

CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA EXPEDITA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

J. A.M. Luz¹, M. C. Segato², C.A. Pereira¹

1 – Professores do Departamento de Engenharia de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto. Campus
Universitário, s/n. CEP 35400-000- Ouro Preto – MG
E-mail: jaurelio@demin.ufop.br; pereira@demin.ufop.br

2 – Aluno do Departamento de Engenharia de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto. Campus Universitário,
s/n. CEP 35400-000- Ouro Preto – MG
E-mail: msegato@gmail.com

RESUMO

Realizaram-se campanhas experimentais in loco e em laboratório, visando a estabelecer métodos expeditos para determinação de características de quartzitos utilizáveis em cantaria. Os tipos de quartzitos estudados (em especial o meta-arenito conhecido como itacolomito) têm sido utilizados no âmbito da Oficina de Cantaria do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da UFOP – criada em agosto de 2000 –, onde se desenvolvem atividades de extensão universitária e de pesquisa tecnológica ligadas à arte multimilenar da cantaria. Superfícies rochosas *in situ* e cubos previamente serrados foram ensaiados. Os valores de rebote (*rebound*) obtidos na escala do esclerômetro de Schmidt foram comparados com medidas laboratoriais de parâmetros usuais, como porosidade, resistência à compressão simples, dureza Rockwell e ensaios de abrasividade por tamboramento. Como pontos de referência e de amarração a dados consignados na literatura, também foram ensaiados espécimes cúbicos de mármore oriundo de Carrara (Itália). Os resultados sugerem ser possível utilizar os valores de rebote do esclerômetro de Schmidt para se inferir o comportamento do material ensaiado quando submetido ao processo de afeição com as ferramentas usuais dos oficiais canteiros. O grande diferencial do método para aplicação em cantaria é o fato de os ensaios com esclerômetro serem não destrutivos, facilitando acompanhamento da degradação das rochas utilizadas em monumentos históricos.

PALAVRAS-CHAVE: rochas ornamentais, esclerômetro, parâmetros geomecânicos, caracterização.

1. INTRODUÇÃO

As cidades históricas de Minas Gerais possuem um grande acervo arquitetônico em cantaria. Dada a importância, histórica e (mesmo) funcional da cantaria, o Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, com preocupação pela preservação tanto das obras em seu entorno, quanto pelo ofício de canteiro, criou a sua *Oficina de Cantaria*, onde vem sendo desenvolvidas atividades de extensão universitária e de pesquisa tecnológica. Conseqüentemente, ocorreu a necessidade de conhecer os tipos e as características dos materiais utilizados na cantaria, métodos mais eficientes para o desmonte das rochas utilizadas no ofício, como também, técnicas de aumentar a resistência ao desgaste externo da obra devido às ações climáticas, para que também possa surgir aplicações e soluções novas para esse ofício (Luz *et al.*, 2003).

Este trabalho consistiu, em caracterizar tecnologicamente algumas das principais rochas usadas na arte da cantaria, quartzitos e clorita xisto, do mesmo tipo daquelas usadas nas obras em cantaria dos séculos passados, como estátuas, chafarizes, pontes, entre outras presentes em Itabirito, Mariana e Ouro Preto. Tal caracterização compreendeu os seguintes tópicos: microscopia óptica expedita, ensaios para obtenção da massa específica e porosidade, determinação de dureza Rockwell, e ensaios com o esclerômetro de Schmidt, ensaios de compressão simples.

A caracterização tecnológica de rochas ornamentais costuma ser feita via métodos laboratoriais demorados. Noutro extremo, o esclerômetro de Schmidt tem sido recentemente utilizado para inferência rápida e de baixo custo, em campo, das propriedades mecânicas de maciços rochosos (Kats *et al.*, 2000). Bilgin *et al.* (2002), trabalhando nessa linha, utilizaram o esclerômetro de Schmidt para prever a taxa de desmonte de martelos hidráulicos em abertura de túneis (o princípio de funcionamento do esclerômetro pode ser visto detalhadamente em Basu e Aydin, 2004).

A importância do conhecimento das características dessas rochas se deve ao fato de ele possibilitar a escolha de uma determinada rocha mais adequada para devido fim, ou facilitar a escolha da matéria prima para restauro obras históricas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais Utilizados

Rochas ensaiadas: As rochas utilizadas no presente trabalho foram selecionadas buscando-se reproduzir os tipos usualmente empregados nos trabalhos de cantaria da região de Itabirito, Mariana e Ouro Preto, incluindo-se aí o material “mimetizante” constituído de grânulos (pó) de quartzito mesclados com resina ortoftálica PA-154, idêntica à usada por Neves (2005), o qual tem sido usado na manutenção (enxertamento, soldagem ou colagem) de peças escultóricas avariadas.

Tabela 1 – codificação e identificação das amostras estudadas

CÓDIGO	DESCRIÇÃO	LOCALIZAÇÃO / COORDENADAS GEOGRÁFICAS DO GPS
ITA A	Itacolomito amostra do sitio A	23K 0656716 (UTM 7742607).
ITA B	Itacolomito amostra do sitio B	23K 0656716 (UTM 7742607).
BP	Quartzito de Bico de Pedra	23K 0645116 (UTM 7738212).
ER	Quartzito de Estrada Real:	23K 0648296 (UTM 7737133).
RES	Corpo de Resina (PA-154) e pó de quartzito ITA A (resíduo do afeiçãoamento manual)	Não se aplicam.
CX	Quartzito-clorita-xisto	A margem da via <i>Ouro Preto –Ouro Branco</i> , a 2,1 km após a rotatória da Novelis; coordenadas indisponíveis.

Equipamento utilizado: As figuras 1 e 2 mostram os principais equipamentos utilizados neste trabalho. Utilizaram-se os seguintes equipamentos: esclerômetro de Schmidt, prensa universal Kratos, durômetro Rockwell Wolpert Dia *Testor 2Rc* com penetrador de 6,3 mm de diâmetro equatorial; moinho de porcelana com 0,285 m de diâmetro e 0,20 m de comprimento efetivos; peneirador vibratório, balanças e acessórios diversos.



Figura 1 – Prensa (à esquerda) e durômetro utilizado nos ensaios.

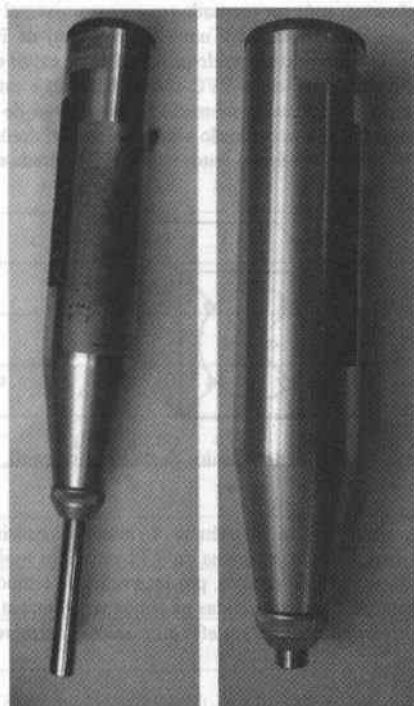


Figura 2 – Esclerômetro de Schmidt (tipo N, da Eurosit) com a haste retrátil nas posições inicial e final após o rebote e o pressionamento do pino de travamento para a leitura da escala.

2.2. Procedimentos Metodológicos

Os ensaios de determinação de massa específica, absorção d'água aparente e porosidade foram realizados segundo a Norma da ABNT NBR 12766. Foram utilizados 10 cubos serrados, com 5 cm de aresta, de cada tipo de rocha estudada na pesquisa. Todas as amostras foram lavadas em água corrente da torneira e esfregadas com uma escova com cerdas de plástico, com a intenção de desobstruir os possíveis poros fechados durante os cortes dos cubos. Os corpos-de-prova foram, então, colocados numa estufa à 110 °C por 24 h. A seguir os corpos-de-prova foram resfriados naturalmente, pesados, colocados em um recipiente de inox e parcialmente submersos com água até atingir 1/3 da altura desses corpos-de-prova. Ao se completarem 13 h água foi adicionada até atingir 2/3 da altura dos corpos-de-prova e depois de 21 h foi adicionado água até cobrir os corpos-de-prova, ficando nestas condições por mais 24,5 h, após o que foram pesados de acordo com a norma técnica.

Os corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão foram os mesmos utilizados nos ensaios de porosidade e de determinação de dureza (cubos com 0,05 m de aresta). Foram submetidos a compressão, sob velocidade de carregamento adequada, até o seu colapso. As resistências dos corpos-de-prova foram levantadas na superfície discordante (ortogonal ao acamamento) e na superfície concordante (paralelo ao acamamento).

O método Rockwell é baseado na profundidade de penetração de uma ponta (utilizou-se esfera de aço temperado) na peça a ser ensaiada, sob uma carga determinada. O processo é realizado em três etapas: primeiramente submete-se a peça a uma pré-carga e acerta-se zero-se o registrador; em seguida aplica-se a carga que somada à pré-carga resulta a carga nominal do ensaio até o ponteiro do identificador ficar parado; finalmente, retira-se a carga suplementar e faz-se a leitura.

Neste trabalho, usou-se betume entre o corpo-de-prova e a placa de acrílico, para deixar a superfície superior (a que seria ensaiada) paralela à base do durômetro, após ser prensada em prensa universal manual. O betume foi escolhido por ter tido baixa recuperação elástica. Usou-se também um cilindro (anel) de PVC de 9 cm de diâmetro para confinar o betume, e um plástico entre o betume e o corpo-de-prova a fim de evitar o contato entre eles. O corpo-de-prova foi colocado sobre o plástico, dentro do anel de PVC com o betume, e este último sobre base acrílica do durômetro. Esse arranjo foi levado a prensa manual e submetido a uma carga de 9.810 N, deixando a superfície superior do cubo paralelo a base da placa de acrílico. Tendo sido ensaiado no durômetro logo em seguida, sendo a pré-carga de 98,1 N, e a carga 196,2 N. Os ensaios foram feitos na ordem mostrada na figura 3, a seguir.

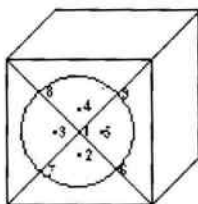


Figura 3 – Ordem dos ensaios de dureza Rockwell.

O ensaio de tamboramento, para avaliação da resistência à abrasão, consistiu em revolver aliquota de aproximadamente 600 g de amostra (com granulação acima de 9,52 mm), em moinho de porcelana sem carga de corpos moedores a 74 rpm (93,4 % da velocidade crítica), por intervalos de tempo determinados, após os quais o material era peneirado por 600 s e anotadas as massas retidas na peneiras. A massa passante em 1,0 mm, a qual foi tomada como medida do desgaste por revolvimento. Para efeito de análise de regressão tomou-se o valor de finos gerados até o tempo de 70 minutos.

A inferência de resistência pelo esclerômetro é feita pelo valor do rebote (*rebound*) lido diretamente em sua escala. As medidas foram efetuadas em superfícies previamente aplainadas de maciços rochosos *in situ* e nas faces dos corpos-de-prova cúbicos (arestas típicas de 0,05 m).

Para efeito de amarração com dados da literatura, dois corpos de mármore de Carrara (Itália) também foram ensaiados: um paralelepípedo com dimensões de 0,064 m por 0,073 m por 0,088 m e o outro cúbico com aproximadamente 0,05 m de arestas. Brown e Reddish (1997) relatam para o mármore de Carrara a tenacidade à

fratura (*fracture toughness*) média de $0,66 \text{ MN/m}^{1,5}$ e de massa específica média de 2.841 kg/m^3 . Fredrich e Evans (1989) registram para o mármore de Carrara os valores de módulo de Young (E) o valor de $39,2 \pm 5,6 \text{ GPa}$, enquanto Katz et al (2000) registram massa específica de 2.710, resistência à compressão uniaxial de 95 Mpa, bem como valor do rebote do esclerômetro de Schmidt de 58,6 (com desvio padrão de 0,8, provavelmente com esclerômetro de outro tipo que o aqui utilizado).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela II e III e as figuras 4 e 5 resumizam os resultados experimentais deste trabalho.

Tabela II – Caracterização dos materiais estudados – propriedades mecânicas típicas (expandida de Segato *et al*, 2004, com inclusão de dados de rebote do esclerômetro)

CARACTERÍSTICAS (MÉDIAS E DISPERSÕES)	ITA A	ITA B	BP	CX	ER	RES	DIREÇÃO DAS TENSÕES QUANTO AO ACAMAMENTO
Resistência à compressão uniaxial – Média [Mpa]	84,98	70,58	68,02	44,25	38,38	95,55	Concordante
Resistência à compressão uniaxial – Desvio padrão [Mpa]	17,70	3,40	20,70	24,10	14,60	3,00	Concordante
Resistência à compressão uniaxial – Coeficiente de variação [%]	20,83	4,82	30,43	54,46	38,04	3,14	Concordante
Resistência à compressão uniaxial – Média [Mpa]	73,03	60,38	71,82	28,57	45,05	-	Discordante
Resistência à compressão uniaxial – Desvio padrão [Mpa]	13,80	17,10	20,40	4,00	9,60	-	Discordante
Resistência à compressão uniaxial – Coeficiente de variação [%]	18,90	28,32	28,41	14,00	21,31	-	Discordante
Dureza Rockwell – Média [-]	78,52	86,84	84,76	87,00	87,75	80,90	Concordante
Dureza Rockwell – Desvio padrão [-]	7,84	6,39	9,14	4,47	6,77	7,63	Concordante
Dureza rockwell – Coeficiente de variação [%]	9,99	7,36	10,79	5,13	7,72	9,43	Concordante
Absorção d'água aparente – Média [%]	0,84	0,50	0,61	1,15	1,02	-	Não se aplica
Absorção d'água aparente – Desvio padrão [%]	0,16	0,05	0,28	0,30	0,25	-	Não se aplica
Absorção d'água aparente – Coeficiente de variação [%]	19,05	10,00	45,90	26,09	24,51	-	Não se aplica
Rebote do esclerômetro – Média [-]	28,07	32,58	35,15	37,00	44,80	-	Concordante
Rebote do esclerômetro – Desvio padrão [-]	2,46	4,76	1,91	5,17	4,49	-	Concordante
Rebote do esclerômetro – Coeficiente de variação [%]	8,75	14,60	5,42	13,98	10,0	-	Concordante
Rebote do esclerômetro – Média [-]	27,52	37,80	33,75	35,28	43,97	-	Discordante
Rebote do esclerômetro – Desvio padrão [-]	8,75	4,85	1,76	4,25	4,25	-	Discordante
Rebote médio do esclerômetro – Coeficiente de variação [%]	31,80	12,84	5,21	12,05	9,67	-	Discordante

Para o mármore de Carrara ensaiado o rebote médio do esclerômetro foi igual a 29,70; com desvio padrão de 1,325 e o coeficiente de variação de 4,46 %.

As massas específicas médias calculadas para as amostras em tela foram, respectivamente: ITA A: 2.640 kg/m³; ITA B: 2.700 kg/m³; BP: 2.660 kg/m³; CX: 2.760 kg/m³ e ER: 2.590 kg/m³.

A partir de dados de Brown e Reddish (1997), pode-se ver que o mármore de Carrara é um ponto aberrante (com baixa tenacidade) resultando correlação estatística de 66,34 % para a regressão linear entre os valores médios da tenacidade à fratura (K_m) e a massa específica (ρ_m). Expurgando o ponto correspondente ao mármore de Carrara, obtém-se (com correlação de 84,55 %) a seguinte inter-relação entre tais grandezas (médias):

$$K_m = 0,00325 \times \rho_m - 7,032 \quad (1)$$

Kahraman (2001), cita a equação de Berverly (a partir de dados levantados por eles somados a dados preexistentes na literatura), que associa a resistência compressiva uniaxial (σ_{uni} , em MPa) com o rebote do esclerômetro de Schmidt (R) e a massa específica da rocha (ρ , em kg/m³), e é expressa por:

$$\sigma_{uni} = 12,74 \times e^{[1,85 \times 10^{-5} \times R \times \rho]} \quad (2)$$

A análise de regressão dos dados para os quartzitos estudados (figura 4) indica uma boa aderência para a equação:

$$\sigma = -2,276 \times R + 144,71 \quad (3)$$

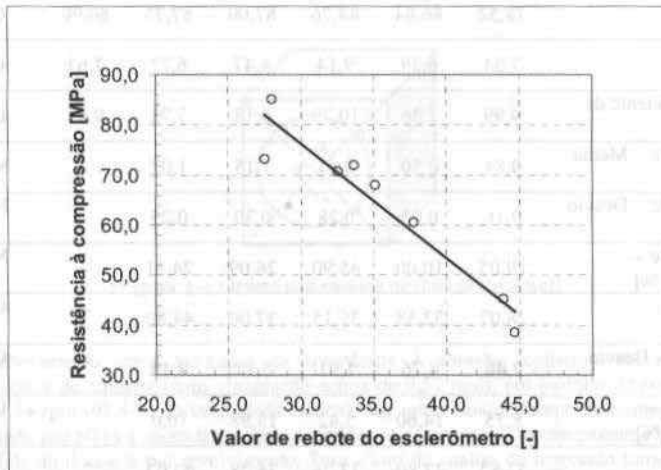


Figura 4 – Inter-relação entre os valores de rebote do esclerômetro de Schmidt e a resistência à compressão simples para os quartzitos estudados (ensaio em cubos).

A equação 3 resulta coeficiente de correlação estatística de 91,16 %. R é o valor de rebote lido na escala do esclerômetro e σ o valor de resistência à compressão. Esse resultado está, entretanto, em discordância (mesmo qualitativamente) com as equações disponíveis na literatura, com, por exemplo, a equação 2.

Por sua vez, tanto os valores de geração de finos (degradabilidade apresentada na figura 5), quanto os valores de absorção de água não apresentaram qualquer tendência de correlação com o valor do rebote. Já a dureza Rockwell mostrou tendência de ser maior com maior valor do rebote, mas a nuvem de dados não tinha pontos suficientes para estabelecimento quantitativo confiável.

Para o clorita-xisto, observou-se uma relação entre ensaio de compressão e rebote bem discordante daquelas equivalentes para os itabiritos, provavelmente devido a sua forte xistossidade e, portanto anisotropia. Inesperadamente esse tipo de rocha também resultou menor degradabilidade no ensaio de tamboramento (figura 5).

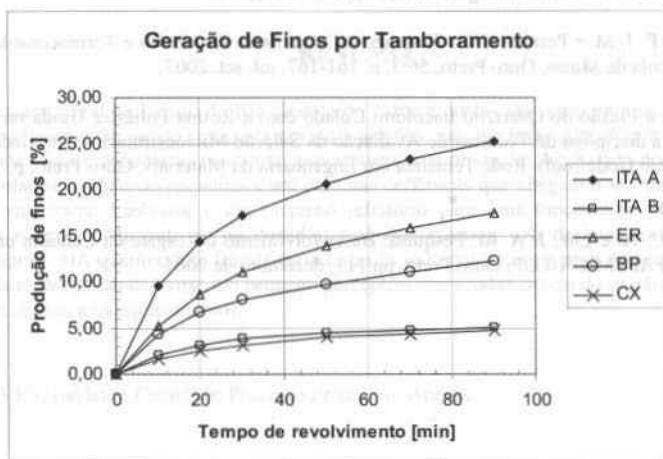


Figura 5 – Análise da degradabilidade via geração de finos (abaixo de 1 mm) com revolvimento das amostras (produção de finos expressa em porcentagem da massa inicial).

4. CONCLUSÕES

Os resultados confirmam a acentuada anisotropia dos itacolomitos e clorita-xistos utilizados em cantaria (inclusive com visível estratificação cruzada). O ensaio de desgaste por tamboramento mostrou-se adequado para a inferência da degradabilidade das peças de cantaria. Não foi possível ainda correlacionar a dureza e a porosidade aparente das rochas utilizadas em cantaria com os valores do rebote do esclerômetro, mas há a previsão da continuidade dos ensaios e, igualmente, do tratamento dos dados numéricos.

A correlação entre os valores de rebote e resistência à compressão obtida mostra elevado potencial de uso para a seleção expedita de matéria-prima para cantaria.

Entretanto, em face do caráter inesperado da correlação, deve-se dar continuidade aos estudos ampliando a nuvem de pontos experimentais para a consolidação da correlação até o momento observada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Basu A. & Aydin, A. A Method for Normalization of Schmidt Hammer Rebound Values. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41: p. 1211–1214, 2004.

- Bilgin, N., Dincer, T., Copur H. The Performance Prediction of Impact Hammers from Schmidt Hammer Rebound Values in Istanbul Metro Tunnel Drivages. *Tunneling and Underground Space Technology* 17; p. 237-247, 2002.
- Brown, G. J. & Reddish, D. J. Experimental Relations between Rock Fractures Toughness and Density. *International Journal of Mechanics and Mining Science*, 34:1, p.153-154, 1997.
- Fredrich, J. T. & Evans, B. Micromechanics of the Brittle to Plastic Transition in Carrara Marble. *Journal of Geophysical Research*, Volume 94, Issue B4, p. 4129-4145.
- Kahraman, S. Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial Compressive Strength of Rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38: p. 981-994, 2001.
- Katz, O., Reches, Z. and Roegiers, J-C. Evaluation of Mechanical Rock Properties Using a Schmidt Hammer. *International Journal of Mechanics and Mining Science*, 37, p.723-728, 2000.
- Luz, J. A. M., Balarezo, F. J. M. e Pereira, C. A. Emprego de Argamassa Expansiva e Termoconsolidação de Peças em Cantaria. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, 56:3, p. 161-167, jul. set. 2003.
- Neves, J. H. Resistência à Flexão do Quartzito Itacolomi Colado com a Resina Poliéster Usada na Restauração da Cantaria. Relatório para a disciplina de Técnicas de Avaliação da Seleção Microestrutura – Propriedades Mecânicas – RED169 (prof. Leonardo Godefroid). Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, p. 1-19, março de 2005.
- Segato, M. C., Pereira, C. A. e Luz, J. A. M. Pesquisa, Desenvolvimento e Resgate da Cantaria em Ouro Preto – Relatório Final. Projeto FAPEMIG/UFOP, Ouro Preto, pp.113, dezembro de 2004.