

## O EFEITO DOS CICLOS DE GELO E DEGELO NA RESISTÊNCIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS SILICÁTICAS DE BAIXA POROSIDADE

Emílio Velloso Barroso<sup>1</sup> e Josué Alves Barroso<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prof. Adjunto/Departamento de Geologia/UFRJ

<sup>2</sup> Prof. Titular/Laboratório de Engenharia Civil/UENF. Av. Alberto Lamego, 2000, Cidade Campus dos Goitacazys – Rio de Janeiro – RJ – CEP 20.000-000. Fone: (22) 2726-1517

### RESUMO

O Brasil tem um grande potencial para a produção de rochas ornamentais, principalmente granitos e outras rochas silicáticas de origem ígnea e metamórfica. O conhecimento das propriedades tecnológicas dessas rochas é um aspecto necessário para a certificação da qualidade do material. Quando o uso previsto é a aplicação como revestimento externo de construções, há uma concordância que se deve avaliar o efeito da degradação da resistência mecânica devido a ciclos de congelamento e degelo, sobretudo quando o material se destina a países de climas temperados. Sabe-se que essa degradação física deve estar relacionada com o aumento do volume experimentado pela água, eventualmente presente nos poros da rocha, quando da passagem do estado líquido para o estado sólido. Como resultado desse processo, há o surgimento e extensão de micro-fissuras que podem levar à degradação progressiva do material e, como consequência, de sua performance na obra.

No Brasil este efeito pode ser verificado com a execução do ensaio NBR 12769 (ABNT, 1992), preconizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas. Nessa norma define-se o coeficiente de enfraquecimento (K) pela razão entre as resistências à compressão simples após a rocha ter sido submetida a ciclos de congelamento e degelo e no seu estado natural. Quanto maior a degradação, menor o valor de K.

Nesse artigo investiga-se o efeito deletério de ciclos de congelamento e degelo sobre a resistência à compressão de rochas silicáticas de baixa porosidade. Diversos ensaios foram executados em diferentes tipos litológicos dessa classe de rochas e também fez-se uso de dados disponíveis na literatura brasileira. A análise dos resultados sugere que o coeficiente de enfraquecimento parece não descrever adequadamente o efeito dos ciclos de congelamento e degelo quando comparado com a variabilidade intrínseca da resistência à compressão simples de rochas silicáticas, cujas porosidades são tipicamente inferiores a 1%.

### INTRODUÇÃO

Quando as rochas ornamentais são comercializadas para mercado externo, sobretudo se a exportação destina-se aos países de clima temperado, entende-se que a susceptibilidade à alteração por ciclos de congelamento e degelo deva

ser avaliada. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas prescreve os procedimentos experimentais para a verificação dos possíveis efeitos do congelamento e degelo sobre a resistência à compressão uniaxial da rocha, norma técnica NBR 12769 (ABNT, 1992).

A preocupação com este mecanismo específico de alteração física de rochas prende-se ao fato de que a água, fluido que mais comumente ocupa os espaços vazios (poros ou microfissuras) de uma rocha ornamental, sofre um aumento volumétrico de cerca de 9% ao passar do estado líquido para o estado sólido. Este aumento de volume pode induzir o aparecimento de tensões internas na rocha e fazer com que fissuras pré-existent se propaguem. O efeito mecânico deste processo é a redução da resistência da rocha com o tempo, o que pode comprometer sua performance na construção.

O efeito deletério do congelamento da água tem sido observado em afloramentos rochosos em regiões de clima temperado. A abertura de fraturas e a desagregação de maciços rochosos são exemplos freqüentemente relatados na literatura. No entanto, quando se trata da matriz de rochas silicáticas de baixa porosidade e absorção de água (e.g. granitos são), a redução da resistência após ciclos de congelamento e degelo não se confirma de forma inequívoca.

Neste artigo aborda-se o problema descrito sobre as rochas silicáticas, os *granitos* da indústria de rochas ornamentais, termo que inclui grande variedade de tipos petrográficos magmáticos e metamórficos (principalmente gnaisses). O que esta ampla gama de rochas tem em comum é classe de mineral que a forma. Predominam os silicatos, grupo de minerais formados pelo radical aniônico ( $\text{SiO}_4$ ), que se organiza em um arranjo tridimensional tetraédrico e se combina com cátions variados de alumínio, magnésio, ferro, cálcio, sódio e potássio para formar diferentes espécies minerais e, conseqüentemente, tipos litológicos distintos. Outra característica comum são os baixos valores de porosidade e absorção de água quando são.

Apresenta-se uma discussão teórica do efeito da água sobre a resistência de rochas e do papel do seu congelamento no interior de poros e fissuras. Em seguida são apresentados dados experimentais obtidos da literatura publicada no Brasil e de ensaios realizados no Laboratório de Mecânica e Tecnologia de Rochas do Departamento de Geologia da UFRJ. Os valores médios de resistência no

“estado natural” e após a ciclagem são usados para determinação do coeficiente de enfraquecimento K (ABNT, 1992). Faz-se também uma avaliação da importância de se considerar a variabilidade da resistência para a efetiva avaliação dos efeitos da ciclagem sobre a resistência da rocha.

### Aspectos Teóricos

O papel da água na resistência e compressibilidade de meios porosos, como os solos e as rochas, é descrito pelo princípio das tensões efetivas proposto por Terzaghi (1925). Aplicada uma tensão total ( $\sigma$ ) sobre um elemento de rocha, cujos vazios estão preenchidos com água, parte da tensão total ( $\sigma$ ) age na água e nos sólidos isotropicamente com intensidade  $u$  (poropressão) e a diferença (equação 1) representa um excesso que age exclusivamente na fase sólida (grãos minerais). Esta fração  $\sigma'$  (tensão efetiva) é que controla o comportamento de compressibilidade e resistência de rochas.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (\text{Equação 1})$$

Extensas investigações foram executadas nas décadas de 50 e 60 para se avaliar a aplicabilidade do princípio das tensões efetivas para rochas. Um dos estudos mais rigorosos do ponto de vista físico foi apresentado por Skempton (1960), que obteve expressões gerais aplicadas a problemas de resistência e compressibilidade de rochas. Até então assumia-se que a tensão efetiva era dada pela equação 2:

$$\sigma' = \sigma - (1 - a)u_w \quad (\text{Equação 2})$$

onde  $a$  é a razão entre a área de contato entre as partículas por unidade de área que atravessa o material e  $u_w$  é a pressão de água nos poros.

No caso de rochas de baixa porosidade o valor de  $a$  tende a um e as equações 1 e 2 se igualam. No entanto, Skempton (1960) apresentou evidências experimentais de que a equação 2 não é sempre válida e desenvolveu expressões mais gerais para a tensão efetiva em problemas de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade:

Para resistência:

$$\sigma' = \sigma - \left(1 - \frac{a \cdot \text{tg} \psi}{\text{tg} \phi}\right) u_w \quad (\text{Equação 3})$$

Para a compressibilidade:

$$\sigma' = \sigma - \left(1 - \frac{C_s}{C}\right) u_w \quad (\text{Equação 4})$$

onde  $\psi$  e  $C_s$  são respectivamente o ângulo de atrito intrínseco dos minerais que compõem os grãos da rocha e  $C_s$  é a compressibilidade dos grãos.  $\phi$  e  $C$

são o ângulo de atrito e a compressibilidade, respectivamente, do meio poroso.

Deve-se notar que para o caso de solos o valor de  $a$  tende a zero e a relação  $C_s/C$  também assume um valor muito pequeno, de forma que a equação de Terzaghi é uma boa aproximação para a tensão efetiva. No entanto para rochas saturadas a razão  $C_s/C$  pode variar de valores entre 0.1 e 1, a razão  $\text{tg} \psi / \text{tg} \phi$  varia tipicamente entre 0.1 e 0.3 e a relação entre áreas  $a$  não é desprezível.

Do ponto de vista prático e para o caso de rochas ornamentais silicáticas de baixa porosidade, o termo entre parênteses da equação 3 assume valores em torno de 0,8. Isto significa que a tensão efetiva prevista pela equação de Terzaghi, embora diferente, não introduz grandes erros.

As equações apresentadas acima são válidas para o caso de rochas saturadas. Uma análise da norma de ensaio para determinação da resistência à compressão uniaxial – NBR 12767 (ABNT, 1992) – revela que os procedimentos para saturação de amostras de rocha não são descritos. Este é um aspecto importante uma vez que no caso de rochas não saturadas surgem nas equações 3 e 4 um fator multiplicador de  $u_w$  que depende do grau de saturação da rocha,  $S_x$ .

Esta pequena discussão teve por objetivo mostrar de que forma diversos parâmetros das rochas contribuem para sua resistência e que podem induzir dispersão dos dados de resistência se procedimentos padrão não forem observados nos ensaios de laboratório para determinação da resistência à compressão uniaxial de rochas.

No caso dos ciclos de congelamento e degelo deve-se observar de que forma as microfissuras pré-existentes podem eventualmente se propagar na matriz da rocha e induzir a redução da resistência da rocha.

A propagação de micro-fissuras por ação do congelamento da água no interior das mesmas ocorre por dilatação ou expansão. Este modo de propagação é chamado de modo I em contraposição aos modos II e III onde as fraturas se propagam por cisalhamento.

O campo de tensões na extremidade de uma fissura controla a sua propagação e é caracterizado pelo fator de intensificação de tensão ( $K_I$ ), o qual depende da tensão externa aplicada à rocha e da geometria das microfissuras (equação 5).

$$K_I = \sigma_m (\pi l)^{-1/2} \quad (\text{Equação 5})$$

onde  $\sigma_m$  é a tensão que governa o deslocamento das paredes da microfissura e  $l$  é seu semi-comprimento. A equação 5 mostra que as tensões crescem nas vizinhanças da extremidade da fissura quanto maior for seu comprimento.

A fissura irá se propagar quando o fator de intensificação de tensão alcançar um valor crítico conhecido como tenacidade, assumida como uma propriedade do material e que expressa a resistência intrínseca para uma fratura se propagar.

**Resultados Experimentais**

Na seção anterior foi apresentada uma discussão acerca dos fatores intervenientes na resistência e na tenacidade de rochas. Apresentam-se nesta seção dados experimentais para a discussão da efetividade do efeito de ciclos de congelamento e degelo sobre a redução da resistência de rochas silicáticas.

Segundo a norma NBR 12769 (ABNT, 1992), a amostra é submetida a 25 ciclos de congelamento e degelo, sendo a eventual redução de resistência verificada por ensaios de compressão uniaxial no “estado natural” e após a ciclagem. Esta norma define o coeficiente de enfraquecimento (K), calculado pela razão da resistência nos ciclos de congelamento e degelo e a resistência no “estado natural”.

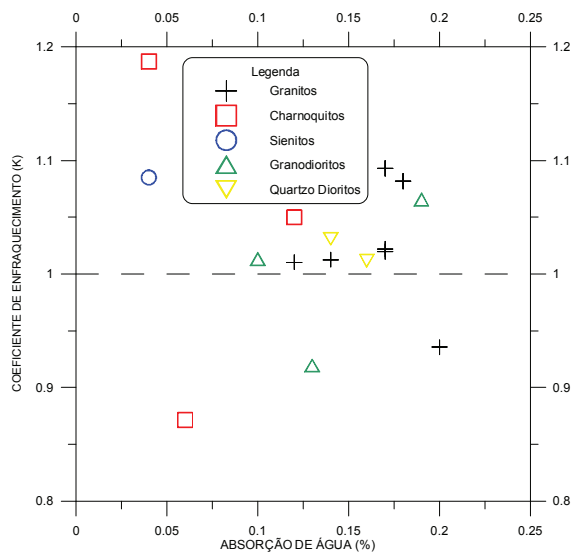
A tabela 1 apresenta dados de rochas ornamentais do Estado da Bahia, publicados pelo IPT (1994).

**Tabela 1 – Dados de algumas rochas do Estado da Bahia (IPT, 1994).**

Nome Fantasia	Grupo de Rocha	Tipo Litológico	Absorção (%)	Porosidade (%)	K
Amarelo Selvagem	GRANITOS	Granito	0,18	0,46	1,08
Azul Quati		Hn. Granito	0,17	0,46	1,02
Cacatua Bahia		Leucogranito	0,14	0,37	1,01
Cotton Bahia		Granito	0,12	0,31	1,01
Creme Bahia		Granito	0,17	0,46	1,02
Fantasia Paraguaçu		Granada Granito	0,18	0,46	1,08
Gran Colonial		Granito	0,20	0,52	0,94
Morro do Tigre Coralite		Granito	0,17	0,46	1,09
Morro do Tigre Velado		Granito	0,17	0,46	1,09
Verde Bahia		CHARNOQUITOS	Charnoquito	0,04	0,10
Verde Boa Nova	Charnoquito		0,12	0,31	1,05
Verde Dorato	Charnoquito		0,06	0,17	0,87
Blue Bahia	SIENITOS	Soda. Sienito	0,04	0,10	1,09
Café Bahia		Sienito	0,16	0,44	1,04
Lambada	GRANODIORITOS	Granodiorito	0,13	0,36	0,92
Monte Santo		Granodiorito	0,19	0,50	1,07
Vermelho. Tanquinho	QUARTZO DIORITO	Granodiorito	0,10	0,29	1,01
Maracanã		Quartzo Diorito	0,14	0,38	1,03
Tigrado		Quartzo Diorito	0,16	0,41	1,01

Na tabela 1 são apresentados dados de caracterização (absorção e porosidade), típicos de rochas silicáticas sãs, e do coeficiente de enfraquecimento K dessas rochas. Na Figura 1 pode-se observar que dos 19 tipos litológicos ensaiados pelo IPT, apenas 3 (15,8%) registraram efeitos de degradação da resistência provocada pela ciclagem de congelamento e degelo. Os decréscimos de resistência estão entre 5 e 15 %.

Grande parte das amostras ensaiadas apresentaram valores de K próximos a 1, denotando que 25 ciclos de congelamento e degelo foram insuficientes para produzir danos à estrutura interna destas rochas que pudessem se refletir nas suas resistências. Mais curioso, no entanto, foi observar que algumas amostras (envolvendo quase todos os tipos litológicos) apresentaram valores de K entre 1,05 e 1,19. Este inesperado resultado deve estar associado à própria variabilidade intrínseca das rochas.



**Figura 1 – Relação entre absorção e coeficiente de enfraquecimento para rochas do Estado da Bahia.**

No Laboratório de Mecânica e Tecnologia de Rochas do Departamento de Geologia da UFRJ foram ensaiadas várias rochas silicáticas do Estado do Rio de Janeiro, sempre saturadas. Para cada tipo litológico foram executados pelo menos 5 corpos de prova para cada condição, no “estado natural” e após ciclagem. Procurou-se avaliar a dispersão dos dados experimentais calculando-se o coeficiente de variação, definido como a razão percentual entre o desvio padrão e a média para uma dada propriedade tecnológica, e compara-lo com a própria variação do coeficiente de enfraquecimento. A tabela 2 mostra os resultados obtidos.

A procedência das rochas estudadas é o próprio Estado do Rio de Janeiro, sendo que o primeiro leptinito e o meta quartzo diorito são da própria Cidade do Rio de Janeiro, a Pedra Madeira e a Olho de Pombo são procedentes do Município de Santo Antônio de Pádua e as demais são do Município de Campos dos Goytacazes.

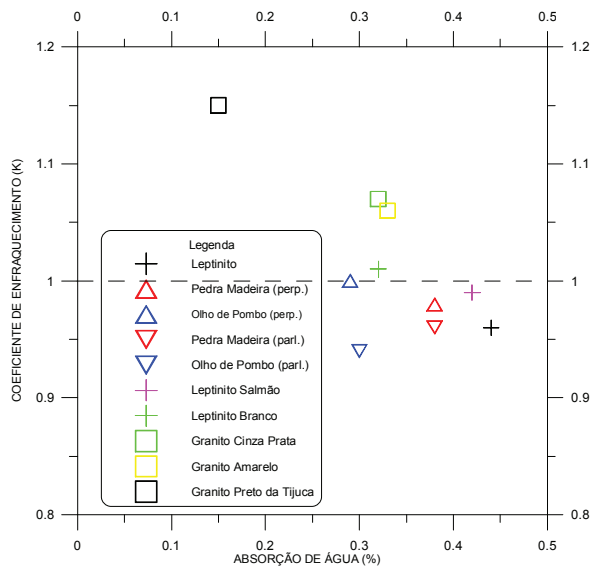
A análise dos dados revela que não houve um efeito notável da ciclagem sobre a resistência à compressão uniaxial das rochas ensaiadas. Chama a atenção o fato de que o valor de K foi inferior à unidade em quase todas as rochas com foliação. Outro aspecto interessante é a comparação da variação relativa da resistência, expressa pelo valor de K, com o coeficiente de variação. O primeiro é sempre da mesma ordem de grandeza ou maior uma ordem de grandeza. A figura 2 ilustra a distribuição dos valores de K em função da absorção de água das rochas que constam da tabela 2.

Deve-se notar que apenas duas rochas têm a média da absorção de água acima do limite superior sugerido por Frazão e Farjallat (1996) que é de 0,4%. Com relação as resistências no estado natural, apresentadas na tabela 2, todas as amostras apresentaram valores médios superiores ao limite inferior de 100 MPa sugerido pelos referidos autores.

**Tabela 2 – Resultados de algumas rochas do Estado do Rio de Janeiro.**

Nome Fantasia	Tipo Litológico	R.C.S. "Estado Natural" (MPa)	n	Co.V (%)	R.C.S. "Após Ciclagem" (MPa)	n	Co.V (%)	K
	Leptinito	104,0	5	3,6	99,8	6	4,2	0,96
Pedra Madeira	Gnaíse Milonítico (1)	152,3	5	25,0	148,6	5	19,6	0,98
Olho de Pombo	Gnaíse Milonítico (1)	147,6	4	5,2	148,0	5	6,5	1,00
Pedra Madeira	Gnaíse Milonítico (2)	145,4	5	12,1	139,3	5	14,5	0,96
Olho de Pombo	Gnaíse Milonítico (2)	122,7	5	4,0	115,6	5	5,8	0,94
Leptinito Salmão	Leptinito (1)	106,2	5	7,4	104,7	5	8,5	0,99
Leptinito Branco	Leptinito(1)	125,0	5	3,8	125,8	5	4,6	1,01
Granito Amarelo	Granito	110,1	5	2,5	116,8	5	1,8	1,06
Granito Cinza Prata	Granito	122,3	6	4,2	131,2	6	3,1	1,07
Granito Preto da Tijuca	Meta Quartzo Diorito	110,3	8	4,4	127,4	8	4,1	1,15

R.C.S. – Resistência à compressão simples, Co.V. – Coeficiente de variação  
(1)Carregamento perpendicular à foliação, (2)Carregamento paralelo à foliação

**Figura 2 – Variação dos valores de K em função da absorção de água para as rochas do Rio de Janeiro.**

## CONCLUSÃO

Os dados apresentados neste artigo, referentes a uma grande variedade de rochas silicáticas de dois estados brasileiros e ensaiadas em dois laboratórios distintos, permitem algumas conclusões quanto ao comportamento desta classe de rochas mediante a ciclagem térmica com ciclos de congelamento e degelo.

Estas rochas são pouco ou não afetadas pela ciclagem. Possivelmente o número de ciclos proposto pela NBR 12 767 (ABNT, 1992) é insuficiente para produzir efeitos sensíveis sobre rochas desta natureza.

A variação percentual da resistência à compressão uniaxial, no estado natural e após a ciclagem, é da mesma ordem de grandeza ou menor

que a variabilidade intrínseca associada a esta propriedade tecnológica. Esta constatação torna ainda mais difícil tomar o valor de K para avaliar os possíveis efeitos deletérios deste processo de alterabilidade.

O processo de carregamento externo de uma rocha pode induzir tensões de tração localizadas, como pode acontecer também com fissuras saturadas por fluidos sob pressão. Assim, para se conhecer o efeito do congelamento sobre a propagação de fraturas na rocha é necessário estimar a pressão ocasionada pela expansão volumétrica da água quando esta passa para o estado sólido, bem como a distribuição e geometria destas fissuras e, finalmente, a tenacidade das rochas. A modelagem numérica destes parâmetros pode ajudar a estabelecer o número de ciclos necessários para que haja algum efeito deletério sobre a resistência da rocha.

As rochas carbonáticas (mármore e calcários), embora não tenham sido abordadas diretamente neste trabalho, merecem um comentário. Devido a compressibilidade mais elevada dos minerais que as compõem, a poropressão  $u_w$  deve ter valor mais elevado e contribuir significativamente para a magnitude da tensão efetiva (equação 4). Portanto, os procedimentos para a saturação da rocha devem ser estritamente estabelecidos, pois caso contrário as variações nas saturações podem induzir variações de resistência ainda mais elevadas do que aquelas observadas para as rochas silicáticas. Vale ressaltar que os procedimentos de saturação não estão descritos pela norma para determinação da resistência à compressão uniaxial – NBR 12767 (ABNT, 1992).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. 1992. NBR 12767, Rochas para revestimento – determinação da resistência à compressão uniaxial. 2p.
- ABNT. 1992. NBR 12769, Rochas para revestimento – ensaio de congelamento e degelo conjugado à verificação da resistência à compressão. 2p.
- Frazão, E. B. & Farjallat, J. E. S. 1996. Proposta de Especificação para Rochas Silicáticas de Revestimento. Contribuição técnica ao 8º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. Rio de Janeiro, RJ. p. 369-80.
- IPT. 1994. Catálogo de rochas ornamentais do Estado da Bahia. Coord. Hélio Carvalho Antunes de Azevedo. Salvador: Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico – SEDES. Salvador, BA. 148p.
- Skempton, A. W. Effective stress in soils, concrete and rocks. Conference on pore pressure and suction. London. Pp: 4-16.
- Terzaghi, K. 1925. Erdbaumechanik. Franz Deuticke, Vienna.