

# FACTOR DE QUALIDADE EM ROCHAS ORNAMENTAIS COM BASE EM ENSAIOS MECÂNICOS E ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

Quality index of natural stones based on mechanical tests and artificial ageing

Joaquim Simão\*

Cristina Carvalho\*\*

Zenaide Silva\*\*\*

António Casal Moura\*\*\*\*

**RESUMO** – As rochas ornamentais em geral, incluindo as rochas graníticas, quando utilizadas em centros urbanos, entram processo de alteração acelerada, uma vez expostas a atmosferas poluídas. Para estudar estes efeitos realizaram-se ensaios de caracterização física e mecânica e ensaios de envelhecimento acelerado com soluções ácidas (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HNO<sub>3</sub>) conjugados com ensaios de gelividade nos granitos de Monção, Vila Real, Castelo de Vide e de Monforte, Gabro de Odivelas e Sienito Nefelínico de Monchique. Calculou-se a percentagem de decréscimo das propriedades das rochas relativamente ao valor inicial e um factor de qualidade Q. Os resultados obtidos forneceram indicações sobre as degradações sofridas pelas rochas, prevendo o seu comportamento quando utilizadas em circunstâncias semelhantes. O conhecimento sobre estas rochas no que diz respeito às limitações do ponto de vista tecnológico traduz-se numa garantia de qualidade para os produtos da indústria de rochas ornamentais.

**SYNOPSIS** – Granitic rocks and other rock types used as dimension stones become easily altered once exposed to the atmosphere in urban centres and this process can be accelerated depending on how polluted the atmosphere is. In order to define the specific effects on rocks, several different experiments were carried on covering mechanical and physical tests, after promoting artificial ageing caused by acid environments (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>), combined with freeze and thaw exposure. The rocks used in the experiments were: Monção, Vila Real, Castelo de Vide and Monforte granites and other undersaturated rocks (Gabbro from Odivelas and the Monchique Nepheline Syenite). The decrease of rock property values (in percentage) relative to the initial values and the quality factor Q were determined. This relationship indicates the degradation experienced by each rock under similar natural environments and the constraints for the rock uses. This type of data represents a quality warranty for the natural stone industry.

**Palavras Chave** – rochas ornamentais, ensaios tecnológicos, factor de qualidade, envelhecimento acelerado.

---

\* Professor Auxiliar, Departamento de Ciências da Terra, Universidade Nova de Lisboa. E-mail: jars@fct.unl.pt

\*\* Técnico Superior Principal, INETI, Laboratório de S. Mamede de Infesta. E-mail: cristina.carvalho@ineti.pt

\*\*\* Professor Associado com Agregação, Departamento de Ciências da Terra, Universidade Nova de Lisboa. E-mail: zcs@fct.unl.pt

\*\*\*\* Ex-Acessor Principal, INETI, Laboratório de S. Mamede de Infesta. E-mail: casal.moura@ineti.pt .

## **1 – INTRODUÇÃO**

As implicações tecnológicas resultantes da alteração e alterabilidade de rochas silicatadas, tidas como pouco vulneráveis em ambientes poluídos, são um tema de importância crescente na sociedade actual.

Recentemente verificou-se que algumas rochas graníticas utilizadas como rocha ornamental, com aplicação em centros urbanos, entraram em processo de alteração acelerada quando expostas a ambientes atmosféricos poluídos.

São também conhecidos diferentes aspectos de alteração química e mecânica em vários tipos de rochas silicatadas encontradas nas fachadas de edifícios em diferentes cidades da Europa, como Lisboa, bem como aspectos particulares de alteração em algumas das rochas ígneas portuguesas.

As rochas seleccionadas para este estudo são os granitos de Monção, de Vila Real, de Castelo de Vide (“Branco Caravela”) e de Monforte, o Gabro de Odivelas e o Sienito Nefelínico de Monchique.

Após estudos petrográficos e ensaios de caracterização física e mecânica, as rochas foram submetidas a ensaios de envelhecimento acelerado com soluções ácidas (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HNO<sub>3</sub>) conjugados com ensaios de gelividade em câmara de gelo-degelo. Foram efectuados ensaios de resistência à flexão sob carga centrada e medições de frequência de ressonância longitudinal de forma sistemática nas amostras das diferentes rochas antes e após gelo-degelo e, também, associando este teste com a exposição prévia a soluções acidificadas durante 45 e 90 dias.

Os resultados obtidos forneceram indicações sobre as degradações sofridas pelas rochas submetidas a ensaio, fazendo prever o seu comportamento quando utilizadas em circunstâncias naturais semelhantes e em locais onde rochas do mesmo tipo foram ou possam vir a ser aplicadas.

Na tentativa de avaliar qualitativamente a resposta de cada rocha às condições ensaiadas, a representatividade dos valores foi calculada através da percentagem de decréscimo da propriedade relativamente ao valor inicial obtido e com base num factor de qualidade Q.

Os estudos e considerações sobre a alteração e alterabilidade das rochas ígneas ornamentais pretendem, por um lado, encontrar relações entre materiais litológicos semelhantes mas com diferentes origens e, por outro, dar apoio na definição de aplicações adequadas para esses materiais. Permite, também, identificar de que modo factores como a composição mineralógica, a textura, o estado inicial de alteração, as condições climáticas e os poluentes atmosféricos, actuando isoladamente ou em conjunto, provocam a instabilidade dos minerais, alterando as propriedades físicas e mecânicas das rochas.

Entende-se que a indústria das rochas ornamentais pode beneficiar com este tipo de estudos pelo facto de, a par do conhecimento tecnológico dos materiais que produz e comercializa, também permitir adoptar uma atitude de garantia de qualidade para os seus produtos.

## **2 – CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA DAS ROCHAS ÍGNEAS ORNAMENTAIS**

As amostras de rochas utilizadas na realização dos estudos petrográficos, mineralógicos e nos ensaios de caracterização física e mecânica e de envelhecimento acelerado foram obtidas em pedreiras exploradas por diferentes empresas da indústria extractiva de rochas ornamentais.

O estudo petrográfico envolveu uma descrição macroscópica das rochas em amostra de mão, descrição ao microscópio petrográfico e estudo dos minerais essenciais, em microsonda electrónica.

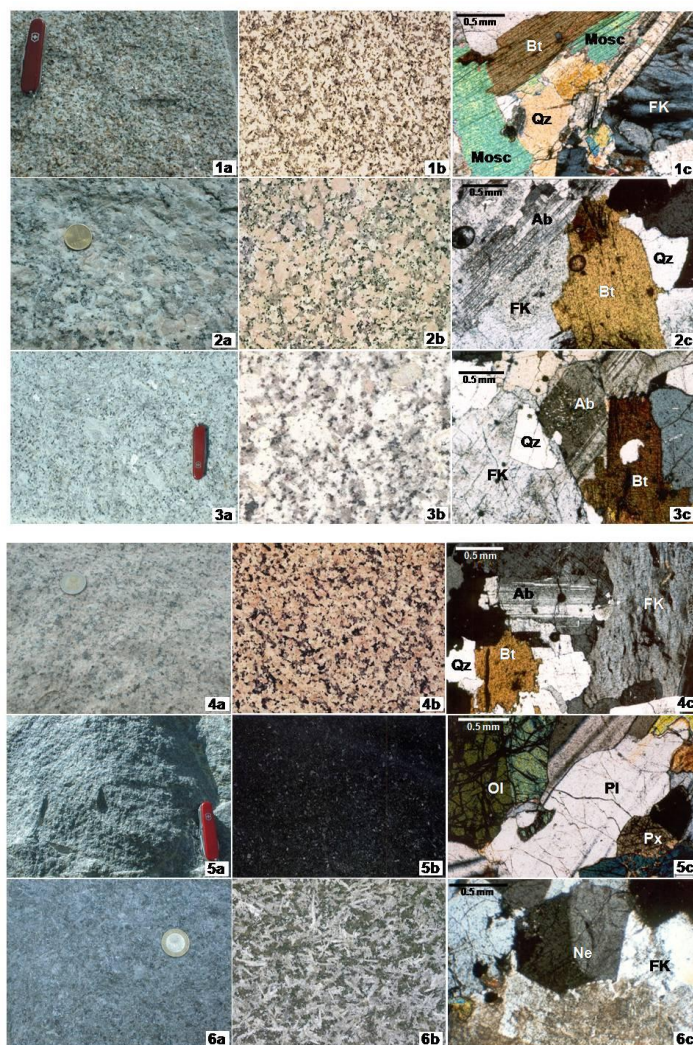
No Quadro 1 e com base em Simão (2003) resumem-se as principais características mineralógicas e petrográficas das rochas ígneas ornamentais seleccionadas para este estudo.

Indica-se, também, a sua designação comercial, as empresas exploradoras e transformadoras de cada tipo litológico e a localização geográfica das pedreiras. As características gerais destas pedreiras e os diferentes tipos de exploração estão descritos em Moura (2000), <http://rop.ineti.pt/rop/> (2007) e Vários (1983/4/5 e 1995).

**Quadro 1** – Resumo das principais características mineralógicas e petrográficas das rochas ígneas ornamentais estudadas.

Nome da Rocha	Granito de Monção	Granito de Vila Real	Granito de Castelo de Vide	Granito de Monforte	Gabro de Odivelas	Sienito nefelínico de Monchique
Designação comercial	Cristal Rosa	Amarelo Vila Real ou Amarelo Real	Granito Branco Caravela	Forte Rosa	Preto Odivelas	Cinzento Monchique
Empresa exploradora	Mármore Longarito	JMM	Granitos de Maceira	Granisintra	Ferbritas	Sienave
Localização Geográfica	Sanfins (Concelho de Valença)	S. Tomé do Castelo (Concelho de Vila Real)	Cancho de S. Lourenço, (Concelho de Castelo de Vide)	Mação de Santa Eulália (Concelho de Monforte)	Odivelas (Concelho de Ferreira do Alentejo).	Nave de Monchique, (Algarve)
Descrição Macroscópica	granito calcialcalino com textura fanerítica de grão grosseiro a médio, porfiróide, leucocrata, biotítico, de cor rosada homogénea	textura fanerítica de grão médio a grosseiro, por vezes porfiróide, leucocrata, de duas micas, moscovítico e com alteração intensa que lhe confere tom amarelado	granito de cor branca, com textura fanerítica de grão médio a grosseiro, porfiróide, com duas micas (predominando a biotite), com fenocristais de feldspato	granito com textura fanerítica de grão médio, homogénea, leucocrata, tonalidade rósea-avermelhada, biotítico	gabro olivínico de cor negra acinzentada, melanocrata, com textura fanerítica de granularidade média, homogénea	sienito com textura fanerítica de grão médio a grosseiro, leucocrata, com tonalidade geral cinzenta
Descrição Microscópica	textura holocristalina, hipidiomórfica granular.	textura holocristalina, hipidiomórfica granular com tendência porfiróide, com alteração intensa dos feldspatos.	textura holocristalina, hipidiomórfica granular, porfiróide, algo tectonizada, com intensa caulínização nos feldspatos.	textura holocristalina, hipidiomórfica, granular, ligeiramente fracturada.	textura holocristalina, hipautomórfica granular.	textura holocristalina, hipidiomórfica granular, com alguma microfracturação e caulínização.
Minerais essenciais	quartzo (25 %) microclina pertítica (35%) plagioclase, An <sub>14,5</sub> (27%) biotite (10%)	quartzo (27%) plagioclase An <sub>7-12</sub> (26%) microclina (30%) biotite (6%) moscovite (10%)	quartzo (32%) microclina pertítica (36%) plagioclase, An <sub>2,6</sub> , albite (16%) biotite (12%) moscovite (2%)	microclina pertítica (42%), plagioclase. albite, An <sub>3-6</sub> , (18%) quartzo (22%) biotite (13%)	plagioclase, labradorite, An <sub>59-63</sub> (66%) piroxena, augite (24%), olivina, Fa <sub>28</sub> , (8%)	ortoclase caulínizada (45%), microclina, albite (2%) nefelina(22%) aegirina-augite (10%) esfena(8%) biotite (6%)

Na Figura 1 pode observar-se o aspecto macroscópico das rochas ornamentais *in situ* e após polimento, assim como fotografias das mesmas em lâmina delgada ao microscópio petrográfico.



**Fig. 1** – Aspecto macroscópico do Vila Real (1), Granito de Monção (2), Castelo de Vide (3), Monforte (4), Gabro de Odiveiras (5) e Sienito nefelínico de Monchique (6), frescos *in situ* (a) e após polimento (b, à escala natural) e respectivas microfotografias (c) em nicóis X (Pl – plagioclase, labradorite, Ol – olivina, Px – piroxena, Bt – biotite, FK – feldspato potássico, Ab – albite, Mosc – moscovite, Qz – quartzo, Ne – nefelina).

### 3 – METODOLOGIA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Ensaios de caracterização físico-mecânica e de envelhecimento acelerado

Os ensaios de caracterização física e mecânica foram realizados no Laboratório do INETI (Porto), em conformidade com metodologias baseadas nas Normas Europeias de ensaios para pedra natural. Foram levados a cabo em rochas frescas e após ensaios de envelhecimento acelerado.

Os ensaios estão descritos detalhadamente nas normas europeias constantes na 2ª coluna do Quadro 2, pelo que apenas se faz uma breve descrição dos ensaios de envelhecimento acelerado (resistência ao gelo e ataques ácidos) e daqueles realizados de um modo sistemático para avaliação do comportamento das rochas — resistência à flexão sob carga centrada e frequência de ressonância longitudinal fundamental. A selecção destes dois ensaios para a avaliação dos efeitos do envelhecimento acelerado sobre as rochas analisadas, teve como base o facto de serem os previstos, na maioria das normas de ensaios de envelhecimento acelerado sobre pedras naturais, para efectuar essa monitorização e avaliação.

A resistência à flexão sob carga centrada permite determinar o valor máximo da tensão de flexão de um provete, a partir da qual se dá a respectiva rotura, quando o mesmo é submetido a um aumento uniforme de carga. O procedimento correspondente funciona como um ensaio de caracterização ou como um ensaio tecnológico sobre elementos de construção que se destinam a ser utilizados em condições de solicitação à flexão, como poderá ser o caso das unidades de alvenaria, das lajes e guias para pavimentos exteriores, das placas para revestimento de paredes e para pavimentos e degraus, dos ladrilhos modulares e da cantaria dimensionada. Este ensaio aplica-se em provetes de materiais rochosos de forma paralelepípedica e secção rectangular ou quadrada.

A determinação da frequência de ressonância longitudinal fundamental de pedras naturais é aplicada em provetes prismáticos (de secção quadrada ou rectangular) ou cilíndricos, cujo comprimento deve ser, pelo menos, o dobro da maior dimensão da secção. Para uma dada voltagem, cada provete é submetido a vibrações discretas de um intervalo predefinido de frequências, nas quais se pressupõe estar situada a sua frequência de ressonância. No decurso do varrimento existem perdas na voltagem inicialmente definida, excepto nas proximidades da frequência de ressonância do provete, nas quais ocorre um incremento, que se torna máximo no momento em que essa frequência é atingida. O pico de voltagem é detectado e o correspondente valor da frequência de ressonância registado. Este ensaio, para além de possibilitar a determinação do módulo de elasticidade dinâmico da rocha (módulo de Young), permite monitorizar e avaliar os efeitos provocados por ensaios de envelhecimento acelerado, como é o caso do ensaio de resistência ao gelo.

A determinação da resistência ao gelo é um dos ensaios que integra o grupo dos ensaios de durabilidade. Aplica-se em provetes prismáticos de pedras naturais, tendo como objectivo avaliar as alterações nelas provocadas (na sua aparência visual e/ou nas suas características físico-mecânicas) quando submetidas a ciclos sucessivos de gelo-degelo. Cada ciclo é constituído por 6 horas de imersão em água a temperaturas positivas (degelo) e 6 horas, ao ar, a temperaturas abaixo dos 0°C (gelo). Neste estágio, a água que penetrou nas fissuras e poros abertos irá congelar aumentando de volume, fenómeno que com o decurso dos ciclos poderá provocar alteração estrutural da rocha (fissuração, desagregação, etc.) e, consequentemente, inaptidão no seu desempenho em obra. É, pois, um ensaio fundamental sempre que se pretenda utilizar uma rocha em aplicações exteriores de zonas com clima que inclua períodos regulares com temperaturas negativas.

A metodologia de envelhecimento acelerado adoptada, descrita em Simão (2003) e Simão e Carvalho (2005), teve como objectivo avaliar a degradação sofrida pelas amostras das rochas ígneas estudadas, após se submeterem provetes: a) somente a 25 ciclos de gelo-degelo, ou b) após imersão durante 45 e 90 dias, separadamente, em 3 soluções ácidas com a concentração de 0,25% (v/v) de HCl, de HNO<sub>3</sub> e de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, seguido de 25 ciclos de gelo-degelo. As 3 soluções foram preparadas a partir da diluição dos seguintes 3 ácidos concentrados: HCl a 37%, HNO<sub>3</sub> a 65% e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 98%. Resumidamente, de cada uma das rochas estudadas, foram serrados 24 provetes paralelepípedicos, com as dimensões de (30 x 30 x 180) mm e com uma das faces maiores com acabamento polido. Os 24 provetes de cada rocha foram divididos em 8 conjuntos

de 3 provetes cada. Um conjunto não foi submetido a qualquer tipo de envelhecimento acelerado — “rocha fresca” (Quadro 3). Outro conjunto foi sujeito, unicamente, a 25 ciclos de gelo-degelo. Para cada uma das soluções ácidas preparadas (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HNO<sub>3</sub>) foram utilizados 2 dos conjuntos constituídos: um para imersão durante 45 dias e outro durante 90 dias. A imersão nas soluções ácidas foi levada a cabo da seguinte forma: os provetes foram mergulhados apenas até uma profundidade de 4 mm (medidos a partir da sua base) e com a face polida voltada para baixo (em contacto com a solução ácida), em conformidade com a orientação que a rocha irá ter quando aplicada em obra. Em qualquer dos casos (exposição durante 45 e 90 dias) as soluções ácidas foram renovadas a cada 15 dias. Posteriormente, submeteram-se estes 6 conjuntos a 25 ciclos de gelo-degelo. Foi medida a frequência de ressonância longitudinal paralela à face polida, dos 8 conjuntos constituídos. Finalmente, determinou-se a resistência à flexão sob carga centrada em todos os provetes, com a força exercida perpendicularmente à face vista em obra (face polida).

### 3.2 Resultados experimentais

As características físico-mecânicas das rochas, enquanto frescas, estão patentes no quadro a seguir apresentado (Quadro 2).

Tal como descrito anteriormente, foram realizados ensaios de determinação da frequência de ressonância longitudinal e da resistência à flexão sob carga centrada, antes e após 25 ciclos de gelo-degelo e após combinações de ataques com soluções ácidas e 25 ciclos de gelo-degelo, com o objectivo de comparar os efeitos de ambientes agressivos, como a acção de climas frios e de chuvas ácidas. Os resultados obtidos encontram-se sintetizados no Quadro 3. Estes ensaios permitiram um conhecimento quantitativo das variações ocorridas na estrutura dos provetes e componentes mineralógicos, fazendo estimar o comportamento das rochas quando utilizadas em circunstâncias naturais semelhantes e em locais onde rochas do mesmo tipo foram ou possam vir a ser utilizadas.

A representatividade dos valores, de modo a poderem indiciar danos nas amostras, foi tratada tendo em conta limites habitualmente admitidos para as variações percentuais respectivas e alguns pressupostos, tais como: todos os ensaios foram efectuados após secagem dos provetes a massa constante; a amplitude da respectiva variação foi calculada através da percentagem de decréscimo da propriedade, relativamente ao valor inicial obtido; as variações consideradas significativas referem-se, genericamente, a valores em que a resistência à flexão sob carga centrada e a frequência de ressonância decresceram mais de 10% relativamente aos seus valores iniciais. No entanto para esta avaliação foi, fundamentalmente, tido em consideração o conceito a seguir desenvolvido — “Factor de Qualidade Q” (Quadro 3 e Gráficos 1 e 2).

**Quadro 2** - Resumo das propriedades físicas e mecânicas das rochas frescas.

Propriedades físicas e mecânicas	Norma Europeia	GRCV	GRVR	GRMÇ	GRMF	GbOdiv	SN
Resistência à compressão (MPa)	EN 1926	169	81	140	210	138	103
Resistência à flexão sob carga centrada (MPa)	EN 12372	15,0	6,3	16,5	18,1	28,4	15,0
Massa volúmica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	EN 1936	2640	2600	2640	2610	2880	2540
Absorção de água à pressão atmosférica (%)	EN 13755	0,2	0,7	0,3	0,2	0,0	0,4
Porosidade aberta (%)	EN 1936	0,6	1,9	0,8	0,5	0,0	0,9
Coefficiente de dilatação linear térmica (valor máximo – $n \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ )	EN 14581 (adaptada)	8,4	7,1	6,5	9,8	6,0	13,8
Resistência ao desgaste Amsler- Laffon (mm de desgaste/m de percurso)	EN 14157	0,1/200	0,7/200	0,2/200	0,3/200	0,5/200	0,5/200
Resistência ao choque (Joules)	EN 14158	5	6	7	5-6	6	5

Na tentativa de avaliar qualitativamente a resposta de cada rocha às condições ensaiadas, foi também adaptado um recurso semelhante ao “factor de qualidade  $Q$ ”, proposto por Perrier e Bouineau (1997), e adaptado por Moura e Carvalho (2001), partindo do princípio que o valor do aumento de degradação tem comportamento logarítmico em qualquer dos ensaios utilizados para a sua avaliação.

O algoritmo utilizado foi o seguinte:

$$Q = \frac{1}{\log A - \log A'}$$

em que:

A - é o valor inicial da propriedade

A' - é o valor da propriedade após exposição dos provetes a determinado tipo de ensaio de envelhecimento acelerado.

Da fórmula anterior deduz-se que, não ocorrendo qualquer variação, o factor  $Q$  é infinito ( $\infty$ ) e por isso, quanto menores forem as variações sofridas maiores serão os valores de  $Q$ . Deste modo, menor variação do valor da propriedade significa maior qualidade e vice-versa. O cálculo de  $Q$  resultante da avaliação da variação da resistência à flexão sob carga centrada e da frequência de ressonância (Quadro 3 e Gráficos 1 e 2) possibilitou distinguir conjuntos de valores para as diferentes rochas após acção de gelo-degelo isolada, ou após ataque com cada solução ácida. Com base nos pendores observados nos Gráficos 1 e 2, nos troços definidos pelos pontos dos Factores  $Q$  para diferentes condições de envelhecimento acelerado, após a sua re-ordenação por ordem decrescente do Factor  $Q$ , foram constituídos 3 grupos: grupo de amostras mais afectadas e com factor de qualidade baixo ( $Q \leq 20$ ); grupo de amostras pouco afectadas com factor de qualidade intermédio ( $20 < Q < 30$ ) e grupo de amostras menos afectadas e com factor de qualidade alto ( $Q \geq 30$ ). É de salientar que a definição destes grupos foi consubstanciada pelas percentagens de decréscimo, quer da resistência à flexão, quer da frequência de ressonância, relativamente aos valores obtidos para a rocha fresca. Na generalidade, decréscimos  $\geq 10\%$  correspondem a  $Q \leq 20$ ; decréscimos entre 8 e 9% correspondem a  $20 < Q < 30$ ; decréscimos  $< 8\%$  correspondem a  $Q \geq 30$ .

**Quadro 3 – Valores da resistência à flexão sob carga centrada e da frequência de ressonância longitudinal, factor de qualidade Q e respectiva Classe.**

ROCHA	Amostra	Res. Flexão carga centrada			Frequência ressonância		
		(MPa)	factor Q	Classe Q	(Hz)	factor Q	Classe Q
Granito de Monção	rocha fresca	16,5	—	—	3459	—	—
	após 25 ciclos de gelo-degelo	15,7	47	≥ 30	3331	48	≥ 30
	45 dias HCl + gelo-degelo	15,0	25	20 < Q < 30	3259	33	20 < Q < 30
	45 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	15,2	29		3159	23	
	45 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	15,0	25		3050	17	
	90 dias HCl + gelo-degelo	14,5	18	≤ 20	3117	20	≤ 20
	90 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	14,4	17		3053	17	
	90 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	14,5	18		2950	14	
Granito de Monforte	rocha fresca	18,1	—	—	3555	—	—
	após 25 ciclos de gelo-degelo	17,2	41	≥ 30	3359	40	≥ 30
	45 dias HCl + gelo-degelo	16,9	32		3290	30	
	45 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	16,9	32		3288	29	20 < Q < 30
	45 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	16,5	24	20 < Q < 30	3221	23	
	90 dias HCl + gelo-degelo	16,0	18	≤ 20	3159	19	≤ 20
	90 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	15,9	17		3220	23	20 < Q < 30
	90 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	16,0	18		3091	16	≤ 20
ROCHA	Amostra	Res. Flexão carga centrada			Frequência ressonância		
		(MPa)	factor Q	Classe Q	(Hz)	factor Q	Classe Q
Granito de Castelo de Vide	rocha fresca	15,0	—	—	4509	—	—
	após 25 ciclos de gelo-degelo	13,4	21	20 < Q < 30	4137	27	20 < Q < 30
	45 dias HCl + gelo-degelo	13,2	18	≤ 20	4306	50	≥ 30
	45 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	13,6	24	20 < Q < 30	4180	30	
	45 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	13,6	24	≤ 20	4045	21	20 < Q < 30
	90 dias HCl + gelo-degelo	13,1	17		3700	12	≤ 20
	90 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	12,9	16		3228	7	
	90 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	12,4	12		2943	5	
Granito de Vila Real	rocha fresca	6,3	—	—	3955	—	—
	após 25 ciclos de gelo-degelo	4,6	16	≤ 20	3824	68	≥ 30
	45 dias HCl + gelo-degelo	4,8	9		3746	42	
	45 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	5,4	15		3089	9	≤ 20
	45 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	4,7	8		2927	8	
	90 dias HCl + gelo-degelo	4,6	7		2909	7	
	90 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	5,1	11		2679	6	
	90 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	4,5	7		2695	6	
ROCHA	Amostra	Res. Flexão carga centrada			Frequência ressonância		
		(MPa)	factor Q	Classe Q	(Hz)	factor Q	Classe Q
Sienito Nefelínico de Monchique	rocha fresca	15,0	—	—	4002	—	—
	após 25 ciclos de gelo-degelo	14,0	34	≥ 30	3758	37	≥ 30
	45 dias HCl + gelo-degelo	13,8	28	20 < Q < 30	3634	24	20 < Q < 30
	45 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	13,5	22		3492	17	≤ 20
	45 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	13,3	20		3335	13	
	90 dias HCl + gelo-degelo	13,3	20	3473	16		
	90 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	12,9	16	3327	12		
	90 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	12,9	16	3228	11		
Gabro de Odivelas	rocha fresca	28,4	—	—	4136	—	—
	após 25 ciclos de gelo-degelo	26,7	36	≥ 30	4081	172	≥ 30
	45 dias HCl + gelo-degelo	26,3	29	20 < Q < 30	4086	139	
	45 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	25,7	23		3900	39	≤ 20
	45 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	24,5	16	≤ 20	3328	11	
	90 dias HCl + gelo-degelo	25,3	20		4048	107	≥ 30
	90 dias H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + gelo-degelo	24,9	17		3369	11	≤ 20
	90 dias HNO <sub>3</sub> + gelo-degelo	24,0	14		3118	8	



Após 25 ciclos de gelo-degelo simples, as rochas demonstraram, de um modo geral, baixa % de variação quer da resistência à flexão sob carga centrada, quer da frequência de ressonância e, conseqüentemente, um factor de qualidade Q elevado. As excepções foram o Granito de Castelo de Vide (“Branco Caravela”), com um factor de qualidade intermédio para ambas as propriedades e o Granito de Vila Real, com um factor de qualidade baixo para a resistência à flexão sob carga centrada.

Gráfico 1

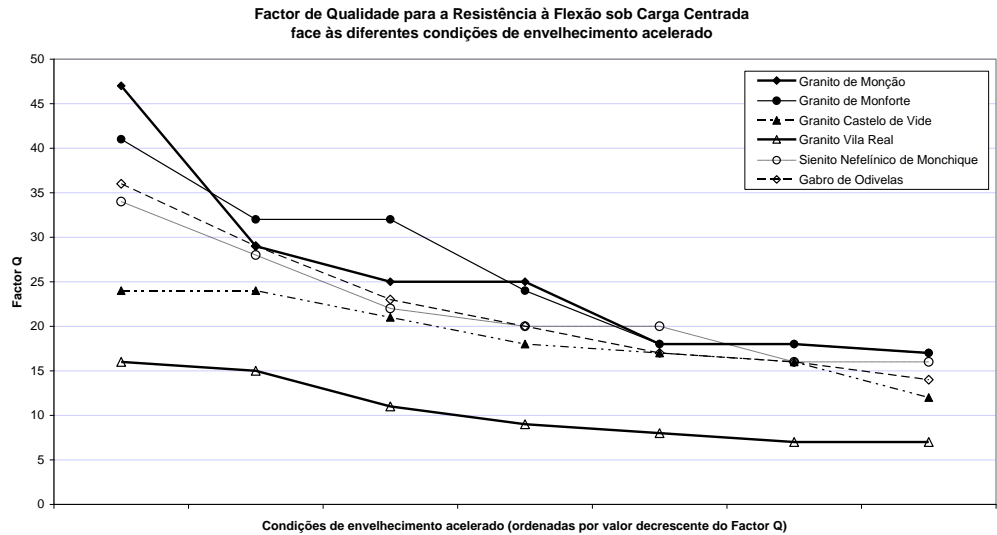
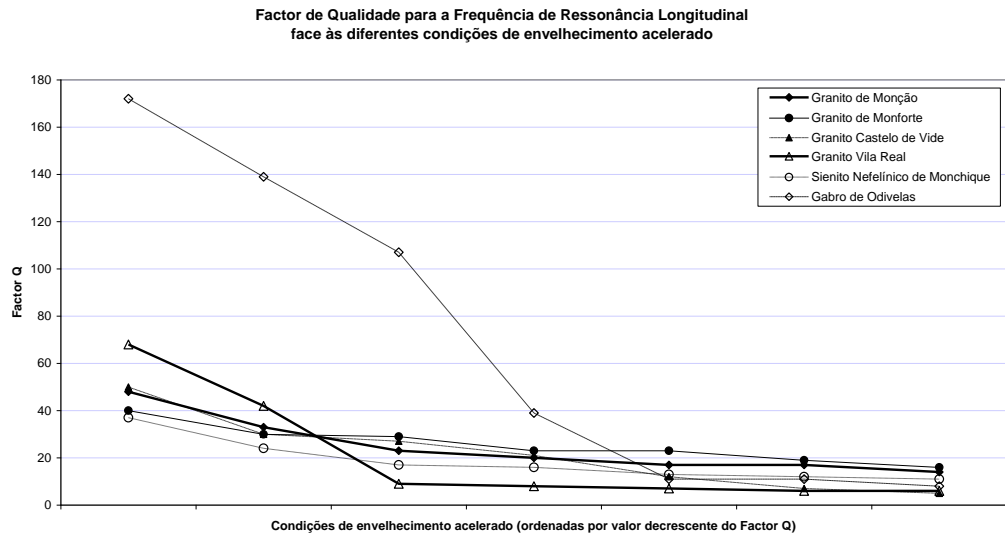


Gráfico 2



Quando se conjugaram as acções do gelo-degelo com as dos ataques ácidos, o Granito de Monforte e o Granito de Monção apresentaram um comportamento relativamente semelhante para a resistência à flexão sob carga centrada: diminuições significativas e um factor de qualidade baixo após 90 dias de ataque com qualquer das soluções acidificadas seguido de gelo-degelo. Para a frequência de ressonância o comportamento foi idêntico; no entanto, o Granito de Monforte revelou melhor comportamento após 90 dias de ataque com a solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  seguido de gelo-degelo, com um factor de qualidade intermédio, enquanto que o Granito de Monção manifestou pior comportamento logo após 45 dias de ataque com a solução de  $\text{HNO}_3$  seguido de gelo-degelo.

O Granito de Castelo de Vide (“Branco Caravela”) apresentou baixas variações dos valores e respectivo factor de qualidade elevado para a frequência de ressonância e somente em 2 situações: após 45 dias com  $\text{HCl}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  seguido de gelo-degelo. Obteve maiores variações e factor de qualidade baixo após 90 dias para todos os ácidos + gelo-degelo, quer para a resistência à flexão sob carga centrada, quer para a frequência de ressonância.

O Granito de Vila Real apresentou variações de valores acima de 10% para ambas as propriedades e em quase todas as situações de ensaio. Daí resultou um factor de qualidade quase sempre baixo para ambas as propriedades e para todas as soluções ácidas após gelo-degelo, excepto após 45 dias  $\text{HCl}$  + gelo-degelo.

O Sienito Nefelínico de Monchique apenas não revelou elevadas variações percentuais dos valores e, consequentemente, um factor de qualidade baixo, após 45 dias com  $\text{HCl}$  + gelo-degelo, em ambas as propriedades, e após 45 dias com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + gelo-degelo para a resistência à flexão sob carga centrada, situações nas quais manifestou um factor Q intermédio.

O Gabro de Odivelas, apesar de apresentar boas propriedades físico-mecânicas iniciais, é uma rocha que contém minerais susceptíveis à alteração, como é o caso da olivina e das piroxenas. Mostra variações significativas na resistência à flexão sob carga centrada após qualquer das combinações de ensaio, resultando num factor de qualidade quase sempre baixo, excepto para as mesmas condições de ensaio nas quais o Sienito Nefelínico de Monchique manifestou um factor Q intermédio (45 dias de  $\text{HCl}$  + gelo-degelo e 45 dias de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + gelo-degelo). Para a frequência de ressonância apresenta baixas variações após 45 e 90 dias com  $\text{HCl}$  + gelo-degelo, situações nas quais foi obtido o maior factor de qualidade neste ensaio relativamente a todas as rochas em estudo. Obteve-se, ainda, um factor de qualidade alto após 45 dias com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  + gelo-degelo. Para todas as outras condições de ensaio, foi obtido um factor de qualidade baixo.

Da análise geral destes resultados sobressai que as rochas que apresentaram pior comportamento em ambas as propriedades, após a combinação de ensaios, foram o Granito de Vila Real e o Sienito Nefelínico de Monchique. A primeira é uma rocha em avançado estado de alteração e com baixos valores iniciais das suas propriedades físico-mecânicas, sendo expectável que, após exposição aos ensaios de envelhecimento acelerado descritos anteriormente, fosse a rocha que apresentasse pior desempenho. Já a segunda rocha contém, na sua composição, uma elevada percentagem de nefelina, mineral com elevada susceptibilidade à alteração, cujo comportamento, após a conjugação de ensaios, resultou na diminuição das características físico-mecânicas da rocha.

Constatou-se também que, salvo raras excepções, o efeito de 90 dias com qualquer uma das soluções acidificadas conjugado com 25 ciclos de gelo-degelo provocou sempre elevadas variações percentuais dos valores da resistência à flexão sob carga centrada e da frequência de ressonância em todas as rochas, conferindo-lhes um baixo valor do factor de qualidade Q.

#### 4 - CONCLUSÕES

Os estudos de alteração e alterabilidade de rochas ornamentais silicatadas em ambientes poluídos permitiram avaliar, comparar e prever o comportamento destas rochas quando expostas a condições variadas, comparáveis às de diversos ambientes onde poderão ser aplicadas.

Os ensaios de caracterização físico-mecânica efectuados nas rochas frescas e após ensaios de envelhecimento acelerado evidenciaram o efeito combinado de ambientes ácidos agressivos e de climas frios. Sob o efeito de 25 ciclos de gelo-degelo simples, as rochas demonstraram, de um modo geral, pequena variação do valor das propriedades em ensaios de laboratório, nomeadamente da resistência à flexão e da frequência de ressonância e, consequentemente, apresentam elevado factor de qualidade *Q*. A conjugação das acções de gelo-degelo após ataque ácido provocou, quase sempre, elevadas variações dos valores da resistência à flexão sob carga centrada e da frequência de ressonância das rochas, fazendo decrescer o seu factor de qualidade.

Apesar de a frequência de ressonância ser um parâmetro mais sensível a variações estruturais das rochas do que a resistência à flexão, tal não se verificou neste estudo, uma vez que para 4 das 6 rochas estudadas obtiveram-se, na generalidade, factores de qualidade mais baixos para a resistência à flexão. Com base nas condições de ensaio adoptadas, foi possível concluir que as rochas que evidenciaram maior vulnerabilidade foram o Granito de Vila Real e o Sienito Nefelínico de Monchique.

Tal como já foi anteriormente referido, o Granito de Vila Real é uma rocha em avançado estado de alteração e com baixos valores iniciais no que se refere às suas propriedades físico-mecânicas. Estes factos reflectiram-se no seu comportamento, fazendo com que apresentasse resultados inferiores quando submetida à acção de gelo-degelo associada a soluções ácidas. O Sienito Nefelínico de Monchique contém nefelina, mineral deficiente em sílica e com elevada susceptibilidade à alteração, cujo comportamento após a conjugação de ensaios resultou na diminuição dos valores das propriedades físico-mecânicas da rocha.

A elevada susceptibilidade à alteração de minerais como as olivinas e as piroxenas, quer na natureza, quer em experiências laboratoriais deste tipo levadas a cabo em rochas gabróicas (Silva e Simão, 2003 e 2004; Simão e Silva, 1997 e 1999) está na origem do relativo mau desempenho do Gabro de Odivelas quando submetido à acção de poluentes ácidos em climas frios.

Nos granitos é possível separar claramente, pelo seu melhor comportamento geral, os granitos róseos (granitos de Monção e Monforte) relativamente ao granito branco (Granito de Castelo de Vide) e ao granito amarelo (Granito de Vila Real). As diferentes origens destas rochas, bem como os seus diferentes enquadramentos geológicos e tectónicos no país, podem sustentar alguns argumentos para explicar as diferenças de comportamento registadas em termos de alteração. Embora os resultados não permitam que essa correlação seja feita directamente, é possível concluir que os Granitos de Monção e de Monforte são, das rochas objecto deste estudo, as mais resistentes à alteração.

Apesar de terem sofrido acções de natureza hidrotermal, não se encontram fragilizadas uma vez colocadas em ambientes agressivos. Todavia, os comportamentos do Granito de Castelo de Vide e do Granito de Vila Real, ainda que ambos relativamente inferiores, são distintos. O primeiro aparenta ser uma rocha sã mas, uma vez exposta a situações de desequilíbrio, exhibe alterações ao nível da pedreira e após aplicação (Silva *et al*, 2002) que prejudicam o seu desempenho como rocha ornamental. O segundo é uma rocha que sofreu um processo genético com alterações de natureza hidrotermal e meteórica, o qual, independentemente de lhe ter atribuído reconhecidas características para uso como rocha ornamental, lhe provocou uma

diminuição da capacidade de resposta e do seu comportamento em novos ambientes propícios à alteração.

Os estudos de alteração realizados em rochas ígneas ornamentais demonstraram deste modo que, mesmo rochas aparentemente sãs, podem apresentar problemas de degradação rápida quando submetidas a ambientes quimicamente agressivos ou a climas com características peculiares. Estas modificações traduzem-se essencialmente na perda de qualidade da rocha, quer em termos estéticos quer em termos do seu desempenho em obra, considerando-se que este tipo de estudos propicia indicações para a qualificação das rochas ornamentais face aos agentes agressivos da atmosfera e que, sempre que possível, deve ser incluído na caracterização e recomendação da sua utilização em determinada aplicação.

## 5 AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento da investigação científica conducente à elaboração deste trabalho teve o apoio e/ou a colaboração das seguintes instituições: Centro de Estudos Geológicos, do Dep. de Ciências da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologia (UNL); Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do projecto de investigação CTM/10067/1998-PRAXIS XXI - “Silicate rocks as dimension stone - weathering in polluted environments. Technological implications”.; PRODEP III – Programa de Desenvolvimento Educativo para Portugal (Formação Avançada no Ensino Superior); antigo Instituto Geológico e Mineiro (Laboratório do Porto); Empresas da indústria extractiva e de transformação de rochas ornamentais: Ferbritas, JMM, Granisintra, Mármore Longarito, Granitos de Maceira e Sienave.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- <http://rop.ineti.pt/rop/> (2007). *Rochas Ornamentais Portuguesas*, INETI, Lisboa.
- Moura, A.C. (2000) – *Granitos e Rochas Similares de Portugal*. Publ. do Instituto Geológico e Mineiro. Marca-Artes Gráficas, Porto.
- Moura, A.C., Carvalho, C. (2001). *Exploração dos resultados obtidos durante a segunda fase de ensaios de envelhecimento acelerado de rochas silicatadas*. Relatório nº 35/RMIN/2004 do Laboratório do Instituto Geológico e Mineiro, Porto, Portugal.
- Perrier, R., Bouineau, A. (1997). *Thermal decohesion in marble and marmoreal limestone*. Roc Maquina, n. 26, pp. 121–132.
- Silva, Z.C., Simão, J. (2003). Estudo da Alteração de Rochas Ígneas Ornamentais para Prevenção de Utilização. Diagnóstico em Rochas Gabróicas. 3º ENCORE, Lisboa.
- Silva, Z., Simão, J. (2004). *Evaluation of alteration features on rock forming minerals – SEM observations on dimension stones*. 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Lisboa, pp. 347-351.
- Silva, Z., Simão, J., Moreira, A. (2002). *Structural damage in building stone due to internal mineral alteration. Castelo de Vide Granite (Portugal) – a case study*. 9Th Congress of Engineering Geology for Developing Countries, International Association for Engineering Geology and the Environment, Durban, África do Sul.
- Simão, J. (2003). *Rochas ígneas como pedra ornamental. Causas, condicionantes e mecanismos de alteração. Implicações tecnológicas*. Dissertação de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal.
- Simão, J., Carvalho, C. (2005). Ornamental stone decay in cold and polluted environments – degradation evaluation based on resonance frequency measurements and flexural strength tests. I International Congress on Dimension Stone, CETEM/CETEMAG, Guarapari, ES, Brasil.

- Simão, J., Silva, Z. (1997). *Anorthosite and its use as dimension stone. Alterations as response to weathering in polluted environment*. International Symposium Engineering Geology and the Environment., Atenas, vol. III, pp. 3257-3262.
- Simão, J., Silva, Z.C.G. (1999). *Alteration and alterability of the anorthosite from Angola*. Ciências da Terra, vol. 13, pp. 9-22.
- Vários (1983/4/5 e 1995). Catálogo de rochas ornamentais portuguesas, Vols. I, II, III e IV. I.G.M. (ed.).