Pátina: alteração estritamente limitada àquelas modificações naturais das superfícies não ligadas a fenômenos evidentes de degradação e perceptíveis como uma variação de cor originária do material.
- Pátina biológica: camada sutil e homogênea aderida à superfície, de evidente natureza biológica, com uma cor variável, em geral esverdeada.
- Película: camadas superficiais de substâncias coerentes entre elas e estranhas ao material pétreo. Tem uma espessura geralmente muito reduzida e pode separar-se do substrato, que, em geral, se apresenta íntegro.
- Pitting: degradação puntiforme que se manifesta através da formação de orifícios numerosos e vizinhos. Os orifícios têm forma geralmente cilíndrica com diâmetro máximo de poucos milímetros.
- Pulverização: inconsistência que se manifesta através da queda espontânea do material em forma de pó ou grãos.
- Inchamento: levantamento superficial e localizado do material, que pode assumir forma e consistência variáveis.

- Escamas: degradação que se manifesta através da separação total ou parcial de zonas do material original, com formas e espessuras irregulares e desenvolvimento tridimensional.

Frasca (2005) cita que as deteriorações mais comumente observadas em rochas para revestimento são: manchamento, modificação de cor (alteração cromática), eflorescência, inchamento e escamação. Benedetti (2001) também cita que as patologias mais frequentemente verificadas são: eflorescência, corrosão, desagregação, concreção, *pitting* (corrosão localizada), decoesão, erosão alveolar, biodeterioração, esfoliação, trincamentos, incrustações e película.

3.4.2 - Mecanismos de deterioração das rochas

O clima é o principal fator de alteração para cada ambiente. Nos climas extremos pode-se diferenciar qual ação é mais relevante, física ou química, com a prevalência de uma sobre a outra; nos climas moderados, acontece uma interação entre as duas; em áreas de clima temperado, a quantidade de precipitação é um fator preponderante.

Os mecanismos de alteração e decomposição das rochas são praticamente os mesmos que atuam nos processos intempéricos, divididos em dois tipos: físicos e químicos. Entretanto, na realidade, esses processos ocorrem concomitantemente (Frasca, 2005).

O intemperismo físico é decorrente principalmente de: **variações térmicas**, como a insolação durante o dia e o esfriamento noturno, produzindo dilatações e contrações que afetam os minerais que compõem as rochas, pois não são boas condutoras de calor; **tensões mecânicas**, descompressão e deformações tectônicas; **pressões externas**, geradas por fatores externos, produzidas pelas ações químicas de corrosão umas sobre as outras; **pressões internas**, surgidas no interior das rochas: congelamento de água em poros e trincas, cristalização de sais minerais e expansão de minerais por absorção de água e **agentes externos**, antrópicos, animais e plantas. O intemperismo químico, cuja causa principal é a intensidade pluviométrica, a água e outros componentes transportados em solução, pode penetrar na rocha e atua principalmente por meio de reações químicas (oxidação, hidratação, dissolução, etc.) entre os minerais e o solvente (principalmente a água).

A atmosfera e seus componentes sólidos, líquidos e gasosos, especialmente os poluentes, atuam sobre as rochas por meio de mecanismos físicos e químicos citados anteriormente e biológicos (ações químicas ou físicas promovidas por microorganismos diversos: bactérias, algas, fungos e líquens, musgos e até mesmo arbusto) (Frasca, 2005).

Resende (1997) relata que rochas e minerais sofrem processo natural de desgaste por condições ambientais que levam à perda substancial de material e confirma que esse desgaste pode ser causado pelos fatores físicos (como chuva e vento), químicos (como poluição atmosférica), e fatores biológicos já citados por Frascá (2005) assim como, pela associação dos três tipos.

Os agentes de biodeterioração anteriormente citados, alimentando-se de compostos de nitrogênio, de fósforo presentes nas fezes dos pássaros e de hidrocarbonetos (fuligem), desenvolvem-se acarretando diversos danos a um monumento. As plantas aéreas, ao desenvolverem suas raízes que, penetram a pedra, causam fraturas e posterior perda de material. Os microorganismos, durante o seu metabolismo, liberam ácidos e compostos químicos danosos aos minerais, causando a desagregação de esculturas (Benedetti, 2001).

3.5 – Restauração de uma Pedra

Os materiais pétreos usados nas construções de monumentos, igrejas e prédios públicos do século XVIII, na sua maioria expostos ao tempo, encontram-se, muitas vezes, em estado avançado de deteriorações decorrentes das ações dos agentes do intemperismo e do homem, sendo, portanto, necessária sua consolidação e restauração. Os monumentos existentes em Ouro Preto, assim como em outras cidades históricas, precisam ser restaurados para a preservação de nossa história e identidade.

3.5.1 – Consolidação de materiais pétreos

O tratamento da consolidação pétreo consiste em aplicar produtos que, penetrando em profundidade, reforçam e dão uma maior coesão à pedra e, às vezes, une os materiais desagregados da superfície à parte sã. Por isso os consolidantes são substâncias que melhoram as características mecânicas e de adesão dos elementos pétreos quando o todo, ou uma parte deles, foi extraviado. Infelizmente, ao mesmo tempo em que existe bastante informação sobre as características dos consolidantes usados, estes são relativamente recentes, de apenas algumas décadas, e não se conhece a sua atuação perante o tempo, e não tem como recorrer a provas de aceleração e de envelhecimento eficientes em laboratório para escolher os mais adequados (Godos, 1996).

Para reforçar as pedras deterioradas, pode-se adotar um método de impregnação de agentes de revestimento, tais como misturas de ceras fundidas ou soluções de cera, resinas ou silicatos etílicos. A eficácia depende do grau de penetração conseguido: de fato, se aquela não

é satisfatória, os depósitos superficiais podem produzir, com o tempo, oclusões e intensificar a velocidade de deterioração da pedra que se deseja proteger. A eficácia da consolidação com cera depende da absorção desta: quanto maior, melhor. O tratamento com resina requer a quantidade mínima de revestimento para restabelecer a conexão entre os grãos (Sneyers e Heneau, 1969).

3.5.2 - Reparação de objetos de pedra

Os pequenos objetos fragmentados podem ser recompostos, empregando-se vários tipos de cimento à base de acetato de polivinila ou de resinas acrílicas. Acima de um certo peso, é melhor usar cimentos à base de resinas poliésteres ou epoxídica, mais resistentes. Quando uma pedra se rompe em duas partes que estão limpas, pode-se obter facilmente uma união satisfatória, aplicando finíssimas camadas de goma laca até o ponto de fusão (120°C) diretamente sobre uma das superfícies de fratura, à medida que se eleva a temperatura da pedra; a outra superfície é aquecida simultaneamente e, quando se notar que a goma adquire a forma de uma película delgada contínua, basta coincidir ambos fragmentos e manter na posição até que a pedra esteja totalmente fria (Sneyers e Heneau, 1969).

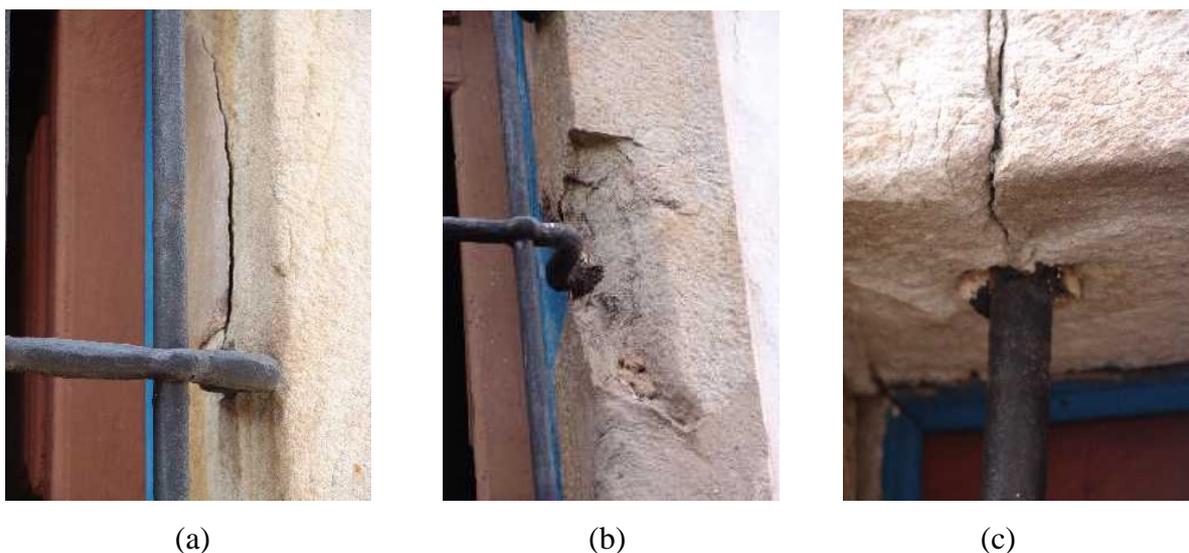


Figura 3.3 – Fotografias de Regiões degradadas da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias, Ouro Preto/MG, (a) e (b) próteses de cimento na ombreira de janelas, (c) trinca proveniente da dilatação da barra metálica incrustada na verga de quartzito numa janela.

No caso de pedras mais pesadas, os fragmentos devem ser sustentados com pinos metálicos que não se oxidem e nem dilatam para que não produzam trincas. Por isso, emprega-se o aço inoxidável, o latão, o bronze ou algumas ligas especiais. Frequentemente, é preferível usar pinos de seção retangular, que não sejam demasiadamente grossos ou pesados para o tipo de pedra. Faz-se uma bifurcação nas extremidades do pino para melhor fixação no furo quando este é preenchido com cimento. A perfuração e fixação devem ser feitas primeiro na parte mais pesada. Determina-se imediatamente a orientação do segundo furo marcando com tinta ou lápis. A união pode ser feita com cimento *Portland*. Atualmente podem-se fazer excelentes cimentos com mistura de areia, pedra pulverizada e uma resina poliéster ou epóxi. Para essas misturas, ajusta-se a quantidade de ingredientes de maneira que o cimento obtido apresente a mesma granulidade da pedra (Sneyers e Heneau, 1969).

É comum encontrar em esculturas, e mesmo em revestimentos pétreos, próteses de argamassa de cimento como mecanismo de complementação de partes faltantes. Quando se colocam dois materiais diferentes, não há compatibilidade em relação aos índices de dilatação. A incompatibilidade entre o cimento e a rocha irá gerar tensões localizadas e posteriores fraturas. É importante lembrar que a composição do cimento (carbonatos, sulfatos e argilas) contribui para a formação de sais solúveis. A mesma tensão é derivada da colocação de pinos metálicos que são constantes nas fixações de placas de identificação nos embasamentos das esculturas ou para fixar partes delas (Benedetti, 2001). Figura 3.3 – (a) Podemos ver uma prótese de cimento na ombreira, de quartzito, de uma janela dos fundos da Igreja Matriz de Nossa Senhora da Conceição de Antônio Dias (1727 – 1760), Ouro Preto/MG, já em fase de separação. (b) Prótese de cimento já separada na ombreira de uma janela lateral e (c) trinca proveniente da tensão provocada pela dilatação de barra metálica incrustada na verga, de quartzito, numa janela dos fundos.

A recomposição de peças com resinas foi muito usada logo que estas começaram a ser produzidas industrialmente. Pensava-se que se tinha encontrado um produto eficaz para restauração. Depois, passados alguns anos, verificou-se, principalmente em materiais porosos, que a resina não deixava o material “respirar”, permitindo um inchaço. Além disso, a resina usada na restauração tinha um coeficiente de dilatação diferente do da pedra e soltava-se carregando consigo parte do material da peça. A partir de então, o uso dessas resinas passou a ser mais cuidadoso; foram estabelecidos métodos e critérios para o emprego de resinas em restaurações. Atualmente, existem resinas especiais produzidas para usar em produção de esculturas e aplicação na área de restaurações.

3.5.3 - Limpeza

Conforme Godos (1996), os principais sistemas e métodos de limpeza são:

A) Físicos-mecânicos: não modificam a natureza dos materiais a eliminar. Eles podem ser distinguidos em métodos abrasivos e aeroabrasivos:

– Instrumentos abrasivos giratórios, escalpelos e espátulas

Atuam por eliminação mecânica dos depósitos endurecidos e crostas, junto a uma inevitável e fina capa da superfície pétreo. Podem usar os seguintes materiais abrasivos: discos, fresas e diversos dispositivos de carborundum colocados numa pua ou outro instrumentos mecânicos; é recomendável usar em baixa velocidade.

– Microbrocas

As ferramentas acionadas eletricamente, quando as dimensões das pedras são pequenas e reduzidas, são mais controláveis, permitem desgastar gradualmente as incrustações mais duras. Esses instrumentos possuem alta precisão e velocidades controladas.

– Microareadora de precisão

É um instrumento que permite, mediante a expulsão controlada de um fino pó, uma limpeza a seco de grande precisão.

– Jato de areia controlado

É um método que usa a ação abrasiva do pó de areia de natureza diversa, disparada sobre a superfície a limpar mediante, um jato de areia controlada por um manômetro.

– Jato de areia não controlado

Funciona como o anterior com alta pressão e com abrasivo mais grossos. A alta pressão resulta em uma limpeza pouco controlada e muito prejudicial às pedras, pois podem chegar a deslocar ou extirpar partes da superfície do material macio ou deteriorado.

B) Mecânicos-Químicos: Une a força mecânica a uma ação química. Podem ser hidroabrasivos ou hidro-aeroabrasivos.

– Pulverização de água

É um método prático e acessível; a água corrente é pulverizada e combina seu efeito químico dissolvente com a ação mecânica provocada pelo escorrimento.

– Aparelhos de ultra-som

Este sistema permite a retirada das incrustações, inclusive as mais espessas, sem uma ação mecânica direta, por tratar-se de forças induzidas por mínimas vibrações, transmitidas por um micro-pulverizador de água contínuo. São aparelhos semelhantes aos odontológicos.

– Vapor quente

Este método consiste num jateamento de vapor de água a alta pressão com mangueiras metálicas e direcionadas para a superfície a limpar. A temperatura do vapor é próxima de 170°C, é aquecido em uma caldeira a uma pressão de 1 MPa.

– Água sobre pressão

Um método sem nenhum controle, usa a ação mecânica da água. Em alguns casos inclui água quente, jogada com alta pressão sobre a superfície a limpar. Empregam-se altas pressões que oscilam de 4 a 12 MPa, o que, inevitavelmente, produz um forte impacto sobre a pedra.

– Jato de areia e água

É um processo hidroabrasivo que pode ser, com pressão, controlada ou não. Desenvolve uma ação aparentemente mais branda que os sistemas a seco, já que a água amortece o impacto do pó sobre a pedra.

3.6 – Resina

A conservação da herança cultural requer o desenvolvimento de novos materiais com características específicas, com particular atenção voltada para a durabilidade e a eficácia. A resina sintética está entre os novos materiais empregados na restauração e será usada para colar o quartzito nos ensaios em flexão. Resina é o nome dado a qualquer composto natural ou sintético e consiste numa substância não cristalina ou viscosa. Resina sintética é uma substância orgânica macromolecular (polimérica), produzida por meio de uma reação

química. De acordo com Mano e Mendes (1999), as resinas sintéticas podem ser termoplásticas ou termorrígidas. Os polímeros lineares ou ramificados, que permitem fusão por aquecimento e solidificação por resfriamento, são chamados *termoplásticos* e os polímeros que, por aquecimento ou outra forma de tratamento, assumem a estrutura tridimensional, reticulada, com ligações cruzadas, tornando-se insolúveis e infusíveis são chamados *termorrígidos*. As resinas, objetos desse estudo são classificadas como termorrígidas.

Polímeros acrílicos e poliésteres são usados amplamente pelos artesãos da região de Ouro Preto/MG devido a sua habilidade de ser impermeável, apresentar boa aderência e versatilidade. A aplicação dessa resina tem fornecido resultado pouco satisfatório em restauração, especialmente em aplicações externas, como fachadas, portais de igrejas e prédios antigos localizados em áreas urbanas, onde o efeito da luz solar, da temperatura, da umidade, e dos locais onde os agentes de poluição são severos.

3.6.1 – Resina poliéster

Constitui uma família de polímeros de alta massa molar, resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo especificamente dos tipos de ácidos, conforme a Tabela III.3, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular. Poliéster é um termo que significa: poli (muitos); éster (é uma função química; um éster é obtido através da seguinte reação: ácido + álcool = éster + água) (Blass, 1988).

Tabela III.3 - Ácidos e glicóis usados na fabricação de resina poliéster (Hollaway, 1994).

| Ácidos insaturados | Ácidos saturados | Glicóis |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| Maleico | Ortoftálico | Propileno |
| Fumárico | Isoftálico | Etileno |
| Maleico na forma de anidrido maleico | Hexacloro-endo-metileno-tetra-hidroftálico (HET ácido) | Neopentil (NPG) |
| | Ortoftálico na forma de anidrido ftálico | Dihidróxido dipropóxido bisfenol "A" |
| | | Dibromoneopentil |

São resinas que têm grupos éster como elementos fundamentais em suas cadeias moleculares, resultam da reação de um diálcool com um diácido, podendo estes ser produtos saturados (que fornecem geralmente poliésteres termoplásticos) ou não saturados (tanto no componente alcoólico, como no ácido, que fornecem poliésteres termorrígidos) (Silaex, poliéster, 2004).

3.6.2 - Resina poliéster insaturada

Os poliésteres insaturados são ésteres complexos formados pela reação de um diálcool e um diácido com liberação de uma molécula de água (Silaex, poliéster, 2004).

O poliéster insaturado é produzido quando qualquer dos reagentes contém insaturações. A denominação insaturado é proveniente da presença de duplas ligações presentes na sua cadeia molecular.

Os poliésteres podem ser formados em duas etapas: condensação do ácido e do álcool para formar uma resina solúvel, e depois adição de um agente de interligação para formar uma resina termorrígida. O poliéster estará na sua fase solúvel com o monômero de estireno.

As duplas ligações são quebradas pela ação de um catalisador (peróxido orgânico, calor ou radiação), para reagirem novamente entre si dando origem a um polímero tridimensional de características termorrígidas e, logo, infusíveis e irreversíveis (Silaex, poliéster, 2004).

Essas resinas são xaropes (líquidos viscosos) constituídos de uma cadeia polimérica dissolvida em um solvente orgânico reativo (monômero). A adição de um catalisador e acelerador adequado leva o xarope a sofrer uma reação no estado frio e, sem pressão, para formar um sólido com estrutura tridimensional. Neste trabalho, o monômero reativo é o estireno. A Figura 3.4 mostra a reação entre o poliéster insaturado e o monômero de estireno.

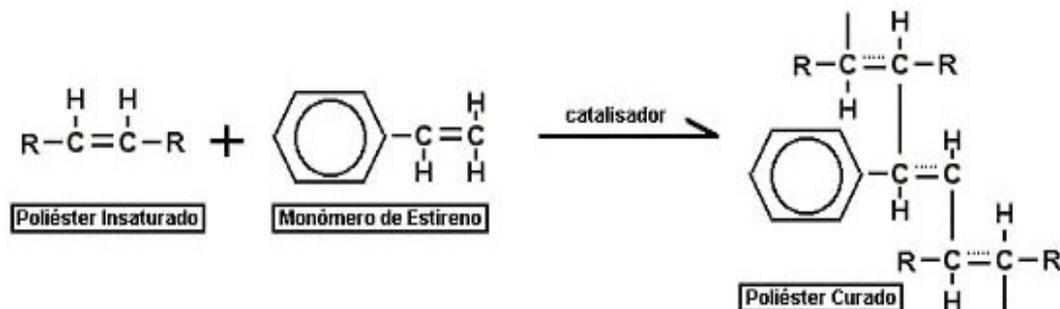


Figura 3.4 - Reação de um poliéster insaturado com um monômero de estireno (Silaex, 2004).

A reação do poliéster pelo estireno é de uma ordem de grandeza muito mais rápida do que a reação do estireno pelo estireno. As características das resinas poliésteres podem ser alteradas de acordo com a variação na porcentagem de sua construção química durante o processo de fabricação. Cuidados no controle da proporção de ácido dibásico saturado para insaturado resultam na incorporação de sítios de ligação cruzada (insaturação ou dupla ligação de carbono) em intervalos regulares ao longo da cadeia (Hollaway, 1994).

As características do polímero, segundo Mano (1991) são:

- Massa molar, imensurável (reticulado);
- Densidade 1,25 g/ml;
- Termorrígido, amarelado e translúcido.

E também, algumas propriedades marcantes para uso industrial são:

- Resistência às intempéries.
- Em compósitos com fibra de vidro, grande facilidade de processamento, na moldagem de peças de pequenas ou grandes dimensões.

Os poliésteres são classificados de acordo com o material usado na sua fabricação (orto-ftálico, iso-ftálico, iso – NPG, bisfenólica), conforme a Tabela III.4 (Silaex, poliéster, 2004). Ainda na Tabela III.4 podem-se observar comentários sobre algumas características de cada tipo de resina.

Tabela III.4 – Características de algumas resinas (Silaex, poliéster, 2004).

| TIPOS | CARACTERÍSTICAS |
|--------------------------|--|
| Ortoftálica | Resina mais comum de menor custo para usos básicos não nobres. |
| Tereftálica | Possui resistências físicas pouco superiores a orto-ftálica, porém baixa resistência a UV. |
| Isoftálica | Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores. |
| Isoftálica c/ NPG | O Neo Pentil Glicol(NPG) melhora a resistência a hidrólise. |
| Bisfenólica | Possui melhores características químicas e térmicas. |

a) Resinas Poliésteres Ortoftálicas

São aquelas em cuja composição, são utilizadas como ácidos modificadores, o ftálico ou seu anidrido. Suas propriedades mecânicas e químicas são inferiores às demais, devido à dificuldade de se obter polímeros de alto peso molecular. O anidrido ftálico tem forte tendência de se regenerar a partir dos meios ésteres do ácido ftálico (reação reversível), fato que incrementa a presença de espécies de baixo peso molecular, altamente sensíveis ao ataque químico (Silaex, poliéster, 2004). A Figura 3.5 é a fórmula de uma resina poliéster orto-ftálica.

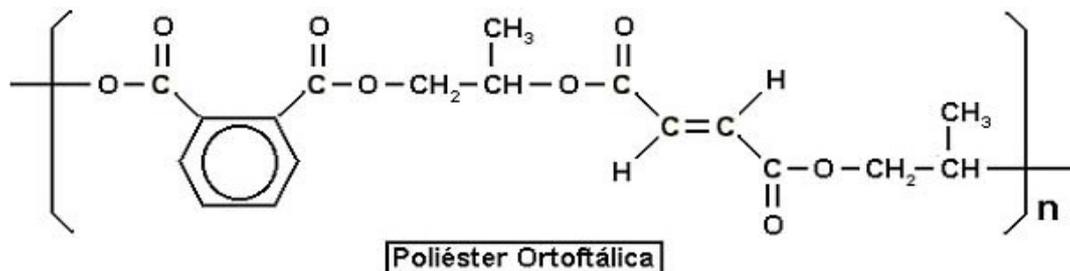


Figura 3.5 - Fórmula de uma resina poliéster ortoftálica (Silaex, poliéster, 2004).

Uma das propriedades características do polímero é a sua viscosidade, cPs, a 25°C, que é de: 600 – 700 (Mano, 1991).

b) Resinas Poliésteres Isoftálicas

O ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, não sofre desvantagem de regeneração, como no caso das ortoftálicas e, conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas as quais conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor os impactos. Conseqüentemente, tornam-se polímeros de maior resistência química e térmica. A Figura 3.3 apresenta a fórmula da resina.

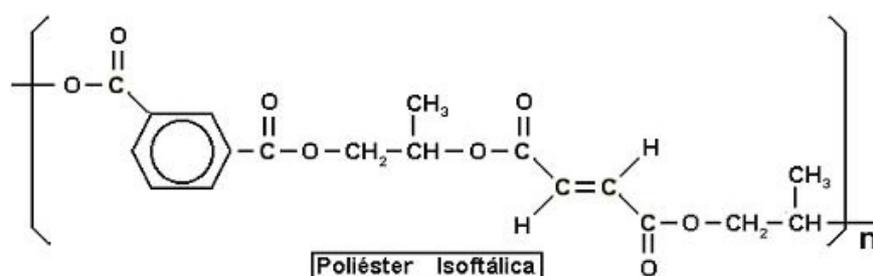


Figura 3.6 - Fórmula de uma resina poliéster isoftálica (Silaex, poliéster, 2004).

3.6.3 - Resina epoxídica

As resinas epoxídicas constituem uma família de materiais poliméricos termorrígidos, que não dão origem a produtos de reação durante a sua cura (formação de ligações cruzadas), o que provoca uma pequena retração.

A palavra epóxi vem do grego “EP” (sobre ou entre) e do inglês “OXI” (oxigênio); literalmente, o termo significa oxigênio entre carbonos. Em um sentido geral, o termo refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. O grupo epóxi mais simples é aquele formado por um anel de três elementos, ao qual o termo a-epóxi ou 1,2-epóxi é aplicado (Silaex, 2004). A Figura 3.7 apresenta fórmulas do grupo epóxi.

Resinas ou polímeros epóxi são produzidos através da reação química de condensação de bisfenol “A” com epícloridrina na presença de hidróxido de sódio. O bisfenol é um produto da reação entre o fenol e a acetona. Eles são conhecidos como epóxi por causa do anel que contém oxigênio, também conhecido como o anel oxirane (Kotasek, 2003).



Figura 3.7 – Fórmulas de alguns grupos epoxidicos (Silaex, epóxi, 2004).

Um exemplo de resina epoxidica muito empregado no comércio é do tipo Epóxi CMR – 029. Uma de suas características é ser um produto líquido, proveniente da reação de epícloridrina com bisfenol A, é de baixa viscosidade e apresenta uma excelente transparência. É indicado em aplicações na construção civil, como piso decorativo, argamassas, revestimentos isentos de solventes, adesivos estruturais, entre outras. As resinas epoxidicas podem ser classificadas através do EEW (*equivalent epoxy weight*), seu peso equivalente em epóxi. O EEW é utilizado para cálculo estequiométrico de proporção entre resina e endurecedor. A resina básica líquida é a de EEW = 190. O cálculo do EEW é simplesmente a massa molar da resina dividido pelo n° de anéis epoxidicos. As informações da Tabela III.5 são baseadas em experiências práticas no sentido de auxiliar na aplicação de produtos.

Tabela III.5 – Propriedades da Resina Epóxi CMR-029 (Casa das Resinas, 2005).

| Propriedades Típicas: | |
|-----------------------------------|-------------|
| Peso equivalente em epóxi (EEW) | 195 – 213 |
| Viscosidade em cPs, 25°C | 500 – 800 |
| Cor Gardner ⁴ , máximo | 3 |
| Densidade, g/ml, 25°C | 1,05 – 1,15 |

As características de um polímero reticulado (epóxi), segundo Mano (1991) são:

- massa molar, imensurável (insolúvel);
- densidade 1,15 – 1,20;
- termorrígido, amarelado e translúcido.

Propriedades Marcantes industrialmente: adesividade, resistência à abrasão, e baixa retração após a cura (Mano, 1991).

⁴ Norma ASTM D1544-04: Método para determinar a cor de líquidos transparentes (Escala de cor Gardner)

3.6.4 - Diferenças entre resinas epóxis e resinas poliésteres

Resinas poliésteres são economicamente mais viáveis que epóxi, mas têm desvantagens tais como: pior aderência, absorve água, são mais porosas, mais tóxicas e tem maior retração quando curada. A Tabela III.6 mostra algumas dessas diferenças.

Tabela III.6 – Comparação de propriedades de resinas segundo Brent Strong (Kotasek, 2003).

| Propriedades | Epóxi | Poliésteres |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Adesão | Excelente | Boa |
| Força de cisalhamento | Excelente | Boa |
| Estabilidade térmica | Excelente, altas temperaturas | Média |
| Resistência à absorção d'água | Boa | Média |
| Resistência química | Boa | Média |
| Durabilidade | Boa, pode ser aumentada | Média |
| Estabilidade dimensional | Boa | Média |
| Resistência à fadiga | Excelente | Média |
| Resistência ao fogo | Fumaça pode ser problema | Fumaça e fogo são problemas |
| Custo | Superior R\$8,00/kg | Inferior R\$5,00/kg |

3.7 – Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos são de fundamental importância na seleção de rochas, pois é necessário conhecer suas propriedades para o emprego adequado. Sendo assim, decorrer-se-á sobre os ensaios mecânicos que foram empregados neste trabalho.

3.7.1 - Ensaio de resistência à flexão

Este tipo de solicitação está presente no caso de algumas das utilizações do quartzito, dos mármore e dos granitos cortados em placas, como por exemplo, degraus de escada, vergas, vigas, etc. Se um elemento de construção tem que suportar cargas de flexão, serão produzidos esforços de tração em algumas regiões. As rochas mostram-se pouco adequadas à solicitação de tração, refletindo na baixa resistência à flexão. O ensaio de resistência à tração é um importante parâmetro mecânico usado na seleção de rochas (Trillo, 1996).

Os ensaios de flexão visam a determinar qual a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços fletores (Caruso et al., 1990).

A resistência à flexão representa a tensão máxima desenvolvida na superfície de uma barra quando sujeita a dobramento (Mano, 1991).

A fórmula para calcular a tensão de ruptura de uma rocha por tração na flexão (σ_1) é dada pela equação [3.1]:

$$\sigma_1 = \frac{3PL}{2bd^2} \quad [3.1]$$

onde:

P = carga de ruptura, em N

L = distância entre as duas linhas extremas traçadas no corpo-de-prova (cm);

b = largura do CP (cm);

d = altura do CP (cm).

3.7.2 - Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Deve-se conhecer o valor da resistência à compressão sempre que a rocha tenha que suportar cargas elevadas, tanto em sua própria utilização como durante o transporte e armazenamento. Em termos gerais, pode-se dizer que as rochas encharcadas em água resistem menos à compressão que quando estão secas, e as rochas estratificadas resistem mais quando o esforço é exercido na direção normal à estratificação do que quando é exercido paralelamente (Trillo, 1996).

Os ensaios de compressão uniaxial visam a determinar qual a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços compressivos (Caruso *et al.*, 1990).

A resistência à compressão é expressa pela tensão máxima que um material rígido suporta sob compressão longitudinal, antes que o material entre em colapso (Mano, 1991).

Fórmula (equação 3.2) para calcular a tensão de ruptura da rocha por compressão uniaxial (σ_c) é:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad [3.2]$$

onde:

P = carga máxima de ruptura em kN

A = área da base do CP (cm²).

3.7.3 - Ensaio de resistência ao impacto

O valor da resistência ao impacto é importante para uma rocha que será empregada em revestimentos de interiores, pisos, degraus de escadas, beirais, soleiras, mesas, balcões, pias, etc, mesmo que a ruptura das placas tenda a originar-se geralmente em zonas próximas às arestas ou vértices, por problemas de assentamento e de utilização, que põem em evidência um esforço de flexão ou outro efeito de ruptura, mais do que um impacto produzido pela queda de objetos (Trillo, 1996).

Através da altura de queda de um corpo sólido que provoca ruptura do corpo-de-prova, é determinada a resistência da rocha ao impacto (Caruso *et al.*,1990). Para determinar a resistência ao impacto do corpo duro⁵, deixa-se cair por gravidade uma esfera metálica de 1kg em cima de um corpo de prova em forma de chapa (20x20x3)cm, apoiada em um colchão de areia com 10cm de espessura. Inicialmente levanta-se a esfera à 20cm e, depois aumentando a altura de 5cm em 5cm, até a ruptura do CP ou o aparecimento da primeira trinca.

A resistência ao impacto representa a tenacidade ou a resistência de um material rígido à deformação a uma velocidade muito alta (Mano, 1991).

3.8 - Microscopia Ótica

O microscópio ótico é indispensável para o entendimento dos mecanismos de formação das rochas e de seus constituintes. Com esse equipamento, é possível analisarem-se as propriedades microestruturais, óticas, estruturas deformacionais e, também, definir contornos de grãos e subgrãos. O microscópio ótico funciona a partir da emissão de luz por uma fonte luminosa, que é disposta em dois pontos do aparelho, uma no braço da estativa do microscópio (luz refletida) e a outra na base da estativa (luz transmitida). Nos dois casos trabalha-se com luz polarizada. Conforme o tipo de análise é possível trabalhar com as duas fontes simultaneamente (Microlab/EM/UFOP, 2005).

⁵ A diferença entre rochas duras e moles está de acordo com Norma DIN, na resistência à pressão compreendida entre 52000-1800 kPa/cm². Rochas duras: basalto, gnaisse, quartzito. Rochas moles: arenito, calcário, giz natural (Schumann, 1994).

3.8.1 - Descrição de uma lâmina

Alguns conceitos necessários para a descrição:

Isotropia e anisotropia

Num mineral isotrópico, os raios de luz se propagam com velocidade igual em todas as direções, de modo que os seus índices de refração permanecem os mesmos para qualquer direção. Num mineral anisotrópico transparente, em geral, um raio de luz que incide sobre a sua superfície se refrata, dando dois raios que vibram em planos perpendiculares entre si. Esses dois raios refratados se propagam através do mineral com velocidades diferentes e possuem, portanto, índices diferentes. É o fenômeno de dupla refração (Fujimori e Ferreira, 1987).

Luz polarizada

Segundo a teoria ondulatória, a luz vibra em todas as direções, perpendicularmente à direção de propagação. Se a luz se vê obrigada a vibrar em um só plano, diz-se que houve uma polarização plana (Pires 1987).

Polarizador e analisador

O polarizador e o analisador são prismas de nicol ou placas de polaróide.

O polarizador fornece a luz que vibra num único plano que é coincidente com o retículo norte-sul ou leste-oeste da ocular. O polarizador está localizado logo após o espelho de iluminação (Fujimori et al., 1987).

O analisador analisa a luz proveniente do polarizador e que atravessou o mineral. O seu plano de vibração é perpendicular ao plano de vibração do polarizador, de modo que coincide com um dos retículos leste-oeste ou norte-sul da ocular. É móvel, podendo ser introduzido ou retirado do sistema ótico do microscópio, por rotação ou translação. Além disso, o analisador pode ser girado em torno do eixo do microscópio, e está localizado entre a objetiva e a lente de Amici-Bertand (Fujimori et al., 1987).

Extinção

Existe uma direção especial em que os cristais uniaxiais apresentam um campo negro ao serem colocados entre os polaróides cruzados, que acontece quando a direção de vibração do polarizador coincidir com uma das direções de vibração do cristal. A luz que passa através

do cristal fica, totalmente eliminada pelo analisador, neste caso diz-se que o cristal está em extinção. À medida que vai girando o cristal, este vai se iluminando progressivamente para alcançar uma iluminação máxima à 45°. À 90° se encontra de novo em extinção (Pires 1987).

3.9 - Análise Térmica

Segundo Vogel (1981), as técnicas termogravimétricas (TG) são basicamente como aquelas em que se medem mudanças nas propriedades físicas e/ou químicas de uma substância em função da temperatura. Os métodos que envolvem mudança na massa ou energia também são incluídos. Assim a termogravimetria (TG) é uma técnica em que a mudança de massa de uma substância é registrada como função da temperatura.

A Análise térmica diferencial (DTA) é um método para o registro da diferença de temperatura entre a substância e o material de referência, em função da temperatura ou do tempo.

Ainda segundo Vogel (1981), o instrumento básico requerido para a análise termogravimétrica é uma balança de precisão com um forno programado para aumentar a temperatura linearmente com o tempo. Os resultados podem ser apresentados como uma curva termogravimétrica (CTG), na qual a mudança de peso é registrada em função da temperatura ou tempo; ou como uma curva termogravimétrica derivativa (DTG), em que a primeira derivada da CTG é posta em gráfico em relação à temperatura ou ao tempo. Como características, podem-se obter:

- (a) As porções decrescentes da curva indicam perdas de peso;
- (b) As porções horizontais (platôs) indicam as regiões em que não ocorrem mudanças de peso.

A temperatura é registrada no eixo das abscissas e a ordenada mostra a perda de peso percentual; a escala no eixo das ordenadas pode ser considerada de outras formas:

- 1 – como uma escala de massas verdadeiras;
- 2 – como uma porcentagem de massa total;
- 3 – em termos das unidades de peso moleculares.

Existem fatores que podem afetar os resultados e eles são classificados em dois grupos principais, os de efeitos instrumentais e os de características da amostra:

◆ Fatores instrumentais

- (a) Velocidade de aquecimento: se uma substância é aquecida com uma grande velocidade de aquecimento, a temperatura de decomposição será mais elevada do que a obtida com uma lenta velocidade de aquecimento.
- (b) Atmosfera do forno: a natureza da atmosfera ambiente pode ter um efeito profundo sobre a temperatura de um estágio de decomposição. Normalmente, a função da atmosfera é remover os produtos gasosos que desprendem durante a termogravimetria, a fim de garantir que a natureza do gás ambiental permaneça tão constante quanto possível durante o experimento. Essa condição é obtida em muitas balanças modernas, fazendo-se o aquecimento da amostra em vácuo.

As atmosferas mais usadas são:

1. ar estático;
2. ar dinâmico;
3. gás nitrogênio.

- (c) Geometria do cadinho: a geometria do cadinho pode alterar o coeficiente angular da curva termogravimétrica. Geralmente usa-se o de forma chata.

◆ Características da amostra

Vogel (1981) diz que o peso, o tamanho de partícula e o modo de preparação (a história prévia) de uma amostra governam os resultados da termogravimetria; informa também que algumas das aplicações da termogravimetria importantes para o analista são:

1. As determinações da pureza e da estabilidade térmica, tanto de padrões primários como secundários;
2. A investigação das corretas temperaturas de secagem e adequação das formas de pesagem para a análise gravimétrica;
3. Aplicações diretas a problemas analíticos;
4. A determinação de misturas complexas.

3.10 - Espectroscopia na Região do Infravermelho

Segundo Vogel (2002), a espectroscopia na região do infravermelho (ERIV) é uma das técnicas de espectroscopia vibracional. A região do infravermelho do espectro magnético pode ser dividida em três partes principais:

- Infravermelho próximo, região das harmônicas: entre 0,8 e 2,5 μm ($12\ 500 - 4\ 000\ \text{cm}^{-1}$).
- Infravermelho médio, região de vibração-rotação: entre 2,5 e 50 μm ($4\ 000 - 200\ \text{cm}^{-1}$).
- Infravermelho distante, região de rotação: entre 2,5 e 50 μm ($200 - 10\ \text{cm}^{-1}$).

Ainda segundo Vogel (2002) a região mais interessante usada para fins analíticos está situada entre 2,5 e 25 μm ($4000 - 400\ \text{cm}^{-1}$), divergindo um pouco de Silverstein (2000), que considera a faixa de 2,5 a 15 μm ($4000 - 666\ \text{cm}^{-1}$). Recentemente, as regiões do infravermelho próximo e do infravermelho distante vêm despertando o interesse dos pesquisadores.

É comum exprimir as bandas de absorção em unidades de número de ondas (ν), em centímetros recíprocos (cm^{-1}). As intensidades das bandas são expressas como transmitância (T) ou absorbância (A): a transmitância é a razão entre a energia radiante transmitida por uma amostra e a energia radiante que nela incide; a absorbância (A) é o logaritmo, na base 10, do recíproco da transmitância (T), equação [3.3]:

$$A = \log_{10} (1/T) \quad [3.3]$$

Existem dois modos distintos de vibrações moleculares: as deformações axiais e as deformações angulares. As deformações axiais correspondem aos movimentos rítmicos ao longo do eixo da ligação, de forma que a distância interatômica aumente e diminua alternadamente. As deformações angulares são deslocamentos que ocorrem fora do eixo de ligação e correspondem a variações de ângulos de ligação (Silverstein, 2000).

Para que um modo de vibração apareça no espectro de infravermelho (IV) e absorva a radiação incidente, é essencial que o momento de dipolo mude durante a vibração (Vogel, 2002).

O objetivo da espectroscopia de absorção no IV é a determinação dos grupos funcionais de um dado material. Cada grupo absorve em frequência característica de radiação na região do IV. Assim, num gráfico de intensidade de radiação versus frequência, o espectrograma de IV permite caracterizar os grupos funcionais de um padrão ou de um material desconhecido (Polibrasil, 2005). Os espectros de infravermelho podem ser usados

para identificar compostos puros ou para detecção e identificação de impurezas. Além disso, os compostos inorgânicos têm, freqüentemente, bandas largas, enquanto os compostos orgânicos têm numerosas bandas agudas. De certa forma, o espectro de absorção no infravermelho pode ser olhado como a impressão digital do composto. Assim, para a identificação de um composto puro, o espectro da substância desconhecida é comparado com os espectros de um número limitado de substâncias sugeridas por outras propriedades. Quando os dois espectros são idênticos, a identificação está completa. Para detectar impurezas em uma substância, seu espectro pode ser comparado com o da substância pura (Vogel, 2002).

Os componentes do espectrofotômetro, de feixe duplo, utilizado na determinação de espectros de IV, (Figura 3.8), consistem de cinco partes principais: fonte de radiação, área de amostras, fotômetro, monocromador e detector.

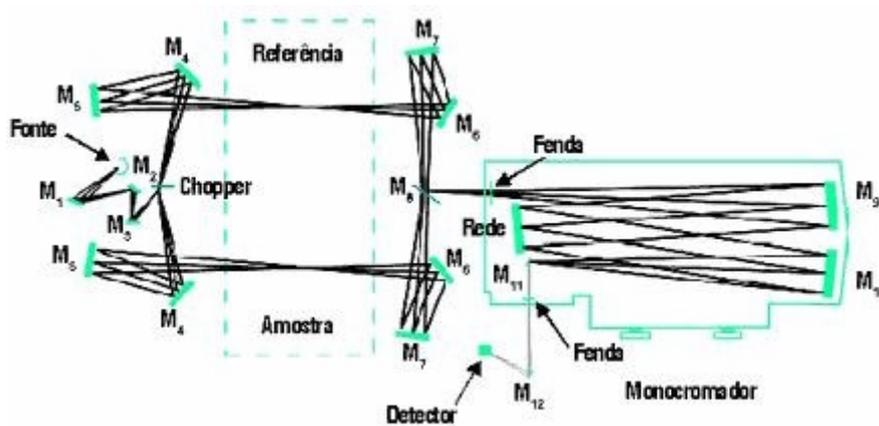


Figura 3.8 - Representação esquemática de um digrama simplificado de um instrumento dispersivo de espectroscopia de infravermelho (Polibrasil, 2005).

A partir de meados dos anos 1980, a técnica tem apresentado evoluções com a substituição gradual de equipamentos que utilizavam espectrofotômetros dispersivos, por espectrofotômetros com Transformada de Fourier (FTIR). Para a região do infravermelho, o método mais importante para a observação do espectro inteiro de uma só vez é a espectroscopia da Transformada de Fourier. A análise de Fourier é um procedimento no qual uma curva é decomposta na soma dos termos seno e co-seno, chamada série de Fourier (Harris, 2001).

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e os métodos empregados no andamento desse trabalho.

4.1 – Materiais

Os principais materiais (resinas e quartzito) utilizados no restauro das pedras de cantaria empregadas como elementos de construção e ou ornamentação nos centenários monumentos de Ouro Preto/MG são:

- ◆ Quartzito itacolomi (itacolomito)
- ◆ Resina PA – 154: constituída de um polímero poliéster ortoftálico, plastificante, conservante, catalisador: peróxido de metil etil cetona.
- ◆ Resina 33411: constituída de um polímero poliéster isoftálico.
- ◆ Resina do grupo epóxi: CMR 029, semiflexível, com catalisador CME 041.

4.1.1 – Descrição da lâmina do quartzito

Retirou-se de um CP(1), usado no ensaio em flexão e, de um CP(2) usado em ensaio de compressão, três lâminas delgadas em cada, para a descrição mineralógica em um microscópio ótico. As lâminas delgadas possuem uma área de aproximadamente (4,0 x 2,5)cm e espessura da ordem de 0,2mm, de acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR12768 (1992). A seguir será descrita a seqüência do material selecionado para a confecção das lâminas: As lâminas 1A e 2A – cortadas no sentido longitudinal paralelo ao plano de foliação, as lâminas 1B e 2B – cortadas no sentido longitudinal perpendicular ao plano de foliação e as lâminas 1C e 2C – cortadas no sentido longitudinal ortogonal ao plano de foliação. A Figura 4.1(a) apresenta o esquema da seqüência de retirada das lâminas no corpo-de-prova de dimensões (20x10x5)cm submetido aos ensaios em flexão, e a Figura 4.1 (b) mostra a seqüência para os submetidos aos ensaios em compressão de formato cúbico de aresta 70cm.

O quartzito itacolomi é um mataarenito e numa análise macroscópica pôde-se observar que possui estratificação cruzada de médio porte cuja faixa de comprimento de onda é de aproximadamente 40cm. A foliação desse rocha em geral faz um ângulo com essa estratificação e ambas se tornam superfícies de fraqueza.

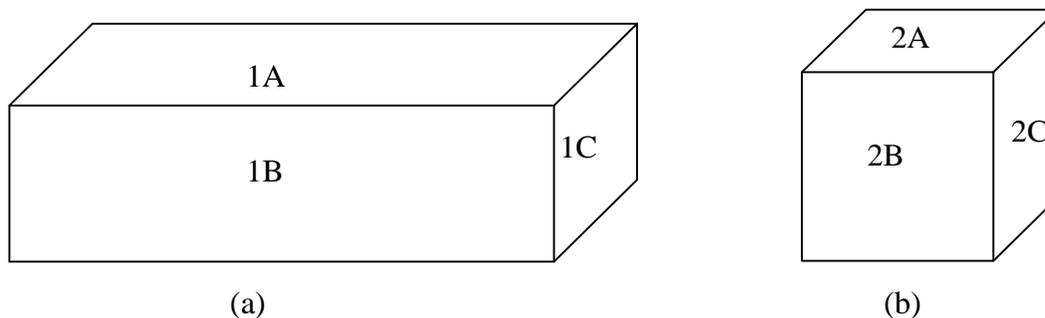


Figura 4.1 – Representação esquemática da seqüência da retirada de lâminas em CPs, para análises microscópicas: (a) CP(1) para ensaios de flexão e (b) CP(2) para os de compressão.

A Figura 4.2(a,b) mostra as fotomicrografias da lâmina 1A. A Figura 4.2(a) mostra os grãos do quartzito e o cimento de sericita que liga os mesmos. A Figura 4.2(b) destaca os contatos retilíneos dos contornos de grãos entre os cristais.

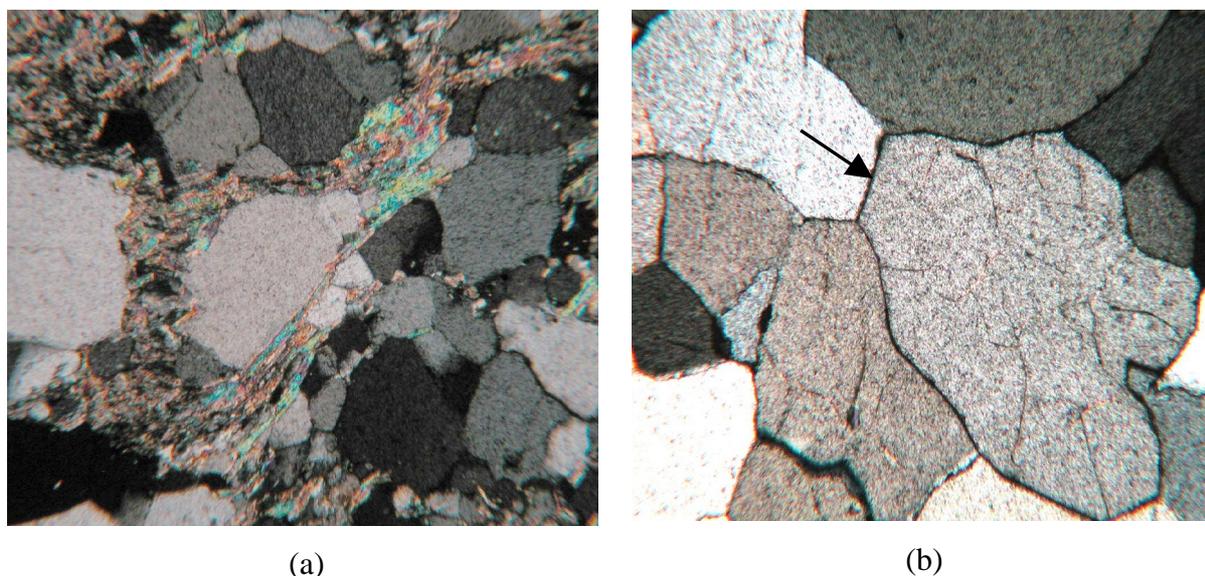


Figura 4.2 – Fotomicrografias de lâminas de um quartzito itacolomi; lâmina 1A; (a) ligação de grãos com cimento (sericita); (b) destaca-se o contato retilíneo dos grãos; polarização cruzada; 10X.

A Figura 4.3 mostra as fotomicrografias das lâminas 1B e 2A. A Figura 4.3(a) mostra os grãos de quartzo e opacos, através da polarização descruzada. A Figura 4.3(b) ilustra a extinção ondulante no grão de quartzo, com inserção da placa λ .

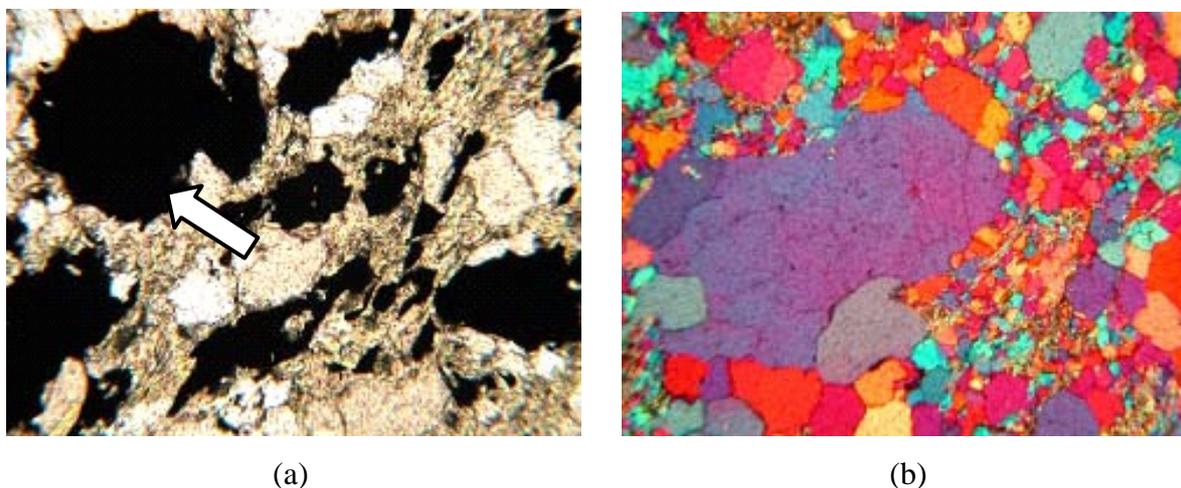


Figura 4.3 – Fotomicrografias de lâminas de um quartzito itacolomi; (a) lâmina 1B - materiais opacos; polarização descruzada; 10X; (b) lâmina 2A - contraste realçando o fenômeno de extinção ondulante em cristais de quartzo (placa λ); 5X.

A Tabela IV.1 apresenta a composição mineralógica volumétrica do quartzito itacolomi observada microscopicamente por Campos e Neves (2005).

Tabela IV.1 – Composição mineralógica observada microscopicamente em % volumétrica.

| Composição/Lâmina | 1 A | 1 B | 1C | 2 A | 2 B | 2 C |
|-------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|
| Quartzo | 90 | 85 | 85 | 87 | 80 | 85 |
| Sericita | 10 | 13 | 15 | 13 | 17 | 10 |
| Opacos | – | 2 | – | – | 3 | 5 |

A densidade foi calculada, medindo-se as dimensões de cada corpo-de-prova com um paquímetro de aproximação 1/20mm, para calcular o volume e, pesou-se cada um deles numa balança eletrônica. A Tabela IV.2 apresenta os valores da densidade de cada corpo-de-prova de quartzito usado nos ensaios em flexão. Pode-se observar que o valor da densidade razoável para uma rocha abrange a faixa de 2,5 a 2,7 g/cm³. Os valores da densidade do quartzito encontrados por Ferreira (1991) variaram de 2,42g/cm² a 2,67g/cm².

Tabela IV.2 – Densidade dos CPs usados nos ensaios em flexão.

| CP | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 01i | 02i | 03i | 04e | 05e | 06e |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| Densidade(g/cm ³) | 2,62 | 2,66 | 2,69 | 2,63 | 2,67 | 2,67 | 2,55 | 2,64 | 2,7 | 2,65 | 2,69 | 2,68 | 2,69 | 2,62 |

4.1.2 - Preparação de corpos-de-prova

Para a preparação de corpos-de-prova (CPs) foi utilizada uma furadeira de impacto com broca de vidia de diâmetro $\phi 14\text{mm}$ e 260mm de comprimento. Os furos foram feitos em linha reta acompanhando o plano de foliação da rocha e espaçados de 10 em 10cm, com 26cm de profundidade, conforme Figura 4.4. Em seguida a rocha foi partida com talhadeira e levada para ser serrada.

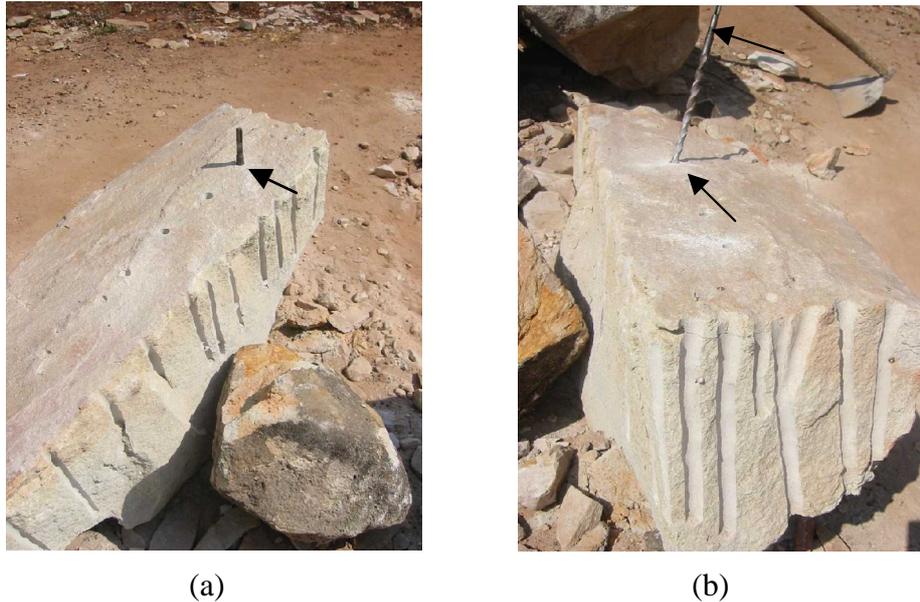


Figura 4.4 – Preparação da rocha para corte de corpos-de-prova.

Uma das extremidades da rocha, em 1º plano, foi separada para se ter acesso à parte mais sadia da mesma (menos afetada pelo intemperismo), Figura 4.5.



Figura 4.5 – Obtenção de material para confecção de CPs, em 1º plano, porção que foi desprezada; em 2º plano: porção que deu origem aos CPs.

O início de penetração era um pouco mais rápido numa espessura aproximada de 15cm. Gastavam-se em torno de 25 minutos para efetuar os furos a partir do corte de onde foi separada uma das extremidades (parte mais sadia). A partir de mais ou menos três quartos do início dos furos a rocha apresentava-se bem mais macia. O tempo despendido nos últimos furos próximos da outra extremidade que se encontrava mais exposta era de aproximadamente cinco minutos.

O bloco de rocha foi cortado inicialmente em chapas de espessura 10cm, 7cm e 3cm em uma serra circular com disco diamantado (diâmetro 80cm) e altura útil de corte 40cm. Os corpos-de-prova foram cortados em uma serra circular de disco diamantado (diâmetro 35cm) e altura útil de corte 10cm. Os corpos-de-prova foram cortados nas máquinas das empresas OPPS (Ouro Preto Pedra Sabão) sediada em Cachoeira do Campo e Granicar em Ouro Preto.

Os corpos-de-prova foram preparados para o ensaio de flexão de acordo com a norma NBR12763 (1992), com as dimensões de (20 x 10 x 5)cm, com superfícies planas e paralelas (Figura 4.6).

Oito (8) corpos-de-prova foram preparados e colados com a resina poliéster ortoftálica PA-154, três (3) foram colados com a resina poliéster isoftálica 3341 e três (3) colados com a resina epóxi CRM028.

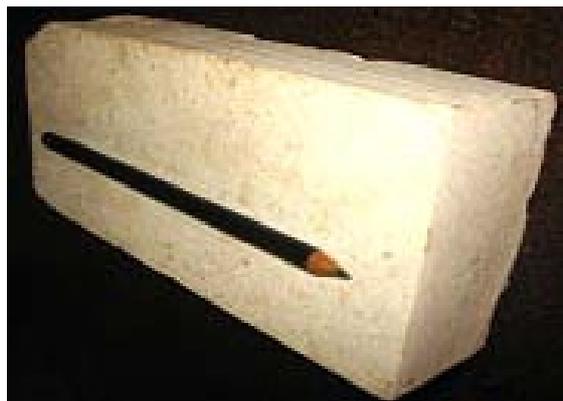


Figura 4.6 – CP prismático para ensaios de flexão com as dimensões (20x10x5)cm, norma (NBR12763, 1992).

Foram preparados para o ensaio de compressão sete corpos-de-prova com as dimensões exigidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR12767 (1992). O formato é cúbico com arestas de 7,0cm, conforme Figura 4.7. Foram garantidos que os ângulos formados entre as duas faces consecutivas fossem de $90^{\circ} \pm 3^{\circ}$. Os corpos-de-prova foram retirados em ordem do bloco selecionado a partir da parte mais sadia (CP₁) para a parte mais deteriorada (CP₇).



Figura 4.7 – CP para ensaio de compressão uniaxial; dimensões cúbicas de 7cm; Norma NBR12767 (1992).

O ensaio de impacto seguiu a orientação da norma da ABNT, NBR 12764(1992). Foram confeccionados para o ensaio nove (9) CPs na forma de placas com dimensões (20x20x3)cm e com superfícies paralelas, conforme Figura 4.8.



(a)



(b)

Figura 4.8 – CP para ensaio de impacto de corpo duro; dimensões de (20x20x3)cm; Norma NBR12764 (1992).

4.1.3 – Seleção de amostras para a análise térmica

A análise térmica e a análise da espectroscopia de infravermelho de uma resina são alguns dos métodos para verificar a deterioração da resina com o passar do tempo de sua aplicação.

Foram analisadas as seguintes amostras:

- R89I: amostra de resina retirada na parte de trás do Museu da Inconfidência de Ouro Preto/MG (MIOP), em 1989, essa resina foi usada pelo mestre canteiro José Raimundo Pereira “seu Juca da cantaria” para colar um bloco de rocha que estava faltando; esta resina foi retirada do interior da junção das rochas. Salienta-se que em 1989 o Museu passou por uma restauração.
- R89E: idem à amostra R89I, porém esta resina se encontrava exposta às intempéries.
- R89G: amostra de resina usada para colar as grades das janelas do pátio interno do MIOP,
- R98: amostra de resina usada para colar uma bacia de chafariz produzida durante a oficina de cantaria realizada pela Fundação de Arte de Ouro Preto (FAOP), em 1998.
- R99: amostra de resina, de 1999, usada para colar uma bola de quartzito produzida durante a oficina de cantaria realizada pela FAOP. Esta bola faz parte da ornamentação da escadaria da Igreja de Santa Efigênia e substitui uma bola que foi construída de cimento “*Portland*”, bola esta que substituíra uma original de quartzito que se encontrava deteriorada.
- R04: amostra de resina, de 2004, que foi utilizada para colar os corpos-de-prova do quartzito submetidos a ensaios para a determinação da resistência à flexão. O bloco foi removido da encosta da Serra do Itacolomi.
- R05: amostra de resina preparada no dia 13/10/2005 para ser usada como parâmetro de comparação da deterioração das amostras anteriores.

O peso do corpo-de-prova para análise térmica deve variar entre 5mg e 8mg, é possível medir pesos de amostras pequenas (1 – 10) mg, na microbalança eletrônica sensível incorporada ao aparelho (Vogel, 1981). A amostra é colocada num cadinho de alumina e levada ao aparelho para análise usando uma taxa de 20°C/minuto até atingir uma temperatura de 700°C na atmosfera de oxigênio. O tempo de duração do ensaio é de aproximadamente 35 minutos.

O material da amostra (mistura de resina e Quartzito) para análise da espectroscopia de infravermelho é moído em um almofariz e pistilo – tipo pilão –, transformado em pó, misturado com KBr e prensado em forma de pastilha para, então ser levado ao aparelho.

4.2 – Métodos

A amostra foi retirada de um bloco de quartzito que se encontrava na encosta da Serra do Itacolomi numa região denominada “Pocinho” em Ouro Preto/MG, conforme os dados a seguir:

- Sítio de origem – Encosta NW da Serra do Itacolomy.
- Localização da amostra feita por Campos (2005):

20° 24' 32",7 656,638 Latitude Sul
43° 29' 56",4 7742,555 Longitude Oeste
Elevação: 1185,0 m

A Serra do Itacolomi está localizada no Quadrilátero Ferrífero cuja extensão territorial é de aproximadamente 7000 km². As suas fronteiras são delimitadas pelas cidades de Itabira à nordeste, Mariana à sudeste, Congonhas do Campo à sudoeste e Itaúna à noroeste. Essa região durante o século XVIII tornou-se um dos locais usados para retirar rochas empregadas nas construções de prédios residenciais, religiosos e governamentais tais como o Palácio dos Governadores (Atual Escola de Minas) e Casa de Câmara e Cadeia (Atual Museu da Inconfidência) . Estas rochas encontram-se bastante deterioradas, por estarem expostas ao intemperismo e a outros tipos de ambientes agressivos. Tais ambientes provocam sua degradação após 250 anos do uso dessas rochas nas construções de monumentos das cidades históricas mineiras. A Figura 4.9 mostra vestígios de uma antiga jazida, onde se pode perceber os blocos de rocha que foram parcialmente trabalhados, com tipo de extração ainda rudimentar na região denominada “Pocinho”, Ouro Preto/MG.



(a)



(b)

Figura 4.9 – Rocha em estado bruto (Pocinho/Ouro Preto/MG); vestígios de que os blocos foram parcialmente trabalhados.

A sua remoção foi efetuada depois de uma solicitação oficial da Diretora do CEFET- OP ao Diretor do Parque Itacolomy, pois ela se encontrava na área de proteção ambiental. Essa remoção somente foi permitida por que ela não se encontrava no seu local de origem. A Figura 4.10 mostra o local de onde foi retirado o bloco de rochas para confecção dos CPs.



(a)



(b)

Figura 4.10 – Local de origem da rocha usada para confecção dos CPs.

4.2.1 – Ensaio de resistência à flexão

Para apoiar os CPs durante o ensaio, foram usinados três cilindros de aço do tipo AISI 4340, torneados na oficina mecânica do CEFET – OP, com as seguintes dimensões: diâmetro $\phi 35\text{mm}$ e comprimento 60mm, conforme Figura 4.11 e, posteriormente, passaram pelos tratamentos de têmpera e revenimento no Laboratório de Tratamentos Térmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas/UFOP.



Figura 4.11 – Cilindros usados no dispositivo dos ensaios em flexão.

A relação entre o diâmetro do cilindro e a espessura do CP obedeceu ao critério estabelecido pela norma da *American Society for Testings and Materials* ASTM (E.399/90):

$$W/2 < D < W \quad [4.1]$$

Onde:

D = diâmetro do cilindro;

W = espessura do CP.

Os ensaios de flexão foram realizados na máquina MTS 810, sevo-hidráulica, do Laboratório de Ensaio Mecânicos do DEMET – UFOP. Adaptou-se um dispositivo nas garras para o ensaio de flexão, de acordo com a Figura 4.12.



Figura 4.12 – Adaptação do dispositivo usado para os ensaios de flexão (a); detalhe do dispositivo e aplicação da carga inicial (b).

Uma pequena carga inicial, Figura 4.12 (b) é aplicada para promover a estabilidade do sistema (CP, dispositivo e prensa). A aplicação da carga deve ser de forma lenta e progressiva até obter a ruptura do CP a uma taxa de 4500N/min, conforme a norma NBR12763 (1992).

4.2.2 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial

As Figuras 4.13 mostram os ensaios de compressão realizados na máquina de compressão (PAVITEST) do Laboratório de Materiais de Construções da Área de Edificações do CEFET/OP.



(a)



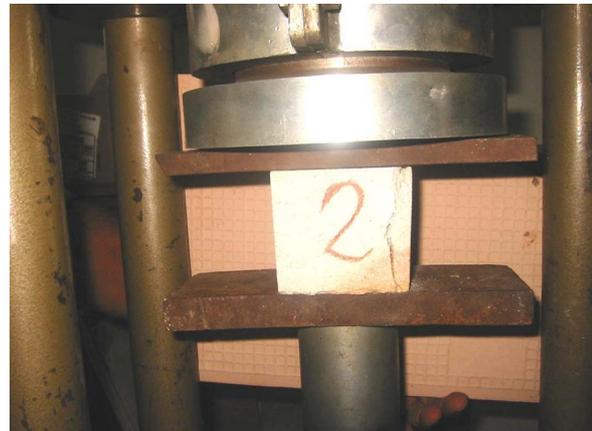
(b)

Figura 4.13 – Ajuste de prato no ensaio de compressão (a); controle do tempo (b).

A Figura 4.14 mostra o rompimento dos CPs 1 (a), 2 (b) e 4 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.14 – CPs rompidos em ensaios de compressão; (a) CP₁; (b) CP₂ e (c) CP₄ .

Uma pequena carga inicial é aplicada para promover o ajuste dos pratos da prensa com o corpo-de-prova (Figura 4.14(a,b)). A aplicação da carga deve ser de forma lenta e progressiva até obter a ruptura do CP a uma taxa de aproximadamente 0,6 MPa/s, conforme Norma NBR12767 (1992). A taxa usada foi de 0,57 MPa/s.

4.2.3 – Ensaio de resistência ao impacto

A Figura 4.15(a,b,c) mostra o equipamento para ensaios de impacto realizados na máquina PATTROL, do Laboratório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Civil–DECIV e Departamento de Engenharia Geológica-DEGEO da UFOP.

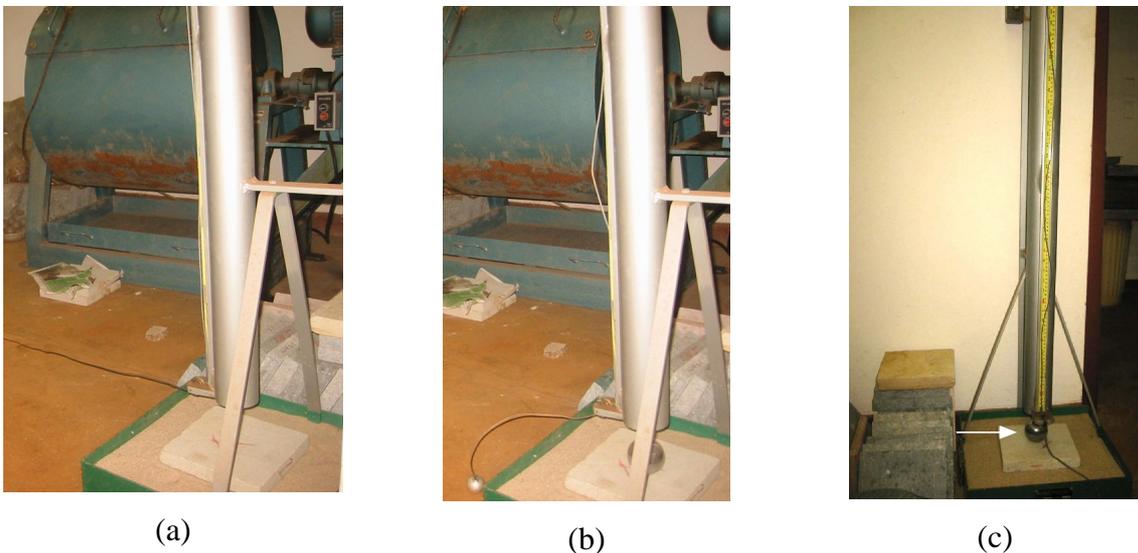


Figura 4.15 – Equipamento para ensaios de impacto com esfera (seta).

4.2.4 – Análise térmica

A análise térmica da resina foi feita no Laboratório de Análise Térmica do Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, ICEB/UFOP. O aparelho utilizado foi marca TA *Instruments*, modelo STD 2960 *simultaneous* DTA-TGA.

4.2.5 – Análise de espectroscopia na região de infravermelho (FTIR)

A análise de espectroscopia na região de infravermelho foi feita no laboratório de espectroscopia do Departamento de Química - DEQUI/ICEB/UFOP. O aparelho utilizado foi marca NICOLET, modelo *Impact* 410, que usa o método da Transformada de Fourier.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Serão apresentados os resultados dos valores obtidos neste trabalho, durante os ensaios com o quartzito itacolomi, sob flexão sem estar colado e colado, com a resina poliéster ortoftálica PA-154, resina poliéster isoftálica 33411 e resina epóxi CMR028 com catalisador CME041, e os resultados dos demais ensaios realizados.

5.1 – Ensaios de Resistência em Flexão com Resina Ortoftálica

Corpos-de-prova de dimensões (20x10x5) cm foram submetidos aos ensaios em flexão de acordo com a norma NBR12763. Os esforços foram efetuados ortogonalmente em relação à superfície de foliação da rocha (xistosidade), onde se aplicou uma carga de forma lenta e progressiva até obter a ruptura do CP a uma taxa de 4500 N/min. A Tabela V.1 apresenta os valores obtidos nos ensaios de flexão do quartzito sem estar colado.

Tabela V.1 – Valores obtidos dos ensaios em flexão do quartzito sem estar colado.

| | CP ₀₁ | CP ₀₂ | CP ₀₃ | CP ₀₄ | CP ₀₅ | CP ₀₆ | CP ₀₇ | CP ₀₈ |
|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Deslocamento(mm) | 0,951 | 0,299 | 0,741 | 0,952 | 0,720 | 0,879 | 0,727 | 0,834 |
| Carga (kgf) | 127 | 195 | 221 | 296 | 529 | 513 | 136 | 202 |
| σ (MPa) | 2,12 | 2,17 | 2,3 | 3,19 | 4,61 | 4,42 | 1,22 | 1,84 |

A partir da Tabela V.1, foi gerado o gráfico da Figura 5.1 - carga de ruptura versus deslocamento do cutelo no corpo-de-prova do quartzito sem estar colado.

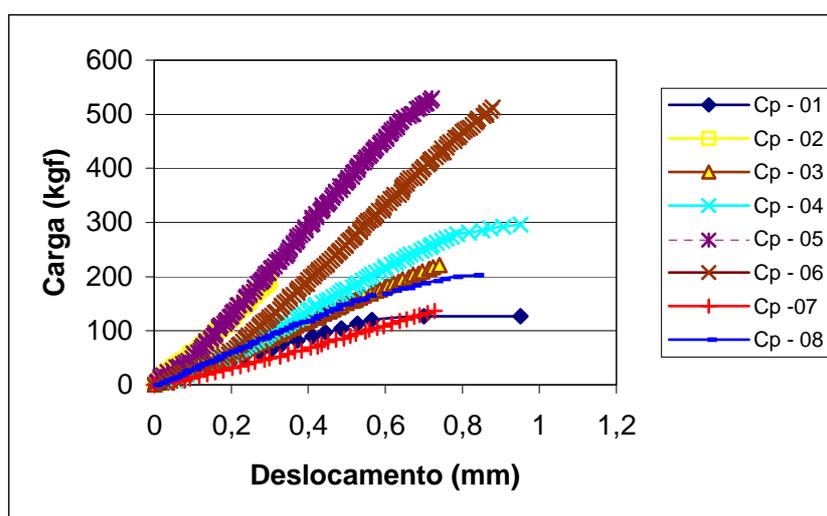


Figura 5.1 – Gráfico carga x deslocamento para CPs de quartzito itacolomi em ensaios de flexão; sem colar.

Após o rompimento dos corpos-de-prova estes foram colados na região onde houve o rompimento com a resina de poliéster insaturada ortoftálica, PA-154, empregada por um profissional em cantaria (“mestre Juca”) em restaurações de monumentos. A resina é misturada com o pó do quartzito na razão de um terço de pó aproximadamente, para torná-la mais densa. Usando as palavras do mestre Juca “apenas para a resina não correr”.

Os corpos-de-prova foram novamente submetidos ao ensaio de flexão nove dias após terem sido colados onde constatou-se que todos romperam fora da região da resina (cola).

Pode-se observar na Figura 5.2 que os planos de ruptura nos ensaios em flexão dos CPs colados com a resina, normalmente, ficaram paralelo ao plano de ruptura no ensaio sem a resina e que ocorreram a aproximadamente 90° em relação a superfície onde foi aplicada a força. Não apresentaram este comportamento apenas os CP₄ e CP₇, Figura 5.5(c,d).



Figura 5.2 – CP₁(a) e CP₅(b) rompidos fora da região colada com a resina no ensaio de flexão.

A Tabela V.2 apresenta os valores dos resultados obtidos dos ensaios em flexão do quartzito colado com a resina poliéster insaturada ortoftálica, PA-154.

Tabela V.2 – Valores obtidos dos ensaios em flexão dos CPs colados com resina ortoftálica.

| | CP _{01C} | CP _{02C} | CP _{03C} | CP _{04C} | CP _{05C} | CP _{06C} | CP _{07C} | CP _{08C} |
|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Deslocamento(mm) | 1,055 | 0,707 | 0,634 | 0,827 | 0,693 | 0,669 | 0,707 | 0,775 |
| Carga(kgf) | 126 | 297 | 180 | 244 | 460 | 382 | 173 | 169 |
| σ (MPa) | 2,11 | 3,31 | 1,87 | 2,42 | 4,01 | 3,3 | 1,55 | 1,54 |

A partir da Tabela V.2, foi gerado o gráfico da Figura 5.3 carga aplicada *versus* deslocamento do cutelo no corpo-de-prova de quartzito em ensaio de flexão depois de colado com a resina ortoftálica PA-154.

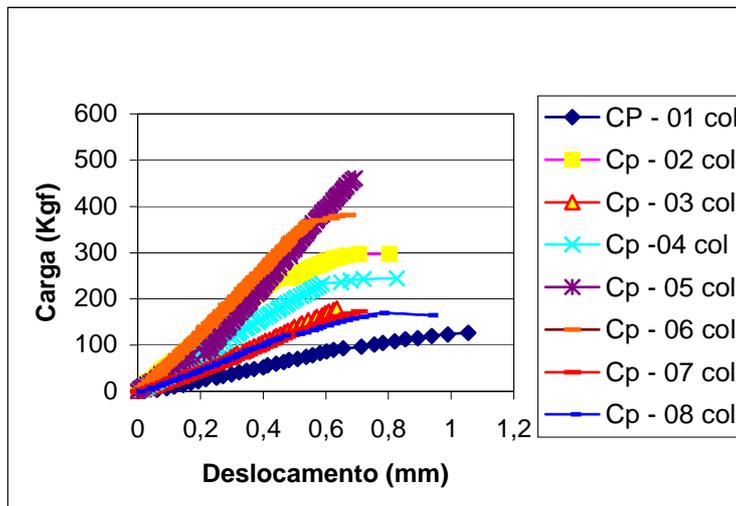


Figura 5.3 – Gráfico carga x deslocamento para CPs de quartzito itacolomi, colados com resina ortoftálica, em ensaios de flexão.

A partir das Tabelas V.1 e V.2, foi construído o gráfico comparativo de cargas de ruptura do quartzito sem colar e colado com a resina ortoftálica, Figura 5.4.

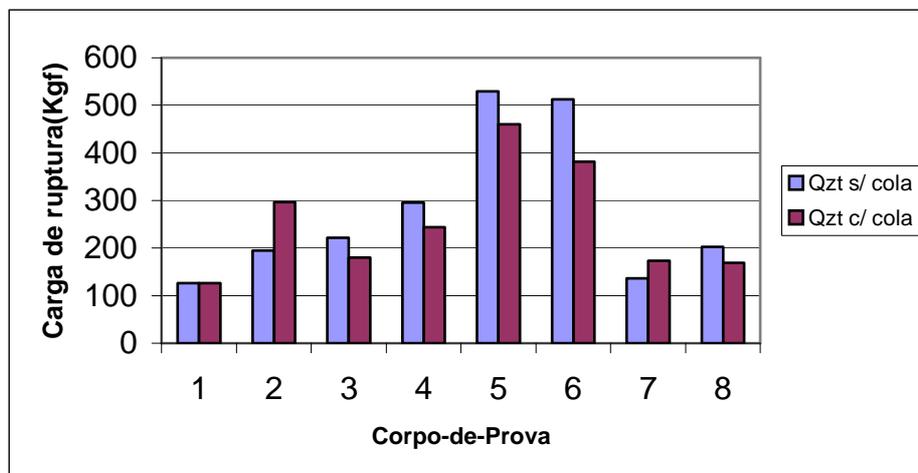


Figura 5.4 – Gráfico comparativo dos valores das cargas de ruptura para os CPs de quartzito, sem colar e colado com resina ortoftálica, em ensaios de flexão.

Notou-se que houve muita dispersão nos resultados, pois a rocha apresenta uma composição química muito variada. No decorrer do processo de decomposição o bloco não se comporta de maneira homogênea, gerando um comportamento anisotrópico. Sua superfície esteve sujeita ao intemperismo e, portanto, numa inspeção visual, constatou-se que a porção interna do bloco de rocha apresentou-se menos deteriorada que a externa. Os grãos de quartzo da superfície soltavam-se com o atrito manual e da porção interna estavam mais coesos.

Uma amostra de quartzito que pode ser considerada como inalterada pelo intemperismo, em geral apresenta uma porosidade total em torno de 5 – 10 % do volume. Esta é a referência para um quartzito inalterado pelo intemperismo, independentemente da cor ou do tamanho de grão (Ideas, 1992).

O plano de ruptura do CP₄, Figura 5.5 (a) ocorreu a aproximadamente 30° em relação ao plano da superfície. O plano de ruptura do CP₇, Figura 5.5 (b), ocorreu aproximadamente 45° em relação ao deslocamento do cutelo. A causa específica do fenômeno de manchamento ainda permanece especulativa. Entretanto, a presença de minerais com ferro sugere que o manchamento resulta da mudança do estado de oxidação do ferro natural da rocha (Fe²⁺ para Fe³⁺) (Frasca, 2005). O manchamento ferruginoso de cor rosada no CP₇ pode ser causada por percolação de água que acompanha os planos de foliação. A superfície da trinca do CP₂ é paralela e acompanha as ondulações originadas na formação do quartzito., Na parte inferior houve um desvio e é o único caso em que o rompimento trespassou a resina. A rocha do CP₂ encontra-se muito alterada pelo intemperismo.

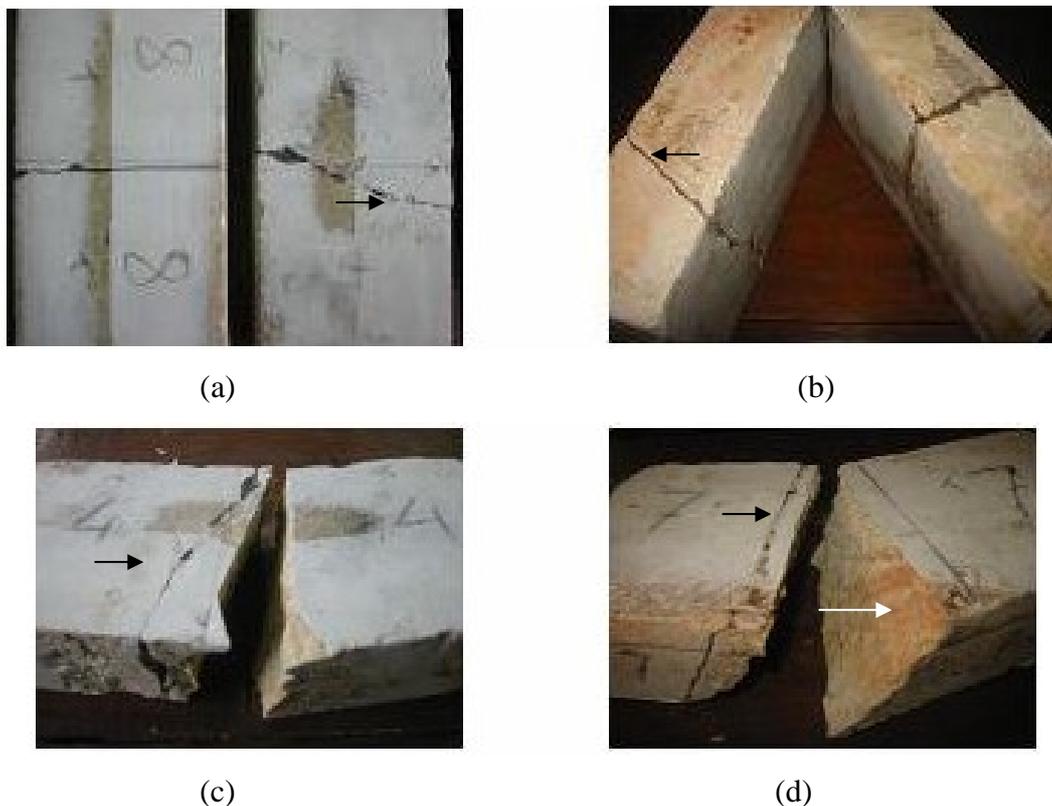


Figura 5.5 – CPs rompidos após colados com a resina poliéster ortoftálica: (a) e (c) rompimento a 30° em relação ao plano da superfície; (b) e (d) rompimento a 45° em relação ao deslocamento do cutelo.

Para confirmar as discrepâncias observadas no gráfico da Figura 5.4, a partir das Tabelas V.1 e V.2, foi construído o gráfico comparativo dos deslocamentos do cutelo nos corpos-de-prova de quartzito sem colar e colado, Figura 5.6.

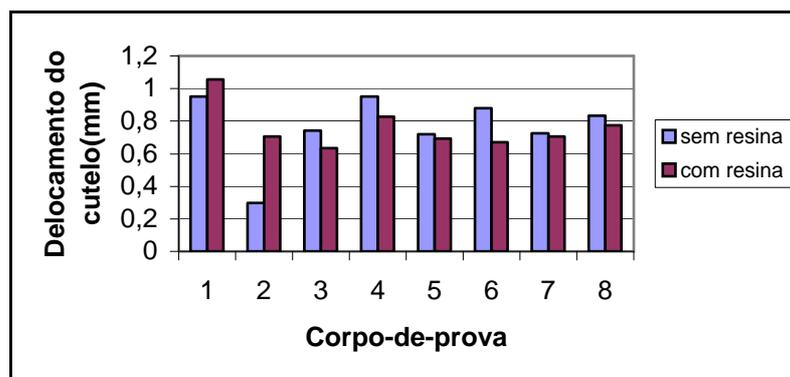


Figura 5.6 – Gráfico comparativo de deslocamento do cutelo em CPs de quartzito sem colar e colado em ensaios de flexão.

A Tabela V.3 apresenta os valores obtidos nos ensaios em flexão referentes ao tempo de ruptura de cada corpo-de-prova de quartzito.

Tabela V.3 – Valores dos tempos obtidos para a ruptura dos corpos-de-prova de quartzito.

| Tempo (s) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sem resina | 23,11 | 27,61 | 32,62 | 41,61 | 72,62 | 69,62 | 20,12 | 28,62 |
| Com resina | 18,11 | 41,11 | 25,61 | 34,11 | 63,12 | 53,00 | 24,50 | 24,10 |

A partir da Tabela V.3 foi gerado o gráfico da Figura 5.7, com os valores comparativos do tempo de ruptura, do quartzito em ensaio de flexão sem estar colado e depois de colado com a resina poliéster ortoftálica. Pode-se observar a coerência com os dados obtidos no gráfico da carga de ruptura, Figura 5.3.

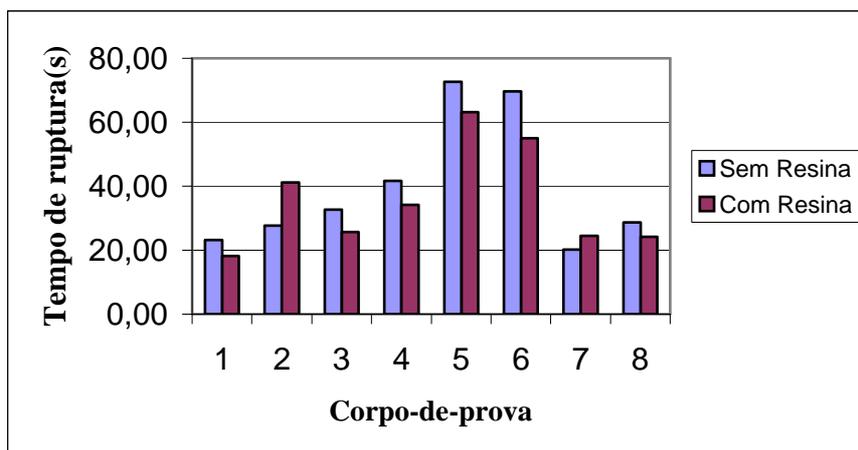


Figura 5.7 – Gráfico comparativo de tempo de ruptura para CPs de quartzito sem colar e colado em ensaios de flexão.

5.2 – Ensaio de Resistência em Flexão com Resina Isoftálica e Epóxi

Foram preparados corpos-de-prova de acordo com a norma NBR 12763 - ABNT (1992). Os corpos-de-prova foram rompidos e três colados com a resina isoftálica (i) e três colados com a resina epóxi (e). Para os ensaios nos corpos-de-prova colados com as resinas isoftálica e epóxi, seguiram-se os mesmos procedimentos adotados para os ensaios dos CPs colados com a resina ortoftálica. Mudou-se apenas o tipo de resina para fazer comparações.

Segundo Kotasek (2003), embora as resinas epóxi estejam disponíveis comercialmente desde os anos 1940, somente na última década são utilizadas para consolidar e proteger as superfícies de chapas e rochas ornamentais. São superiores às resinas poliésteres que já foram por muitos anos usadas para beneficiar chapas de mármore. E, ainda, epóxi oferece melhor resistência mecânica, química e térmica, tem também melhor poder de adesão. Agrega um valor maior às rochas ornamentais pela melhoria na qualidade do processado tais como o aumento do brilho e maior destacamento de cor. Mais do que isso é possível desenhar a fórmula epóxi para destacar características desejáveis. Maior versatilidade é oferecida porque dois constituintes são envolvidos e as propriedades finais serão uma contribuição da resina e agentes de cura. Agentes de cura ou endurecedores são produtos químicos que na presença de resinas epóxis, reagem formando um polímero com características próprias. Existe ainda uma grande quantidade de agentes de cura que agregam características próprias às resinas.

A Tabela V.4 apresenta os valores obtidos nos ensaios em flexão dos corpos-de-prova de quartzito sem estar colado.

Tabela V.4 – Valores obtidos dos ensaios em flexão de CPs de quartzito sem colar.

| CPs | 1i | 2i | 3i | 4e | 5e | 6e |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Deslocamento (mm) | 0,937 | 0,806 | 0,851 | 0,841 | 0,782 | 0,896 |
| Carga(kgf) | 468 | 488 | 321 | 476 | 460 | 285 |
| σ (MPa) | 4,91 | 5,10 | 3,51 | 4,92 | 4,90 | 3,00 |

A partir da Tabela V.4, foi gerado o gráfico de carga aplicada versus deslocamento do cutelo nos ensaios em flexão dos corpos-de-prova de quartzito sem estar colado da Figura 5.8.

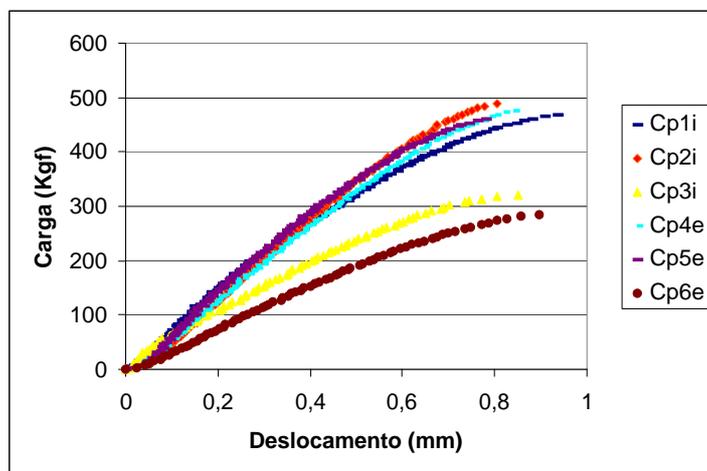


Figura 5.8 – Gráfico da carga x deslocamento para CPs de quartzito sem colar em ensaios de flexão.

A Tabela V.5 apresenta os valores obtidos dos ensaios em flexão dos corpos-de-prova 1i, 2i, 3i colados com a resina poliéster isoftálica e 4e, 5e, 6e colados com resina epóxi e o gráfico da Figura 5.9 as curvas resultantes.

Tabela V.5 – Valores obtidos dos ensaios em flexão dos CPs de quartzito colados com as resinas poliéster isoftálica e epóxi .

| CPs Colados | 1i | 2i | 3i | 4e | 5e | 6e |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Deslocamento (mm) | 0,820 | 0,703 | 0,717 | 0,713 | 0,813 | 0,882 |
| Carga(kgf) | 439 | 500 | 308 | 445 | 461 | 295 |
| σ (MPa) | 4,61 | 5,22 | 3,36 | 4,59 | 4,91 | 3,1 |

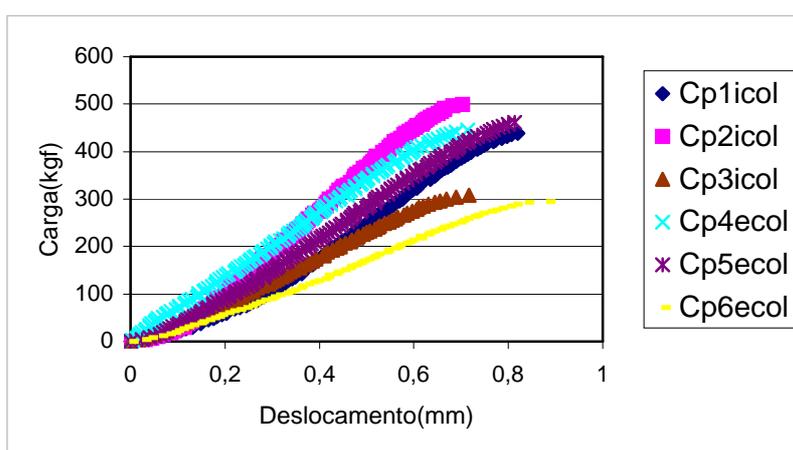


Figura 5.9 – Curvas carga x deslocamento para CPs de quartzito após colados com resina poliéster isoftálica e epóxi, em ensaio de flexão.

O gráfico da Figura 5.10, foi gerado com os valores das cargas das Tabelas V.4 e V.5. Ele mostra os valores comparativos da carga de ruptura dos corpos-de-prova do quartzito sem estar colados e depois de colados com a resina poliéster isoftálica e epóxi .

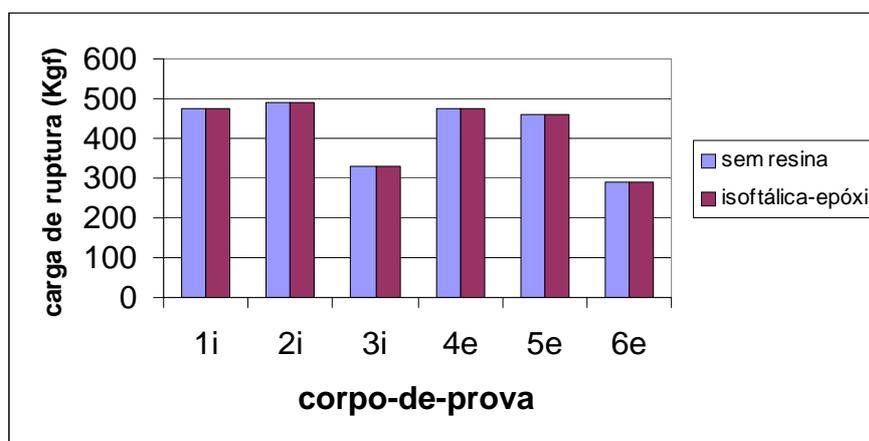


Figura 5.10 – Gráfico comparativo dos valores das cargas de ruptura dos CPs de quartzito sem estar colados e depois de colados com resina poliéster isoftálica e epóxi.

A Tabela V.6 mostra a localização dos corpos-de-prova de quartzito itacolomi (20x10x5)cm, que foram colados com resina poliéster isoftálica e epóxi, na placa A da rocha. Observou-se que os resultados ficaram mais uniformes e sem as anomalias apresentadas nos oito primeiros CPs colados com resina ortoftálica. Essa placa encontrava-se mais protegida do intemperismo.

Tabela V. 6 – Localização dos CPs de quartzito (flexão), na placa A da rocha.

| Chapa da rocha | Parte externa | Parte Central | Parte interna |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| A | CP ₀₃ | CP ₀₂ | CP ₀₁ |
| A | CP ₀₆ | CP ₀₅ | Cp ₀₄ |

A Tabela V.7 apresenta a composição mineralógica volumétrica observada microscopicamente por Campos e Neves (2005).

Tabela V.7 – Composição mineralógica em porcentagem volumétrica observada microscopicamente (Campos e Neves, 2005).

| Composição/Lâmina | 1 A | 1 B | 1C | 2 A | 2 B | 2 C | 1 | 2 |
|-------------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-------|-------|
| Quartzo % | 90 | 85 | 85 | 87 | 80 | 85 | 85-90 | 80-87 |
| Sericita % | 10 | 13 | 15 | 13 | 17 | 10 | 10-15 | 10-17 |
| Opacos % | – | 2 | – | – | 3 | 5 | 0-2 | 0-5 |

5.3 – Ensaios de Resistência à Compressão Uniaxial

Os CPs com formato cúbico e dimensões das arestas (7x7x7)cm foram submetidos aos ensaios em compressão de acordo com a norma NBR12767 (1992), onde se efetuou o carregamento de modo lento e progressivo a uma taxa de 0,57MPa/s até obter o rompimento do CP. A Tabela V.8 apresenta os valores obtidos nos ensaios em compressão do quartzito e a Tabela V.9 mostra a seqüência em que os CPs (7x7x7)cm de quartzito, usados no ensaio de impacto do corpo duro, se encontravam na chapa E do bloco de rocha.

Tabela V.8 – Valores obtidos dos ensaios em compressão dos CPs de quartzito.

| CP | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Carga (kgf) | 52000 | 49200 | 46200 | 46200 | 33600 | 30900 | 26000 |
| Tempo (s) | 165” | 135” | 165” | 165” | 150” | 150” | 135” |

Tabela V.9 – Localização dos CPs de quartzito (compressão), na placa E da rocha.

| | | | | | | | |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Chapa E | CP ₀₁ | CP ₀₂ | CP ₀₃ | CP ₀₄ | CP ₀₅ | CP ₀₆ | CP ₀₇ |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|

A partir da Tabela V.8, foi gerado o gráfico da carga para colapso de CPs no ensaio de compressão, Figura 5.11.

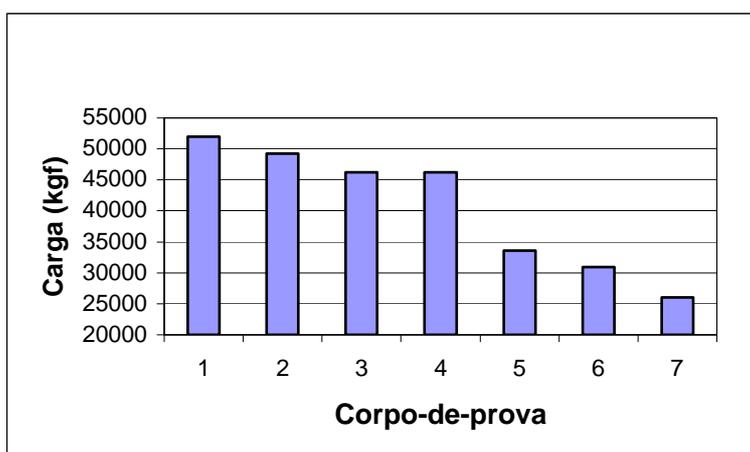


Figura 5.11 – Gráfico de carga para colapso de CPs de quartzito em ensaio de compressão.

Pode-se observar que a carga suportada pelo CP₀₁, situado na parte interna do bloco de rocha, antes de entrar em colapso é muito maior que a carga suportada pelo CP₀₇, situado na superfície.

5.4 – Ensaio de Resistência ao Impacto de Corpo Duro

Os corpos-de-prova preparados na forma de placa com dimensões (20x20x3)cm e superfícies paralelas foram submetidos a ensaios ao impacto do corpo duro de acordo com a norma NBR12764 (1972). A Tabela V. 10 apresenta a localização dos corpos-de-prova no bloco da rocha e a Tabela V.11 apresenta os valores da altura da esfera obtidos até surgir a primeira trinca nos corpos-de-prova de quartzito em ensaio de impacto.

Tabela V. 10 – Localização dos CPs de quartzito (impacto), nas placas B,C e D da rocha.

| Chapas da rocha | Parte deteriorada | Parte central | Parte “sadia” |
|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|
| B | CP ₃ | CP ₂ | CP ₁ |
| C | CP ₆ | CP ₅ | CP ₄ |
| D | CP ₉ | CP ₈ | CP ₇ |

Tabela V.11 – Valores das alturas da esfera obtidos nos ensaios de impacto.

| Corpos-de-prova | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 |
|-----------------------|-----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|
| Altura da esfera (cm) | 100 | 135 | 90 | 115 | 85 | 115 | 90 | 115 | 100 |

A partir da Tabela V.11, foi gerado o gráfico da altura da esfera até o aparecimento da primeira trinca nos corpo-de-prova do quartzito em ensaio de impacto, Figura 5.12. Pode-se observar que os resultados apresentados foram relativamente uniformes.

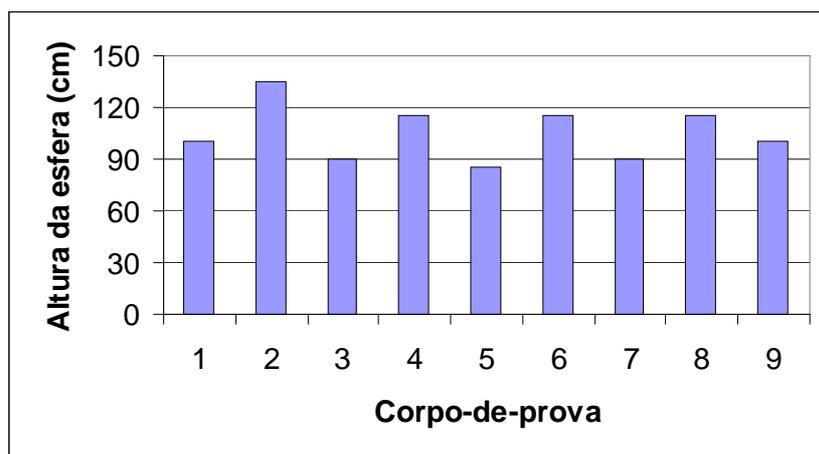


Figura 5.12 – Altura da esfera para surgir a primeira trinca nos CPs em ensaio de impacto.

A máquina de impacto foi usada até seu último recurso, altura máxima da esfera de aço, no intuito de romper o CP₀₈; no entanto, essa tentativa não foi possível, pois a trinca aumentava cada vez mais e o CP não se rompia, por apresentar uma certa flexibilidade que é característica desse quartzito. A Figura 5.13 mostra a tentativa de romper o CP₈.

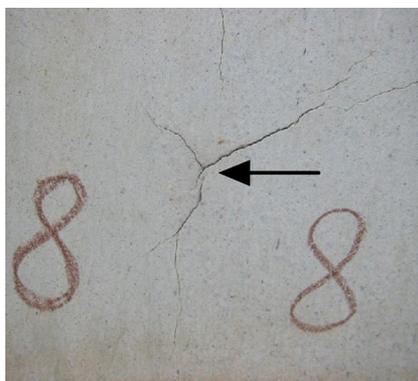


Figura 5.13 – Fotografia do CP₈ após ensaio de impacto de corpo duro; destacam-se trincas.

5.5 – Análise de Espectroscopia na Região do Infravermelho

A análise dos espectros de infravermelho mostra diferenças significativas em relação à presença de diferentes grupos funcionais nas resinas com o passar do tempo. O equipamento utilizado para analisar as amostras na região de infravermelho usa espectrofotômetros com transformada de Fourier (FTIR).

A Tabela V.12 mostra as principais bandas de transmitância presentes nas amostras.

Tabela V.12 – Principais bandas de transmitância presentes em todas as amostras de resinas na região do infravermelho através de espectroscopia (Silverstein, 2000).

| Comprimento de onda característico (cm⁻¹) | Descrição |
|---|---|
| 3000 - 2840 | Vibrações de deformação axial C-H |
| 1375 - 1450 | Deformações simétricas e assimétricas do grupo metila |
| 3003 | Deformação axial de C-H aromático |
| 1610, 1475 | Deformação axial das ligações C-C do anel aromático |
| 3333 | Larga deformação axial de O-H proveniente de água contida na resina (umidade) |
| 1743 | Deformação axial de carbonila de éster |

A construção do gráfico da Figura 5.14 foi obtida com amostras da resina PA-154, utilizada durante a restauração do Museu da Inconfidência em Ouro Preto/MG, no ano de 1989 e de alguns trabalhos em cantaria de Neves (1997, 1999 e 2001). Uma resina pura foi coletada em dezembro de 2005 para servir de parâmetro.

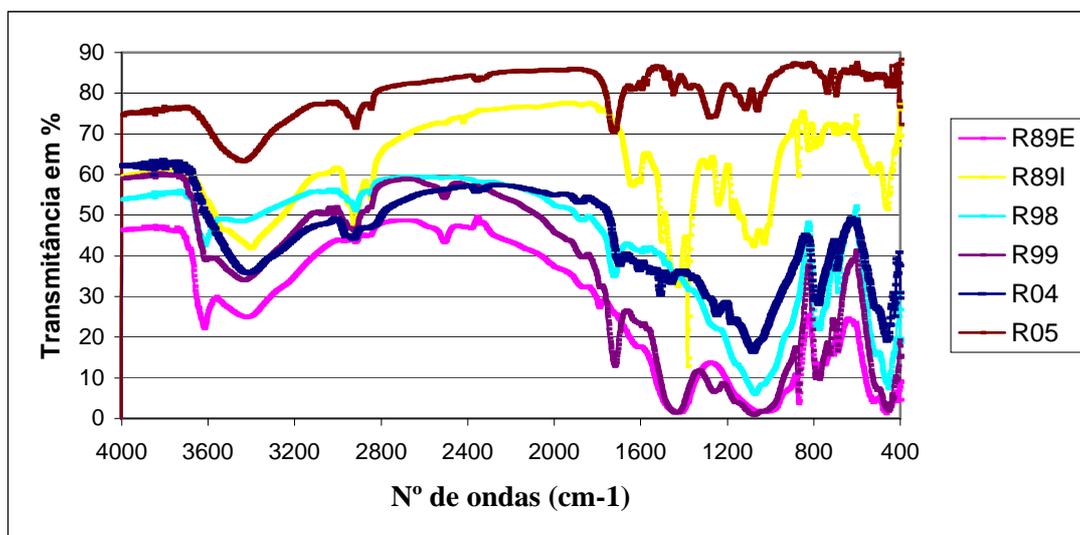


Figura 5.14 – Resultados da espectroscopia na região do infravermelho. Transmitância no infravermelho de amostras, de resina poliéster ortoftálica, selecionadas entre 1989 e 2005. Legenda, páginas 41 e 42.

Algumas diferenças são visíveis com o passar do tempo. Como esperado, a ação de raios ultravioleta proveniente da luz solar ataca a estrutura da resina, como já descrito na literatura (Engel et al., 1981). A banda de carbonila é um exemplo das modificações nos espectros. A Tabela V.13 mostra a modificação dessa banda com o passar do tempo;

Tabela V.13 – Evolução da banda de carbonila com o tempo de exposição da resina poliéster ortoftálica PA-154 à ação das intempéries.

| Ano | Comprimento de onda (cm ⁻¹) |
|------|---|
| 2005 | 1743 |
| 1999 | 1729 |
| 1998 | 1730 |
| 1989 | Ausente |

O resultado mostra alteração dos valores de comprimento de onda, sugerindo alterações nas estruturas da resina. As ligações éster são relativamente mais fracas quando comparadas com as ligações C-C, por exemplo, e, portanto mais fáceis de serem rompidas. A quebra das ligações éster da resina pode levar a formação de aldeídos, cujas carbonilas absorvem em regiões mais baixas do que as carbonilas dos ésteres (cerca de 1730 cm⁻¹), fato observado na Tabela V.13. O total desaparecimento da carbonila, como ocorrido para tempos maiores de exposição (ano de 1989) pode sugerir uma degradação ainda mais pronunciada da resina.

5.6 – Análises Termogravimétricas

Para as análises de termogravimetria (TG) foram usadas as mesmas amostras utilizadas no ensaio de infravermelho. A Figura 5.15 mostra a variação da perda de massa da resina ortoftálica com o efeito da temperatura no decorrer do tempo. Salienta-se que a amostra R89I que se encontrava no interior da rocha não possui a degradação que se apresenta nas demais amostras, com os valores próximos ao da amostra R05 usada como parâmetro.

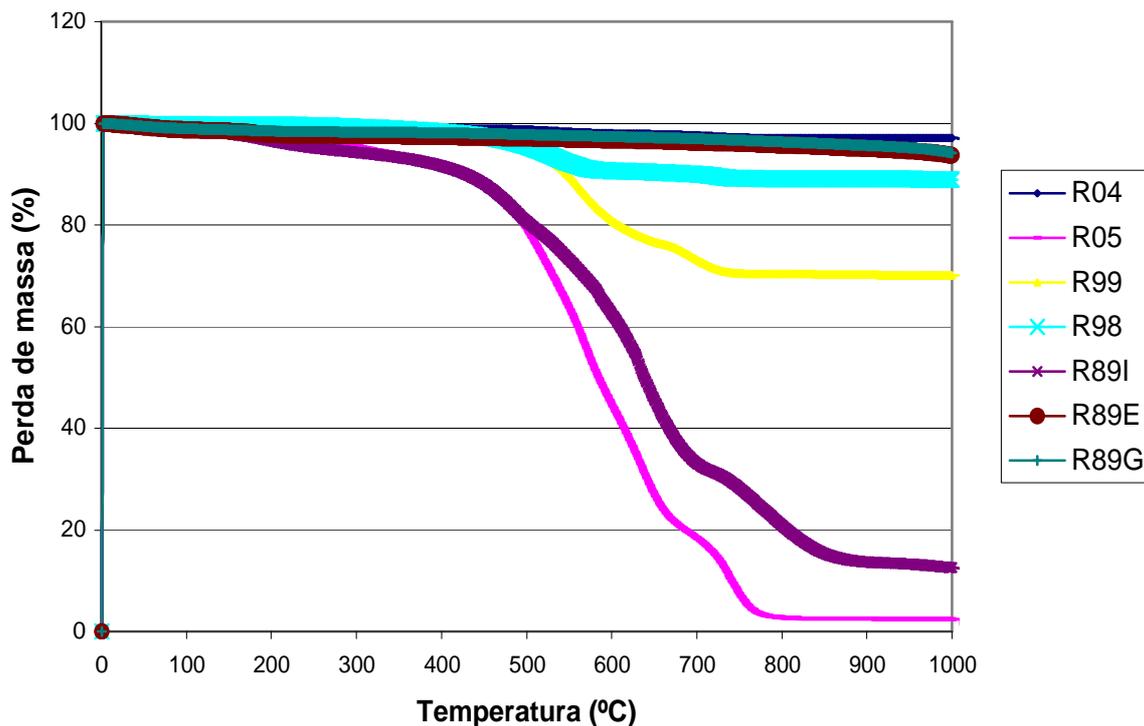


Figura 5.15 – Análise térmica das amostras de resinas poliéster ortoftálicas selecionadas no período de 1989 a 2005. Legenda, páginas 41 e 42.

As curvas TG mostram diferentes comportamentos térmicos para as resinas com o passar do tempo. Como mostrado pelos resultados no espectrofotômetro com Transformada de Fourier (FTIR), possíveis degradações da estrutura da resina foram observadas com o passar dos anos. Essas degradações podem ter levado a fragmentação das cadeias poliméricas da resina, que tendem a ser mais voláteis, ou seja, apresentar menores resistências térmicas do que a resina original. Infelizmente, as análises de termogravimetria foram prejudicadas pela grande dificuldade de separar a resina das partículas inorgânicas de pedra misturadas com a mesma durante a etapa de preparação da colagem. Estas partículas são extremamente resistentes à faixa de temperatura empregada nessas análises e cujas temperaturas são próprias para análise das resinas. Os patamares acima de 750°C obtidos para as resinas de 1989, 1998, 1999 são exemplos da presença de material inorgânico nas amostras. Para a resina original

(2005) observa-se um comportamento típico dos materiais poliméricos com perdas de massa significativas com início em aproximadamente 450°C e térmico em aproximadamente 750°C devido à degradação da estrutura orgânica desse material. A presença das fases de degradação (a primeira de 450 a 650°C e a segunda de 650 a 750°C) sugere diferentes degradações da estrutura alifática e aromática da resina.

O assunto qualidade em rocha de revestimento tem estado na pauta de vários encontros científicos e na literatura especializada. A implantação do sistema de qualidade tornou-se necessária para as indústrias brasileiras de rochas ornamentais em face da globalização e abertura da economia. Associado a esse fato tem também o código de defesa do consumidor com normas jurídicas com a finalidade de dar garantia de satisfação ao cidadão que venha comprar ou usufruir um certo serviço. A rocha como não é um produto industrializado, não é possível melhorar sua qualidade agregando características que se originam no processo de fabricação. Sofre apenas processo de beneficiamento para adequar-se morfológicamente ou geometricamente ao seu uso. Existem movimentos no setor para intensificar a implantação do sistema de qualidade. Instituições colaboradoras do setor como, por exemplo o IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas/SP caminham nesse sentido.

O IPT tem procurado reinstalar a Comissão “Revestimento com Rochas”. De posse das normas (métodos de ensaios e especificações) e de critérios de hierarquia para as propriedades das rochas pode-se determinar a importância que cada uma confere conforme as exigências de cada tipo de uso. Uma rocha de revestimento pode ter boa qualidade para um tipo de uso e má para outro tipo. Se a rocha se destinar apenas para o uso ornamental sua qualidade será o padrão estético, se a resistência mecânica for um pré-requisito associado à escolha da rocha, a qualidade terá que ser definida com bases em parâmetros objetivos para cada aplicação. Uma análise cuidadosa da qualidade da rocha ou produto dela derivado, quanto às características tecnológicas ante as exigências definidas pelo tipo de uso, parece ser uma boa conduta, pois os danos e imperfeições eventualmente ocorridos poderão ser revelados pelos resultados da análise petrográfica e dos ensaios físicos e físico-mecânicos e conduzir a uma previsão mais segura da durabilidade do material. Neste caso a qualificação será feita com base nos fundamentos técnico-científicos.

Com a criação do código de defesa do consumidor foi necessário desenvolver regras para caracterizar a qualidade das rochas ornamentais IQT (índice de qualidade tecnológica). Seguem a seguir valores sugeridos por Frazão & Farjallat (1996), devido à inexistência de especificações da ABNT: Valor limite mínimo para resistência à flexão é de 10 MPa, para a

resistência à compressão é de 100MPa e para a resistência ao impacto do corpo duro é de 0,3m, ressalva-se este valor ainda não está oficializado (Frazão, 2003).

Os valores encontrados para o quartzito itacolomi nos ensaios em flexão variaram de 1,22MPa (CP₀₇) a 4,61MPa (CP₀₅) para os corpos-de-prova em que foi usada a resina PA-154 e de 3,18 a 5,4 MPa para aqueles colados com resina 33411 e CRM 029, portanto abaixo das especificações sugeridas. Costa (2002) obteve para o serpentinito (tipo de mármore), nos ensaios em flexão, valores que variaram de 10MPa a 25,6MPa, portanto acima do valor limite mínimo sugerido. No Trabalho de Soares (2003) para os ensaios em flexão do granito branco nepal foi encontrado valores que variaram de 18,26MPa a 20,38MPa.

Os valores obtidos nos ensaios em compressão para o quartzito itacolomi variaram de 53,1MPa a 106,1MPa, apenas dois corpos-de-prova atenderiam o valor mínimo sugerido, já os valores obtidos por Costa (2002) para o serpentinito variaram de 87,2MPa a 158,1MPa. Um dos corpos-de-prova não atingiu o valor mínimo sugerido.

Os valores encontrados para a altura da esfera no ensaio de resistência no impacto de corpo duro para o quartzito itacolomi variaram de 0,85m a 1,35m, portanto todos os corpos-de-prova atingiram o valor mínimo necessário para estar dentro das especificações sugeridas. Barros et al.(2005) encontrou nas propriedades características das rochas (granito) utilizadas os seguintes valores: para o marrom imperial 0,55m e para o vermelho capão bonito e cinza andorinha 0,60m.

Ressalta-se a dificuldade em encontrar material bibliográfico para a execução desse trabalho, pois com a introdução de materiais novos na construção civil, o emprego do quartzito caiu em desuso a partir do final do século XVIII e, acrescenta-se ainda o fato de estar situado numa área de proteção ambiental e ter propriedades que não propiciam o seu uso em escala industrial.

6 – CONCLUSÕES

A seguir serão apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho.

- ◆ Ficou comprovada a eficácia das resinas usadas na colagem dos corpos-de-prova submetidos a ensaios de flexão, pois nenhum CP rompeu na região onde foi aplicada;
- ◆ O rompimento dos corpos-de-prova depois de colados com as resinas foi sempre paralelo ao plano de rompimento dos corpos-de-prova antes de colar;
- ◆ Em ensaios de flexão o plano de ruptura foi perpendicular à superfície de apoio do cutelo;
- ◆ Observou-se que os CPs que foram retirados da porção mais interna da rocha apresentaram resultados mais uniformes;
- ◆ Nos ensaios de compressão pôde-se observar que quanto mais interna foi a localização do CP maior foi a sua resistência mecânica;
- ◆ Não foi possível colar os CPs submetidos aos ensaios em compressão por entrarem em colapso, e de impacto, por apresentarem uma certa flexibilidade, não se rompendo;
- ◆ O CP₀₂, CP₀₇ e CP_{2i} apresentaram comportamento bem diferente dos demais, pois o quartzito possui uma composição química e textura muito variada, além do que algumas partes estavam mais protegidas ao intemperismo (mais no interior da rocha), sendo que outras mais expostas.
- ◆ A técnica de espectroscopia na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), se mostrou uma importante ferramenta para o estudo da degradação da resina devido à ação de raios ultravioletas e intempéries. Os principais resultados mostraram possível degradação da estrutura, observada principalmente pela modificação da banda típica de carbonila presente na estrutura das resinas.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade nesta linha de pesquisa propõe-se:

- √ Empregar outros tipos de resina para colagem e avaliação comportamental do quartzito;
- √ Pesquisar um tipo de resina que não altere a cor original de uma rocha;
- √ Desenvolver uma proporção mais adequada entre o pó de pedra e a resina;
- √ Desenvolver, tecnologicamente, um material compósito com resina e pó de pedra, visando a eficácia na recuperação de estruturas rochosas em monumentos;
- √ Fazer ensaios de envelhecimento acelerado das resinas com raio ultravioleta.
- √ Fazer ensaios mecânicos (resistência ao impacto de corpo duro) fora das normas para obter a fratura dos CPs, colar com as diferentes resinas e comparar os resultados.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials – ASTM, *Standard test Method for plane-strain fracture toughness of metallic materials* (E.399/90). In: Annual book of ASTM standards, 1995.vol 03.01, pg 412- 442.

American Society for Testing and Materials – ASTM, *Standard test Method for Color of Transparent Liquids (Gardner Color Scale)* (D 1544-04)

Disponível em:<<http://webstore.ansi.org/ansidocstore/product.asp>> Acesso em: 21/07/2006.

ANTONIL, A. J. Cultura e Opulência do Brasil. 3ªed..Belo Horizonte: Itatiaia; São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1982. 312p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1992), *Rochas para Revestimento*. Determinação da resistência à compressão uniaxial.(NBR 12767), Rio de Janeiro, 2p.

_____ (1992), *Rochas para revestimento*. Determinação da resistência à flexão (NBR 12763), Rio de Janeiro, 3p.

_____ (1992), *Rochas para revestimento*. Determinação da resistência ao impacto do corpo duro (NBR 12764), Rio de Janeiro, 3p.

_____ (1992), *Rochas para revestimento*. Análise Petrográfica (NBR 12768), Rio de Janeiro, 3p.

BARROS, Mercia M. S. B.; MARANHÃO, Flávio; MARANHÃO, Ricardo J.L. Pisos aderentes com placas de rochas. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, ed. 180. p. 190-202., Janeiro/fevereiro 2005.

BENEDETTI, V. Di. Esculturas em pedra, agentes de degradação e seus mecanismos. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, ed. 156. p. 56-59. Fevereiro 2001.

BENEDETTI, V. Di. Francisco Stockinger e sua obra. Um caso de restauração escultórica. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, Ed. 176, p.50-58. Maio/Junho 2004.

BLASS, A. Processamento de polímeros: Resina poliéster. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1988. 313 p.

CAMPOS, J.C.S.; NEVES J.H., Relatório interno da área de mineração do CEFET/OP/MG, 2005. 4p.

Carta de Atenas – Sociedade das Nações – outubro de 1931

Disponível em: <[www.Iphan.gov.br/legislac/cartas patrimoniais/ cartas patrimoniais.htm](http://www.Iphan.gov.br/legislac/cartas_patrimoniais/cartas_patrimoniais.htm)>

Carta de Veneza – Monumentos e sítios – maio de 1964.

Disponível em: <[www.Iphan.gov.br/legislac/cartas patrimoniais/ cartas patrimoniais.htm](http://www.Iphan.gov.br/legislac/cartas_patrimoniais/cartas_patrimoniais.htm)>

Carta do Restauo – Governo da Itália – abril de 1972

Disponível em: <[www.Iphan.gov.br/legislac/cartas patrimoniais/ cartas patrimoniais.htm](http://www.Iphan.gov.br/legislac/cartas_patrimoniais/cartas_patrimoniais.htm)>

CARUSO, L.G. (coordenador). Catálogo das rochas ornamentais do Estado de São Paulo. São Paulo,SP, 1990.

Casa da Resina

Disponível em: < www.casadaresina.com.br > Acesso em junho de 2005.

CAVALCANTI, A. M. S. Tecnologia da pedra. Rio de Janeiro: Pongetti, 1951. **Apud** VILLELA, C. M. Critérios para Seleção de Rochas da Cantaria. 2003. 73p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, 2003.

COELHO, J.E.P. A pedra sabão em Minas Gerais. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, vol 46, nº 1/3, janeiro/ setembro 1993.

COSTA, J. I. Caracterização Mineralógica e Tecnológica de uma Jazida de Serpentinó como Rocha Ornamental. 2002. 102 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, 2002.

DRISCOLL, S.B. *Physical, Chemical, and Thermal Analysis of Thermoplastic Resins. In: Testing and Characterization. In: Engineered Materials Handbook. Metals Park, Ohio, 1988. Volume 2. p.533-543.*

ENGEL, L.; KLIGELE, H.; EHRENSTEIN, G.; SCHAPER, H. *An Atlas of Polymer Damage “surface examination by scanning electron microscope”*: surface damage. Munich: Wolfe Publishing LTDA, 1981. 256p.

Equipe de Pesquisadores – Jornal EM. Ressonância com aparelho portátil. Jornal Estado de Minas, Belo Horizonte, 10 abril de 2005, número 23 113, Caderno Ciência, p.20.

FERREIRA, C. M. Estudo da Iteração dos Efluentes da Fábrica da ALCAN com as Rochas Utilizadas nos Monumentos de Ouro Preto. Ouro Preto, MG: DEGEO – EM – UFOP, 1991.

FRAZÃO, E.B. Valorização das rochas de revestimento: selo de qualidade ou marca de conformidade. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, Ed. 168, p.140-146, janeiro/fevereiro 2003.

FRASCÁ, M. H. B. Durabilidade e Alterabilidade em Rochas Ornamentais e para Revestimento. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, Ed. 180, p.178-186, fevereiro 2005.

FRASCÁ, M. H. B.; QUITETE, E.B. Estudos diagnósticos de patologias em rochas de revestimento. In: CONGRESSO IBERAMERICANO DE PATOLOGIA DE LAS CONTRUCCIONES, Montevideo, 1999. **Apud** FRASCÁ, M. H. B. Durabilidade e Alterabilidade em Rochas Ornamentais e para Revestimento. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, Ed. 180, p.178-186, fevereiro 2005.

FUGIMORI, S.; FERREIRA, Y. A. Introdução ao uso do Microscópio Petrográfico. Salvador: Centro Editorial e Didático da Universidade Federal da Bahia, 1987.240p.

GODOS, V. S. *La Restauración de la Piedra Natural. In: Manual de Rocas Ornamentales: Prospección, Explotación, Elaboración, Colocación.* Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A. (1996). 696p.

HARRIS, D. C. Análise Química Quantitativa: Espectrofotômetros. 5ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001. 862p.

HOLLAWAY, L. *Handbook of polymer and composites for engineers.* Cambridge, England: Woodhead Publishing Ltda, 1994. 338 p.

IDEAS Project. *Investigations into Devices Environmental Attack on Stones.* Belo Horizonte: CETEC, 1992.

KOTASEK, V. Aplicações de Resina Epóxi na consolidação de rochas ornamentais. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, Ed. 173, p.112-120, novembro/dezembro 2003.

KRUMBEIN, W.E. *Microbial interactions with mineral materials.* In: *HOUGHTON, D.R.; SMITH, R.N.; EGGINS H.O.W. ed. Bioterioration, 7 Edition.* London: Elsevier Applied Science, 1998 p.78-100. Apud **RESENDE, M.A.** Biodeterioração de Monumentos Históricos. In: *Microbiologia Ambiental.* Jaguariúna: Embrapa- CNPMA, 1997.440p.

LINGUANOTTO, D. Descubra Ouro Preto. São Paulo: Cultrix, 1972. 47p.

MANO, E. B. MENDES, L.C. Introdução a polímeros. 2ª Ed. São Paulo, SP, Brasil: Editora. Edgard Blücher Ltda, 1999. 208 p.

MANO, E. B.; Polímeros como material de engenharia. São Paulo, SP, Brasil: Editora. Edgard Blücher Ltda, 1991.218 p.

MICROLAB/EM/UFOP. Laboratório de microscopia e microanálise.

Disponível em: www.ufop.br/pesquisa/laboratórios/microlab. Acesso 24/05/2005

MOREIRA, C.F.W. Projeto Especial Marmorarias - Programa de vigilância à saúde dos trabalhadores em Belo Horizonte. Revista Rocha de Qualidade, São Paulo, Ed. 173, p.124-150, novembro/dezembro 2003.

NEVES, J.H. Exposição do curso de cantaria da FAOP, Museu Casa Guignard OP/MG, 1997; Parque da Gameleira/BH/MG, 1999.

NEVES, J.H. Exposição da oficina de cantaria da UFOP, Casa dos Contos/OP/MG, 2001.

PIRES, P.R. Equipamentos geológicos. Dissertação de especialização em gemologia. DEGEO/UFOP, Ouro Preto, 1987.

POLIBRASIL, Análise Instrumental: conceitos e avanços da análise no infravermelho. Disponível em: www.quimicaederivados.com.br/revista/qd413. Acesso em 15/12/2005

REIS, S.R. Arqueologia da memória. Jornal Estado de Minas, Belo Horizonte, 9 abril de 2005, número 23 112. Caderno Pensar, p.3.

REIS, V.W; MENDES, M.M.; RAMPINELLI, L.R.; LANNA, M.C.S.; RESENDE, M.A. Estudo da Biodegradação de Monumentos Históricos de Ouro Preto. in: Anais do 4º Encontro Nacional de Biólogos, 2002, Ouro Preto/MG. p.141.

RESENDE, M.A. Biodeterioração de Monumentos Históricos. In: Microbiologia Ambiental. Jaguariúna: Embrapa- CNPMA, 1997.440p.

SCHUMANN, W. Rochas e minerais. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico AS. 223p.

SILAEX Química LTDA, Resina poliéster insaturada

Disponível em: www.silaex.com.br/poliéster.htm. Poliéster insaturado. Acesso em: 05/11/2004.

SILAEX Química LTDA, Resina epóxi

Disponível em: www.silaex.com.br/epóxi. Epóxi. Acesso em: 15/06/2004.

SILVERSTEIN, R. M. *Spectrometric Identification of Organic Compounds: three Infrared Spectrometry. 4ª edição. New York: John Wiley & Sons, 1981. 442p.*

SILVERSTEIN, R. M. Identificação espectrométrica de compostos orgânicos. 6ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2000. 460p.

SNEYERS, R. V.; HENAU, P. J. de. *La conservación de la piedra. in: Preservación y Restauración de Bienes Culturales.* Roma, Itália: UNESCO – *United Nations, Educational, Scientific and Cultural Organization*, 1969. 361p.

SOARES FILHO, F.C. Rochas Minerais e pedras preciosas do Brasil. 2ª ed. Brasil: Consultoria de projetos e artes Ltda., 1990. 470p.

SOARES, R.S. Tenacidade à fratura e resistência à flexão do granito branco nepal. 2003. 15p.Trabalho (disciplina RED 145)-REDEMAT/UFOP, 2003.

TRILLO, G. L. *Características y propiedades de las rocas ornamentales. Caracterización y normalización. In: Manual de Rocas Ornamentales: Prospección, Explotación, Elaboración, Colocación.* Madrid: Gráficas Arias Montano, S. A., 1996. 696p.

VILLELA, C. M. Critérios para Seleção de Rochas da Cantaria. 2003. 73p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. REDEMAT/UFOP, Ouro Preto, 2003.

VOGEL, A.I. Analise Inorgânica Quantitativa: Análise Térmica. 4ª edição. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981. p.631-643.

VOGEL, A.I Analise Química Quantitativa: Espectroscopia vibracional. 6ª edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002.462p.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.