

MARTIM PORTUGAL V. FERREIRA
Coordenação

A Geologia de Engenharia e os Recursos Geológicos

VOL. 1 • GEOLOGIA DE ENGENHARIA



Coimbra • Imprensa da Universidade

GRANITOS ORNAMENTAIS DO NORDESTE DE PORTUGAL – INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO

L. M. O. SOUSA ¹

PALAVRAS CHAVE: granito, rocha ornamental, propriedades físico-mecânicas, fissuração, meteorização.

KEY WORDS: granite, dimension stone, physico-mechanical properties, fissuration, weathering.

RESUMO

Observações efectuadas com o auxílio do microscópio electrónico de varrimento permitiram a identificação do tipo de fissuras (intergranulares, intragranulares e transgranulares). Com base nestes dados foi calculado um índice de fissuração, designado densidade linear de fissuração, definido como o número de fissuras por unidade de comprimento.

Neste tipo de rochas os vazios são essencialmente do tipo microfissures e observa-se uma boa relação entre a porosidade aberta e densidade linear de fissuração. A resistência à compressão uniaxial e a velocidade de propagação das ondas longitudinais diminuem com o aumento da fissuração. A resistência à meteorização é mais elevada nos granitos com maior porosidade e/ou maior densidade de fissuração.

Os resultados obtidos mostram a importância do conhecimento das características físico-mecânicas de modo a evitar usos inapropriados dos granitos ornamentais.

¹ Departamento de Geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Apartado 1013, 5000-911 Vila Real, Portugal, lsousa@utad.pt.

ABSTRACT: The ornamental granites of Northeast Portugal: microfissure index versus geomechanics

Observations under scanning electron microscopy allows the identification of the type of fissures (intergranular, intragranular and transgranular ones). Based on collected data, a fissuration index, called linear crack density, defined by the number of fissures per length unit, was calculated.

In this kind of rocks the voids are mainly microfissures and a good correlation between the open porosity and the linear crack density was found. The uniaxial compressive strength and the velocity of compressional waves decrease as the linear crack density increases. The weathering resistance is higher in granites with high porosity and/or high linear crack density.

The results show the importance of the knowledge of the rock physico-mechanical properties to avoid inappropriate applications of the ornamental granites.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades físico-mecânicas das rochas é fundamental para avaliar a sua aptidão ornamental, incluindo a durabilidade. Estes dados deverão permitir concluir sobre o melhor uso dos diferentes materiais: pavimento, revestimento interior ou exterior, etc.

Os vazios que as rochas apresentam, sobretudo as fissuras, afectam as suas propriedades físico-mecânicas e são responsáveis pela anisotropia verificada em muitas delas (MCWILLIAMS, 1966; ENGELDER and PLUMB, 1984; ALMEIDA *et al.*, 1998). A determinação da densidade de fissuração pode ser efectuada através de observações no microscópio óptico ou no microscópio electrónico (SCHIEDL *et al.*, 1986; MONTOTO *et al.*, 1994).

As condições ambientais, a composição mineralógica, a textura e as características dos vazios são os principais factores que controlam a intensidade dos danos físicos que as rochas apresentam (HUDEC, 1998). As rochas evidenciam uma meteorização mensurável devido às condições ambientais (HALSEY *et al.*, 1998), contudo ela é mais difícil de observar em granitos pouco porosos. O objectivo dos ensaios de alterabilidade é a reprodução acelerada em laboratório dos lentos processos naturais de meteorização (DEARMAN, 1982; MARTIN *et al.*; 1992; ASLAM, 1992; GROSSI *et al.*, 1997; RIVAS *et al.*, 1998; PARK *et al.*, 1998).

Neste trabalho foram determinadas algumas propriedades de alguns granitos utilizados para fim ornamental ou com possibilidade para tal. A quantificação da fissuração permitiu avaliar a importância da fissuração natural nas propriedades físico-mecânicas e na resistência aos agentes meteoricos (cristalização de sais e choque térmico).

2. GRANITOS ESTUDADOS

Os granitos estudados localizam-se no nordeste de Portugal e pertencem a dois tipos: sin-tectónicos e pós-tectónicos em relação à terceira fase da Orogenia Hercínica (fig. 1). Estes granitos são rochas de grão médio a grosseiro, alguns deles com textura porfiróide (SOUSA, 2000).

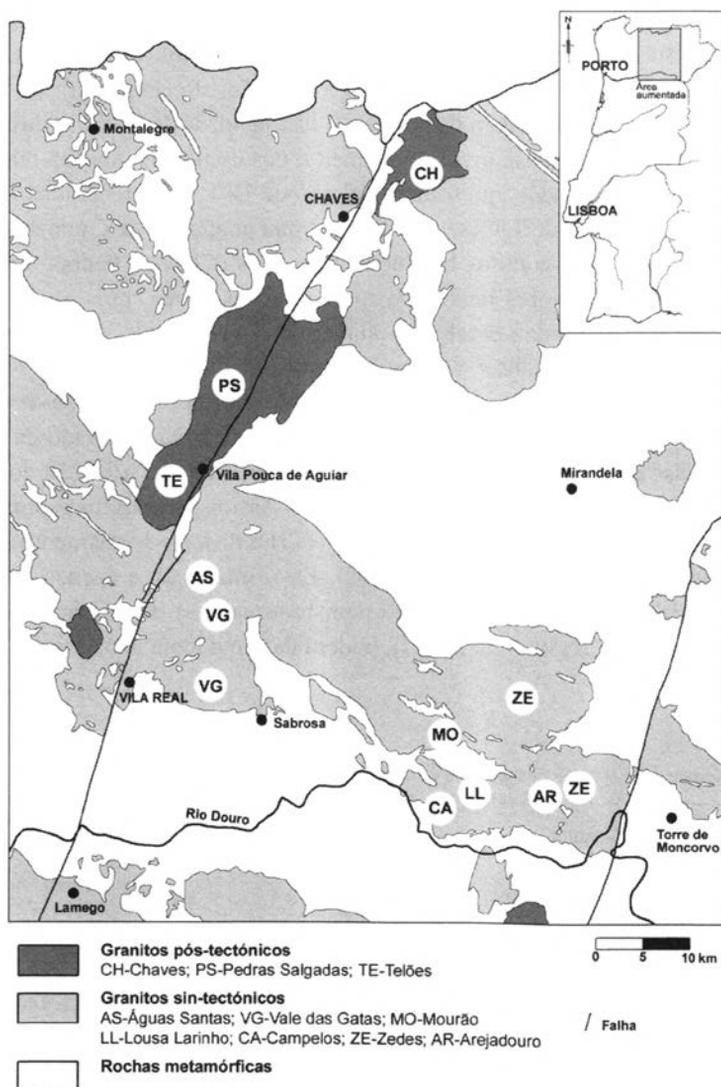


Fig. 1 – Localização dos granitos (geologia adaptada dos Serviços Geológicos de Portugal, 1992).

3. ESTUDO DA FISSURAÇÃO

A estimação da densidade linear de fissuração – DLF (número de fissuras por milímetro) foi efectuada por observação no microscópio electrónico de varrimento, por contagem do número de fissuras em algumas linhas de observação com o comprimento total de 50 mm.

As fissuras intragranulares são as mais observadas, com valores entre 62,9% e 82,3% da fissuração total. As fissuras intragranulares nos feldspatos constituem, em geral, mais de metade do total de fissuras. ÁLVAREZ-CALLEJA *et al.* (1993) também verificaram a preponderância da fissuração nos feldspatos em relação às outras fases minerais no granito de El Berrocal (Toledo, Espanha). As fissuras intergranulares, que representam menos de 1/3 da totalidade das fissuras dos granitos estudados, estão localizadas preferencialmente nos contactos quartzo-feldspato.

Os granitos estudados apresentam valores de DFL compreendidos entre 1,4 fissuras/mm, no granito de Telões, e 5,9 fissuras/mm no granito de Campelos (Tabela I). Como esperado, os granitos biotíticos mais são (Chaves, Pedras Salgadas e Telões) apresentam valores baixos do índice de fissuração, pois a presença de descontinuidades é fundamental para aumentar a velocidade de meteorização. Os valores mais elevados observam-se nos granitos de Lousa-Larinho (4,8 fissuras/mm) e Campelos (5,9 fissuras/mm); o granito de Águas Santas, apesar de ser o mais meteorizado dos estudados, não apresenta o valor mais elevado de DLF.

Com base nos dados de fissuração apresenta-se uma classificação do grau de meteorização dos granitos estudados (Tabela II). Assim, os granitos estudados são classificados como são (TE), pouco alterados (CH e PS), moderadamente alterados (VG, ZE, MO) e alterados (LL, CA e AS). Esta ordenação é apenas indicativa, pois o uso de um índice de fissuração com base na área das fissuras, tal como proposto por AL-QUdami *et al.* (1997), poderá dar uma ideia mais precisa do grau de microfissuração.

Tabela I – Índice de fissuração dos granitos estudados.

Granito	Densidade linear de fissuração (fissuras/mm)
Chaves (CH)	1,9
Pedras Salgadas (PS)	2,6
Telões (TE)	1,4
Águas Santas (AS)	4,6
Vale das Gatas (VG)	3,0
Mourão (MO)	4,3
Lousa-Larinho (LL)	4,6
Campelos (CA)	5,6
Zedes (ZE)	3,1

Tabela II – Classes de alteração dos granitos com base na densidade linear de fissuração.

Classe de alteração do granito	Grau	Densidade linear de fissuração (fissuras/mm)	Granito
São	I	< 1,5	TE
Pouco alterado	II	1,5 – 3,0	CH, PS
Moderadamente alterado	III	3,0 – 4,5	VG, ZE, MO
Alterado	IV	4,5 – 6,0	LL, CA, AS
Muito alterado	V	> 6,0	

4. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Apresentam-se aqui os valores de algumas propriedades determinadas: porosidade aberta, resistência mecânica à compressão uniaxial e velocidade de propagação das ondas longitudinais. Para a execução dos ensaios e obtenção dos dados foram seguidas as normas R.I.L.E.M. (1980) e as sugestões da I.S.R.M. (1981); para mais informações consultar SOUSA (2000).

Os granitos estudados possuem baixa porosidade, como é comum neste tipo de rochas quando são (Tabela III). O granito de Águas Santas, com o valor mais elevado de porosidade (3,7%), é o mais meteorizado; este valor elevado pode tornar inviável a sua utilização em revestimentos exteriores, pelo menos em zonas húmidas e/ou de clima continental. Os granitos são apresentam uma elevada resistência mecânica à compressão, com o granito de Pedras Salgadas (197,0 MPa) a evidenciar-se em relação aos restantes granitos são (Chaves e Telões); esta diferença pode ser atribuída à menor dimensão do grão do primeiro e à heterogeneidade dos últimos dois, tal como já foi observado por WONG *et al.* (1996) noutros granitos. No outro extremo o granito de Águas Santas destaca-se com um valor muito baixo (62,4 MPa), devido à elevada meteorização que pode restringir o seu em determinadas situações.

Tabela III – Valores médios da porosidade aberta (n_0), resistência mecânica à compressão uniaxial (RMC) e velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p).

Granito	n_0 (%)	RMC (MPa)	V_p (m/s)
Chaves	0,76	158,5	5753
Pedras Salgadas	0,94	197,0	4516
Telões	0,64	153,0	4338
Águas Santas	3,72	62,4	2339
Vale das Gatas	0,88	107,4	3787
Mourão	1,00	126,2	4258
Lousa-Larinho	1,00	140,1	3916
Campelos	1,30	87,0	3700
Zedes	1,00	99,3	3877

Os valores da velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_p) variam entre 5735 m/s (granito de Chaves) e 2339 m/s (granito de Águas Santas). Com a exceção do granito de Águas Santas, todos os restantes apresentam valores de V_p superiores a 3700 m/s de acordo com os valores obtidos por vários autores em rochas graníticas não muito alteradas (SUÁREZ DEL RÍO, 1982; DELGADO RODRIGUES, 1983; CALLEJA, 1985; EZE, 1997; BEGONHA, 1997; NEIVA *et al.*, 2000).

5. ENSAIOS DE ALTERABILIDADE

Foram realizados dois ensaios de alterabilidade: cristalização de sais e choque térmico.

O ensaio de cristalização de sais foi executado de acordo com as normas R.I.L.E.M. (1980) e as sugestões de ALONSO *et al.* (1987). Para avaliar a evolução dos provetes procedeu-se à determinação de V_p segundo os três eixos. No final do ensaio os provetes foram lavados em água corrente para remoção do sal acumulado no interior. De um modo geral observa-se um aumento de peso dos provetes nos primeiros 15-20 ciclos, devido à acumulação de sal (MARTÍNEZ HERNANDO and SUÁREZ DEL RÍO, 1989; IHALAINEN and UUSINOKA, 1994), e de seguida verifica-se uma diminuição de peso, sendo esta mais acentuada no granito mais poroso (Águas Santas) (Tabela IV).

A metodologia para a realização do ensaio de choque térmico não seguiu nenhuma norma pré-estabelecida, e foi concebido para avaliar a influência de uma variação abrupta de temperatura. Para a execução do ensaio foram definidas duas etapas: aquecimento a 105°C durante duas horas e imersão em água a 20°C durante duas horas.

Tabela IV – Variação de peso após o ensaio de cristalização e sais.

Granito	Variação de peso (%)	
	com sal	após lavagem
Chaves	-0,06	-0,16
Pedras Salgadas	-0,07	-0,25
Telões	-0,06	-0,14
Águas Santas	-3,14	-3,74
Vale das Gatas	-0,15	-0,29
Mourão	-0,19	-0,32
Lousa-Larinho	-0,16	-0,33
Campelos	-0,53	-0,71
Zedes	-0,40	-0,54

Tabela V – Diminuição de V_p no ensaio de choque térmico.

Granito	Diminuição de V_p (%)	
	ciclo 54	ciclo 125
Chaves	10,2	10,8
Pedras Salgadas	12,5	12,7
Telões	12,9	14,0
Águas Santas	5,9	8,1
Vale das Gatas	9,3	10,2
Mourão	10,2	12,1
Lousa-Larinho	9,6	11,3
Campelos	5,1	7,2
Zedes	5,9	7,4

Os danos induzidos foram avaliados pela variação da velocidade de propagação das ondas longitudinais. Todos os granitos sofrem uma diminuição de V_p ; este decréscimo é mais significativo nos primeiros ciclos. Esta diminuição estará relacionada com as alterações físicas que ocorrem na zona exterior dos provetes, como são o desenvolvimento de fissuras intergranulares e o alargamento das pré-existentes (SUZUKI *et al.*, 1995; SUZUKI *et al.*, 1998). Os danos maiores, avaliados em termos de velocidade de propagação das ondas longitudinais, verificam-se nos granitos menos alterados (CH, TE e PS) (Tabela V).

6. INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO NAS PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS

Apresentam-se de seguida os gráficos que relacionam as propriedades obtidas e os resultados dos ensaios de alteração com os dados de fissuração. Os ajustes e os valores de R^2 são apenas indicativos, porque a distribuição dos valores de porosidade não permite a generalização das equações matemáticas.

Há uma boa correlação entre a porosidade aberta e a densidade linear de fissuração, com excepção do granito de Águas Santas (fig. 2); neste tipo de rochas os vazios são constituídos essencialmente por fissuras, logo esta relação é considerada normal. Devido à sua elevada meteorização, o granito de Águas Santas não segue a linha de tendência dos outros granitos.

A resistência mecânica à compressão pode ser relacionada com a densidade linear de fissuração, apesar do ajuste pouco significativo (fig. 3). Na figura 4 apresentam-se os valores de V_p e DLF; pode ser inferido uma diminuição de V_p com o aumento da fissuração, tal como observado por RICHTER and SIMMONS (1977).

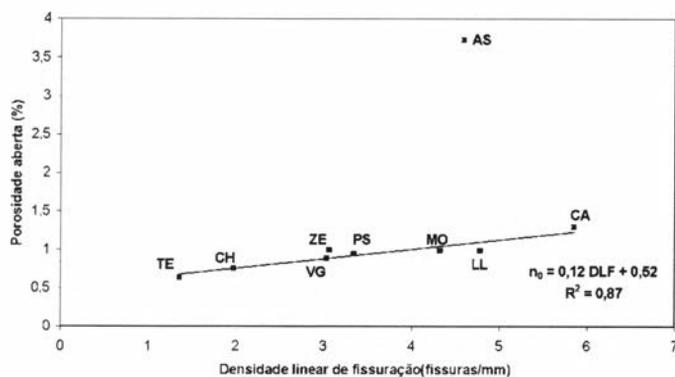


Fig. 2 – Relação entre a porosidade aberta (n_0) e a densidade linear de fissuração (DLF); ajuste sem o granito AS (significado das letras na figura 1).

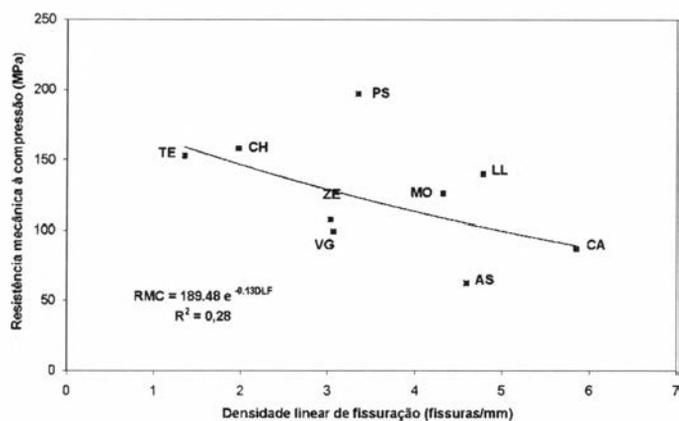


Fig. 3 – Relação entre a resistência mecânica à compressão uniaxial (RMC) e a densidade linear de fissuração (DLF) (significado das letras na figura 1).

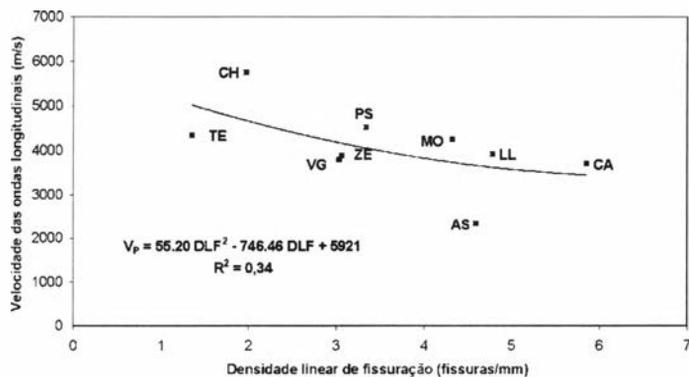


Fig. 4 – Relação entre a velocidade das ondas longitudinais (V_p) e a densidade linear de fissuração (DLF) (significado das letras na figura 1).

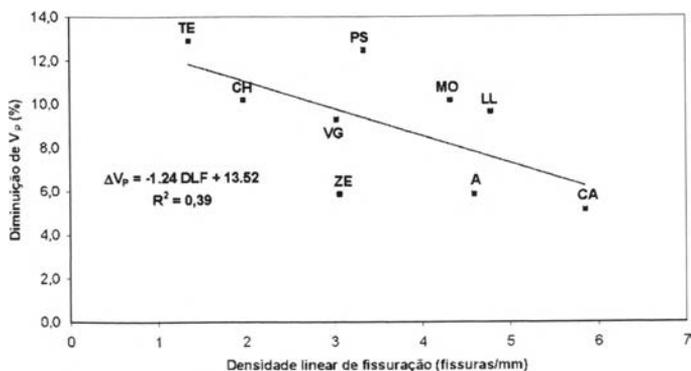


Fig. 5 – Relação entre a diminuição da velocidade das ondas longitudinais após o ensaio de choque térmico (ΔV_p) e a densidade linear de fissuração (DLF) (significado das letras na figura 1).

A diminuição de V_p no ensaio de choque térmico está relacionada com a DLF; os granitos mais porosos e fissurados apresentam as maiores variações e vice-versa (figura 5). Os granitos alterados possuem espaço livre para a expansão e contracção; nos granitos menos alterados a rápida contracção leva à formação de novas fissuras. Contudo, a qualidade dos granitos são após o ensaio de choque térmico, avaliada em termos de V_p , é maior do que a dos granitos alterados antes do ensaio.

7. CONCLUSÕES

A maioria das propriedades físico-mecânicas dos granitos usados como rocha ornamental é influenciada pelas características dos vazios. Como nos granitos são os vazios são constituídos por essencialmente por microfissuras, obtiveram-se relações significativas entre a densidade linear de fissuração e: porosidade aberta, resistência mecânica à compressão, velocidade de propagação das ondas longitudinais e resistência à meteorização. Com base nas propriedades físico-mecânicas e nos resultados dos ensaios de alteração concluiu-se que não é recomendável a utilização do granito de Águas Santas como rocha ornamental, em especial em aplicações externas devido à sua alta porosidade e baixa durabilidade, e em pavimentos devido à sua provável baixa resistência ao desgaste.

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, L.C.R., MARQUES, E.A.G., VARGAS Jr, E.A., BARROS, W.T. (1998) – Characterization and utilization of tensile strength and toughness of granitic and gneissic rocks of Rio de Janeiro City – A proposal for optimizing rock blasting processes. Proc.

- 8th Int. Cong. of IAEG (Moore, D.P and Hungr, O., eds.), Vancouver, Balkema, vol. 1, pp. 351-357.
- ALONSO, F.J., ORDAZ, J., VALDEÓN, L., ESBERT, R.M. (1987) – Revisión crítica del ensayo de cristalización de sales. *Materiales de Construcción* 206, 53-60.
- AL-QUDAMI, D. SHEHATA, W.M. AL-HARTHI, A.A., SABTAN, A.A. (1997) – On the weathering of syenite under arid conditions. *Bulletin of IAEG* 56, 3-8.
- ÁLVAREZ-CALLEJA, A., RODRÍGUEZ-REY, A., MONTOTO, M., MENÉNDEZ, B., DUBOIS, C. (1993) – Cuantificación mediante estudio esterológico del sistema microfisural del granito de El Berrocal (Sistema Central, Toledo, España). *Acta Geológica Hispánica* 28(4), 63-69.
- ASLAM, M. (1992) – Studies on conservation of marble in Agra monuments. *Proc. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone* (Delgado Rodrigues et al., eds.), Lisbon, vol. 2, pp. 1507-1515.
- BEGONHA, A.J.S. (1997) – Meteorização do granito e deterioração da pedra em monumentos e edificios da cidade do Porto. Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Portugal.
- CALLEJA, L. (1985) – Variación de propiedades físicas en rocas sometidas a gradientes térmicos. Tesis Doctoral. Dpto. de Petrología, Fac. de Geología, Universidade de Oviedo, España, 252 pp.
- DEARMAN, W.R. (1982) – Selection of sandstone for architectural purposes. *Proc. 4th Cong. IAEG*, vol 6, pp. 333-344.
- DELGADO RODRIGUES, J. (1983) – Laboratory Study of thermally-fissured rocks. *Memória* 583, LNEC.
- ENGELDER, T., PLUMB, R. (1984) – Changes in in situ ultrasonic properties of rock on strain relaxation. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* 21(2), 75-82.
- EZE, E.O. (1997) – Geotechnical assessment of some charnockites from Nigeria as construction materials. *Quart. J. of Eng. Geology* 30, 231-236.
- GROSSI, C. M., ESBERT, R. M., SUÁREZ DEL RÍO, L. M., MONTOTO, M., LAURENZI-TABASSO, M. (1997) – Acoustic emission monitoring to study sulphate crystallisation in monumental porous carbonate stones. *Studies in Conservation* 42, 115-125.
- HALSEY, D.P., MITCHELL, D.J., DEWS, S.J. (1998) – Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Quart. J. of Eng. Geology* 31, 359-367.
- HUDEC, P.P. (1998) – Rock properties and physical processes of rapid weathering and deterioration. *Proc. 8th International Congress of IAEG* (Moore, D.P and Hungr, O., eds.), Balkema, vol. 1, pp. 335-341.
- I.S.R.M. (1981) – Rock characterization testing and monitoring. I.S.R.M. suggested methods (Brown, E.T., ed.).
- IHALAINEN, P.E., UUSINOKA, R.P.J. (1994) – Comparison of weathering resistance of some building stones based on treatments simulating different external conditions. *Proc. 7th Inter. Cong. of IAEG* (OLIVEIRA, R. *et al.*, eds.), Lisboa, Balkema, vol. 5, pp. 3613-3618.
- MARTIN, L., BELLO, M.A., MARTIN, A. (1992) – Accelerated alteration tests on the stones used in the cathedral of Granada (Spain). *Proc. 7th Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone* (Delgado Rodrigues et al., eds.), Lisboa, vol. 2, pp. 845-850.
- MARTÍNEZ HERNANDO, A., SUÁREZ DEL RÍO, L.M. (1989) – Alterabilidad de algunos materiales graníticos de la Comunidad de Castilla y León utilizables como rocas ornamentales. *Simposio sobre Rocas Industriales y Ornamentales, Mieres del Camino* (Asturias), 11 pp.
- MCWILLIAMS, J.R. (1966) – The role of microstructure in the physical properties of rock. *Testing techniques for rock mechanics, ASTM STP* 402, 175-189.

- MONTOTO, A.M., RODRÍGUEZ-REY, A., MENÉNDEZ, B., MARTÍNEZ-NISTAL, A., RUIZ DE ARGANDOÑA, V.G., SUÁREZ DEL RÍO, L.M., CALLEJA, L. (1994) – Microfractography of “El Berrocal granite”. Proceedings of an international workshop “Nuclear science and technology” (Maravic, H e Smellie, eds.), pp 353-358.
- NEIVA, J.M.C., PLASENCIA, N., LIMA, C. (2000) – Características geológico-geotécnicas do maciço rochoso do circuito hidráulico do empreendimento de Venda Nova II. Actas do VII Congresso Nacional de Geotecnia, vol 1, pp 113-121.
- PARK, H.D., KIM, S.S., CHON, H.T. (1998) – Durability of ornamental stone exposed to various weathering environments in Korea. Proc. 8th International Congress of IAEG (Moore, D.P and Hungr, O., eds.), Vancouver, Balkema, vol. 4., pp. 2953-2955.
- R.I.L.E.M. (1980) – Essais recommandés pour mesurer l’altération des pierres et évaluer l’efficacité des méthodes de traitement. *Matériaux et Constructions* 75, 175-253.
- RICHTER, D., SIMMONS, G. (1977) – Microcracks in crustal igneous rocks: microscopy. *The Earth’s crust: its nature and physical properties* (Heacock, J.G., ed.), Geophys. Serv. vol. 20, pp 149-180.
- RIVAS, T., SILVA, B., PRIETO, B. (1998) – Medida de durabilidad de dos tratamientos de hidrofugación aplicados a rocas graníticas. *Materiales de Construcción* 250, 5-14.
- SCHEDL, A., KRONENBERG, A.K., TULLIS, J. (1986) – Deformation microstructures of Barre granite: an optical SEM and TEM study. *Tectonophysics* 122, 149-164.
- SERVIÇOS GEOLÓGICOS DE PORTUGAL (1992) – Carta Geológica de Portugal. Scale 1:500000.
- SOUSA, L.M.O. (2000) – Estudo da fracturação e das características físico-mecânicas de granitos da região de Trás-os-Montes com vista à sua utilização como rocha ornamental. Tese de Doutoramento, Departamento de geologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal, 358 pp.
- SUÁREZ DEL RÍO, L.M. (1982) – Estudio petrofísico de materiales graníticos geomecánicamente diferentes. Tesis Doctoral. Departamento de Petrología, Universidad de Oviedo, España.
- SUZUKI, K., Oda, M., KUWAHARA, T., HIRAMA, K. (1995) – Material property changes in granitic rock during long term immersion in hot water. *Eng. Geology* 40, 29-39.
- SUZUKI, K., Oda, M., YAMAZAKI, M., KUWAHARA, T. (1998) – Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 35(7), 907-921.
- WONG, R.H.C., CHAU, K.T., WANG, P. (1996) – Microcracking and grain size effect in Yuen Long marbles. *Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* vol 33(5), 479-485.