

---

**ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA****VI.1 – Introdução**

Um dos enfoques da pesquisa foi a realização de um conjunto de ensaios e análises laboratoriais visando o conhecimento de parâmetros físicos e mecânicos, mineralógicos, e dos aspectos condicionantes da alterabilidade observáveis em condições quimicamente agressivas.

As características de uma rocha (cor, dureza, densidade, grau de alterabilidade etc.) estão diretamente ligadas aos seus minerais constituintes, granulação e aos seus padrões texturais. Uma das maneiras de conhecer seus comportamentos diante das solicitações a que são submetidas nas aplicações como rochas ornamentais é por ensaios de caracterização tecnológica.

Para os ensaios tecnológicos, os objetos de estudo foram os seguintes tipos litológicos: esteatitos (ACA, FUR, LUN); quartzitos (ITA e LAG) e granitos *lato sensu* comercialmente denominados (Ás de Paus (AZP); Branco Eliane (BRE); Café Imperial (CI) e Preto Rio (PR). Nem todos os materiais pétreos em questão foram analisados para todos os ensaios de caracterização tecnológica e de alterabilidade, em função da disponibilidade de corpos de prova e de suas aplicações atuais.

Os ensaios de caracterização tecnológica incluíram análises petrográficas, mineralógicas e químicas; determinações da densidade, absorção de água e porosidade, resistências à compressão, flexão 3 pontos e ao desgaste abrasivo.

Para os ensaios de alterabilidade, procurou-se simular em laboratório as variáveis próprias das condições onde estão e/ou podem ser aplicadas às rochas, para observar seus comportamentos do ponto de vista da alterabilidade, numa escala de vida humana. Estes ensaios se constituíram na simulação da ação climática (choque térmico), de atmosferas agressivas (ensaios com soluções ácidas).

A simulação de parâmetros que representem os ambientes exógenos em laboratórios é de difícil execução, pela necessidade de se reproduzirem certas condições (umidade, temperatura, tempo de exposição, contaminantes atmosféricos etc.) que inviabilizam a condição real do que acontece na natureza. Apesar disso, os ensaios de alterabilidade em condições aceleradas ainda é um dos poucos

meios de que disponíveis para averiguar a resposta de materiais pétreos às mais adversas condições ambientais e climáticas e, portanto constitui ferramenta importante no auxílio aos profissionais do setor de ornamentais e de revestimento que pretendem utilizar esses materiais com maior segurança e confiabilidade.

## **VI.2. - Análises Petrográficas e Mineralógicas**

A análise fundamenta-se na observação de seções delgadas das rochas com espessura de 30µm ao microscópio óptico de luz transmitida, segundo as normas de caracterização petrográfica de rochas de revestimento (ABNT/NBR 12678/1992a).

É uma ferramenta muito útil para análise dos dados tecnológicos, podendo esclarecer os diferentes comportamentos das propriedades físicas e/ou mecânicas de rochas aparentemente semelhantes. Também é essencial na etapa de diagnóstico e caracterização das deteriorações em edificações, especialmente históricas.

Os materiais descritos como “granitos *lato sensu*” provieram de marmorarias de Belo Horizonte e as escolhas levaram em conta a importância em termos de valor dessas rochas no mercado de construção civil, a frequência de uso desses materiais.

Algumas feições como diferenças nos padrões de alteração intempérica entre as amostras não puderam ser reconhecidas ao microscópio. O estudo de microfissuras intergranulares e intragranulares não foi detalhado nesse trabalho, exceto microfissuras visíveis macroscopicamente na superfície das placas polidas.

### **VI. 2.1 - Análise por Microsonda Eletrônica e Microscopia Eletrônica**

A microanálise permite a determinação quantitativa do conteúdo dos principais óxidos: SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO, K<sub>2</sub>O e CaO, por análises pontuais. Assim, é possível avaliar a susceptibilidade ou não de diferentes tipos de minerais de se alterarem em função da presença de elementos mais ou menos estáveis (Na, Ca, K, etc) em suas composições.

Neste tipo de análise se produz um feixe de elétrons restritamente focalizado sobre a amostra que gera raios X, os quais são analisados através do comprimento de onda ou a intensidade das linhas no espectro de raios X. Os elementos presentes podem ser identificados e suas concentrações estimadas com grande precisão. Nas análises quantitativas, as intensidades das linhas de raios X da amostra são comparadas com aquelas originadas por padrões de composição conhecida.

Para a realização das análises WDS foi utilizado o microscópio eletrônico JEOL modelo JSM 840A, com tensão de aceleração de 25,0 KV, corrente do feixe de  $6 \times 10^{-11}$ , abertura da objetiva 3 e distância de trabalho de 38 mm. O equipamento pertence ao consórcio dos Departamentos de Física, Química e Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais.

### VI.3. – Ensaio Tecnológicos

Na Tabela VI.1 estão relacionadas as características tecnológicas e o nível de importância em relação às suas aplicações.

Tabela VI.1: Importância das características tecnológicas das rochas ornamentais em relação à suas aplicações: MI - Muito Importante, I - Importante e PI - Pouco Importante. Modificado de Aires-Barros (1991)

CARACTERÍSTICA TECNOLÓGICA	REVESTIMENTO INTERIORES	REVESTIMENTO EXTERIORES	PAVIMENTOS INTERIORES	PAVIMENTOS EXTERIORES
Descrição Petrográfica	I	I	I	I
Peso Específico	I	I	I	I
Absorção D'água	PI	I	PI	I
Resistência à Compressão	PI	I	PI	I
Resistência à Flexão	PI	I	I	I
Resistência ao Desgaste	PI	PI	I	MI
Resistência ao Choque	-	-	I	MI
Análise Química	PI	PI	PI	PI
Módulo de Elasticidade	-	I	-	I

Neste trabalho, foram realizados os seguintes ensaios tecnológicos: índices físicos, resistência à compressão uniaxial, flexão e desgaste Amsler. Os procedimentos das normas adotadas estão sumarizados na Tabela VI.2.

Tabela VI.2: Parâmetros e procedimentos nas determinações de ensaios tecnológicos

Objetivo	Corpos de Prova (Cp's)	Norma / Procedimento
Índices Físicos (massa específica aparente seca e saturada, porosidade e absorção de água aparente)	10 cp's para cada amostra, com diâmetro em torno de 7cm ou peso em torno de 250 g	ABNT 12766, 1992b Secagem em estufa por 24 h; peso da massa seca. Imersão em água até tempo total de 24 h, peso da massa saturada e massa submersa
Compressão Uniaxial	6 cubos com aresta variando entre 7cm e 7,5cm	ABNT 12767, 1992c Prensa FORNEY / FORTEC RT-1
Desgaste abrasivo Amsler	2 cp's paralelepípedos regulares, com os lados da base ~ 7cm e altura ~ 7cm e 3cm.	ABNT 12042, 1992d Máquina de desgaste Amsler e dispositivo para medida da perda da espessura 2 cp's sob pressão, submetidos ao desgaste sob a ação de areia quartzosa após percurso de 1000m.
Resistência à Flexão 4 pontos	6 cp's prismáticos com dimensões 3,8x1,0x3,2cm	ABNT 12763/1992e Prensa hidráulica da marca TINIUS OLSEN, modelo H 125 K-S UTM

### VI.3.1 – Índices Físicos

A determinação dos índices físicos das rochas engloba a avaliação de parâmetros como: massa específica aparente ou densidade, porosidade aparente e absorção de água aparente, cujos ensaios podem ser realizados segundo as normas NBR 12 766 (ABNT, 1992b).

As propriedades de densidade, porosidade e absorção d'água fornecem indicação de fissuras, poros e vazios, sendo fatores determinantes para a resistência e durabilidade na avaliação comparativa de um conjunto de rochas (Winkler, 1997). Assim, a determinação dessas propriedades é útil para indicar as diferenças de absorção entre vários tipos de rochas ornamentais ou dados comparativos para rochas do mesmo tipo.

Nessa pesquisa foram feitas várias determinações de índices físicos para esteatitos, quartzitos e granitos *lato sensu*, baseadas nos procedimentos estabelecidos pela NBR 12766 (ABNT, 1992a) cujos cálculos são dados pelas seguintes equações:

$$\text{Massa específica aparente seca (kg/m}^3\text{)} \quad \rho_{seco} = m_{seca} / (m_{sat} - m_{sub})$$

$$\text{Massa específica aparente saturada (kg/m}^3\text{)} \quad \rho_a = m_{sat} / (m_{sat} - m_{sub})$$

$$\text{Porosidade aparente (\%)} \quad \eta_a = (m_{sat} - m_{seca}) / (m_{sat} - m_{sub}) \times 100$$

$$\text{Absorção de água (\%)} \quad \alpha = (m_{sat} - m_{seca}) / (m_{seca}) \times 100$$

Para os esteatitos e granitos, a modificação adotada em relação às demais rochas foi a utilização de corpos-de-prova obtidos de placas polidas, pois o objetivo é fornecer dados sobre a alteração acelerada em rochas com aplicação ornamental para revestimentos.

### **VI.3.2 – Resistência à Compressão Uniaxial**

Este ensaio é mais frequentemente solicitado para a avaliação das resistências dos materiais sobre os quais vão atuar forças verticais. No entanto, ele constitui um índice importante da qualidade das placas de rochas a serem utilizadas como revestimento. Elevados valores de resistência à compressão implicam, de uma maneira geral, em materiais de alta resistência mecânica (Vidal *et al.* 1999).

A uniformidade da distribuição de tensões, num corpo de prova sob a ação de esforços compressivos deve ser garantida. Portanto, o corpo de prova deve apresentar geometria bem regular e os seus topos devem ser perfeitamente paralelos entre si.

O procedimento utilizado durante a realização dos ensaios, no Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais do CPMTC, seguiu a norma NBR 12767 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – (ABNT, 1992c). Utilizou-se 6 corpos-de-prova cúbicos ( $7 \pm 1$ cm de aresta) no estado seco, que foram submetidos a esforços compressivos a uma taxa de carregamento de 600 Kilopascal (KPa/s), em uma prensa hidráulica marca TINIUS OLSEN, modelo H 25 K-S, acionamento manual e capacidade mínima para 1000KN e divisões de 2KN (Figura VI.1). Assim, o corpo de prova de uma rocha com área de topo  $S(m^2)$  submetido a uma força  $F(N)$ , se romperá com uma tensão máxima  $\sigma_{m\acute{a}x}$  ( $N/m^2$ ), dada pela equação:  $\sigma_{m\acute{a}x} = F/S$ , onde:  $\sigma_{m\acute{a}x}$  = tensão de ruptura à compressão (MPa);  $F$ : carga total de ruptura (KN);  $S$  = área de aplicação da carga ( $m^2$ ).

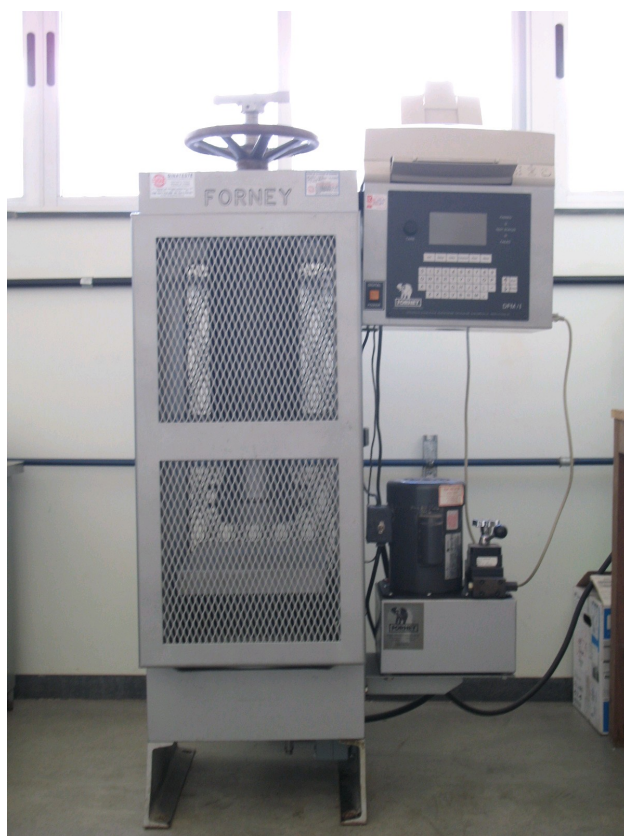


Figura VI.1: Prensa hidráulica, TINIUS OLSEN, modelo H 25 K-S para ensaio de resistência à compressão, Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais /CPMTC.

De acordo com Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses - ISRM (1977), as rochas podem ser classificadas com base na resistência à compressão simples de acordo com a tabela VI.3 (A e B).

Tabelas VI.3 - Classificação das rochas de acordo com a resistência à compressão uniaxial. (a) ISRM (1977); (b) ISRM (1978).

<b>(A) Classificação</b>	<b><math>\sigma_c</math> (Mpa)</b>
Extremamente branda (solo)	< 1
Muito branda	1 – 5
Branda	5 – 25
Resistência média	25 – 50
Resistente	50 – 100
Muito resistente	100 – 250
Extremamente resistente	> 250

(B) Intervalos MPa (Kg/cm <sup>2</sup> )	Símbolos		Designações	
>200 (>2000)	S <sub>1</sub>	S <sub>1-2</sub>	Muito elevada	Elevada
60-200 (600 – 2000)	S <sub>2</sub>		Elevada	
20-60 (200 – 600)	S <sub>3</sub>		Média	Média
6-20 (60 – 200)	S <sub>4</sub>	S <sub>4-5</sub>	Baixa	Baixa
<6 (<60)	S <sub>5</sub>		Muito baixa	

Neste trabalho, realizou-se ensaios de resistência à compressão uniaxial especialmente para os quartzitos Itacolomi (ITA), visto que foram amplamente utilizados para compor estruturas e pilares de edificações históricas. Já os esteatitos compõem partes decorativas dos monumentos. Para os granitos, as amostras foram obtidas em forma de placas polidas com espessuras de 2 a 3 cm nas marmorarias e, portanto impróprias para tais ensaios.

### VI.3.3 – Resistência à Flexão

Os ensaios utilizados para a determinação da resistência à flexão procuram determinar qual a tensão mínima, ou qual a flexão máxima, que provoca a ruptura de uma placa de rocha quando submetida a esforços de compressão e/ou tração. Este valor vai determinar qual o maior tamanho e/ou a menor espessura que uma placa deverá ter para suportar as condições estruturais.

Este ensaio tem relevância para dimensionamento de materiais rochosos utilizados em revestimentos exteriores, especialmente sob a forma de placas que estarão sujeitas à força produzida pela ação do vento, cargas, etc, em edificações.

A determinação da tensão de ruptura na flexão 4 pontos em corpos de prova retangulares de quartzitos ITA (3,8cm x 1,0cm x 3,2cm) foi realizado numa prensa hidráulica da marca TINIUS OLSEN, modelo H 25K-S, (Figura VI.2). Cada corpo-de-prova foi apoiado num dispositivo com dois cutelos inferiores (de reação) e dois superiores (de ação).

A tensão de ruptura na flexão 4 pontos é calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma_F = \frac{3 \mathbf{W} \mathbf{L}}{4 \mathbf{b} \cdot \mathbf{d}^2}$$

Onde:  $\sigma_F$  = tensão de flexão, Mpa;  $\mathbf{W}$  = valor máximo da carga quando da ruptura (KN);  
 $\mathbf{L}$  = distância entre os dois cutelos de ação (mm);  $\mathbf{b}$  = largura do corpo-de-prova (mm);  
 $\mathbf{d}$  = espessura do corpo-de-prova (mm).

A prensa hidráulica, quando acoplada à impressora, permite a visualização do gráfico correspondente ao ensaio e o valor da carga máxima atingida quando da ruptura e fornece ainda gráficos do tipo carregamento (N) por flexão (mm). Os resultados são mostrados no capítulo sobre análise de dados.

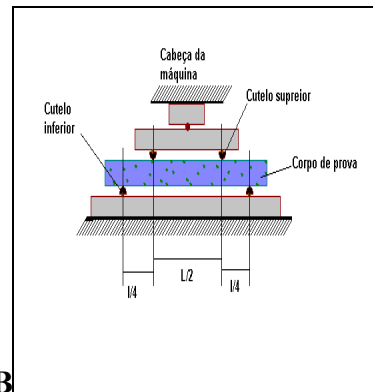


Figura VI.2: Prensa hidráulica da marca TINIUS OLSEN, modelo H 25K-S para ensaios de resistência à flexão 4 pontos (A), e esquema de posicionamento dos cutelos (B), Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais /CPMTC.

### VI.3.4 – Resistência ao Desgaste Abrasivo Amsler

O desgaste abrasivo é a propriedade que uma rocha possui de resistir à remoção progressiva de constituintes minerais de sua superfície, a qual pode ser medida por diminuição de volume ou de altura do corpo de prova ou por perda de massa.

O processo mais comum para determinação do desgaste abrasivo em rochas para revestimento é a máquina Amsler (Figura VI.3). Nesse processo, o ensaio indica a redução de espessura em milímetros que placas de rochas apresentam após um percurso abrasivo de 2m. Dois corpos de prova na forma de placa de 7x7x 2 cm, são pressionados sobre um disco metálico de alta dureza sobre o qual é lançada areia quartzosa. O desgaste do corpo de prova ocorre à medida que o disco gira e promove o contato da areia com os corpos de prova. Os resultados são calculados, após 500 voltas por meio da medição da redução de altura do corpo de prova, em mm, conforme a equação:  $D= H1- H2$  (mm), onde H1 - altura inicial e H2 - altura final.

O ensaio de desgaste abrasivo Amsler foi realizado de acordo com as diretrizes da norma da ABNT-NBR 12042/1992d, no LABTEC Rochas /CPMTC /UFMG em corpos de prova de esteatitos (ACA, FUR, LUN), e granitos *lato sensu* (AZP, BRE, CI, PR).

(A)



(B)

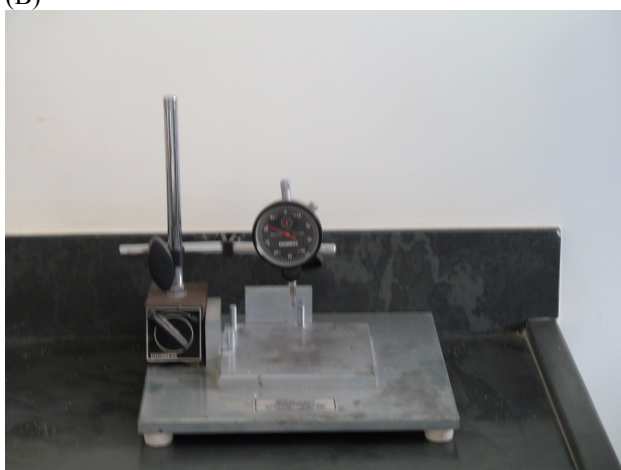


Figura VI.3: (A) “Máquina Amsler” para determinação do desgaste por abrasão; (B) Equipamento para determinação das medidas sobre as diagonais do corpo-de-prova, Laboratório de Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais do CPMTc.