

GEOQUÍMICA DA ALTERAÇÃO E PROPRIEDADES DE GRANITOS COM UTILIZAÇÃO EM ENROCAMENTOS

POR

M. O. QUINTA FERREIRA (1)

RESUMO — No trabalho são abordados alguns aspectos da geologia, da mineralogia, da geoquímica da alteração e das propriedades de granitos já utilizados ou que é possível utilizar na construção de enrocamentos de barragens. Com o aumento da alteração ocorrem perdas de CaO, SiO₂, e FeO, enquanto que o Fe₂O₃ apresenta ganhos. A análise conjunta da composição química e de propriedades físicas e mecânicas mostrou relações evidentes entre o índice de Miura e o peso volúmico aparente seco e entre o índice de Miura e a resistência à carga pontual. Verifica-se ainda uma relação entre a razão molecular $\frac{2\text{Fe}_2\text{O}_3}{2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}$ e a massa volúmica aparente seca. A diminuição da resistência está associada ao aumento da porosidade e da fissuração e à diminuição da velocidade de propagação das ondas elásticas.

ABSTRACT — Geochemistry of weathering and properties of granites used in rockfill dams. The geology, mineralogy, geochemistry of weathering and properties of granites used in rockfill dams are presented. With increasing weathering CaO, SiO₂, Na₂O and FeO have losses, while Fe₂O₃ has gains. The joint analysis of the chemical composition and some physical and mechanical properties showed the existence of clear relations between the Miura index and the dry unit weight and between the Miura index and the point load strength. A relation between the molecular ratio $\frac{2\text{Fe}_2\text{O}_3}{2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}$ and the dry unit weight was also observed. The decrease in strength is related with the increase of porosity and fissures and with the decrease of elastic waves.

(1) Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, Universidade de Coimbra, 3049 Coimbra Codex, Portugal.

1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho procura-se abordar a alteração das rochas graníticas segundo diversos aspectos que vão desde as variações geoquímicas às propriedades físicas e mecânicas. Não se pretendeu uma caracterização exaustiva dos aspectos referidos, tendo-se procurado obter elementos para um melhor conhecimento dos materiais utilizados. Como é sabido, as rochas graníticas podem exibir diferentes graus de alteração a que correspondem variações na mineralogia, em aspectos da microtextura na composição química e no comportamento geotécnico.

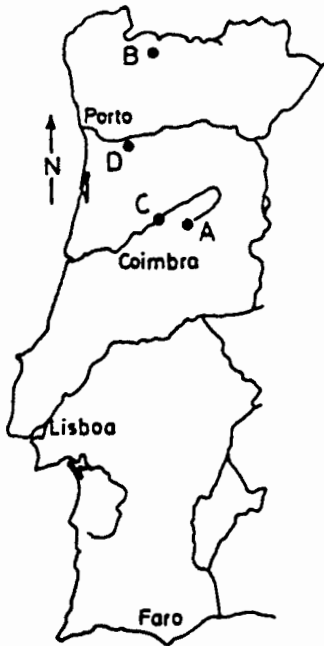


Fig. 1 — Locais estudados.
 A — Lagoacho;
 B — Paradela;
 C — Midões;
 D — Castelo de Paiva.

O estudo incidiu sobre granitos que foram utilizados em enrocamentos de barragens ou que poderão vir a ser utilizadas com essa finalidade (Fig. 1). No primeiro caso encontra-se o enrocamento da barragem de Paradela, construída nos finais da década de 50, encontrando-se em fase de arranque a construção do enrocamento da barragem do Lagoacho. Para Castelo de Paiva e Midões estudaram-se os granitos que poderão ser usados nos enrocamentos.

2. MÉTODOS ANALÍTICOS E TÉCNICAS DE ENSAIO

As análises químicas da rocha total foram efectuadas após a moagem da amostra a uma granulometria de 200 mesh. Utilizou-se o método ICP-AES (Inductively Coupled Plasma — Atomic Emission Spectrometry), que se passará abreviadamente a designar

por ICP, e que permite a determinação simultânea dos elementos maiores e menores (THOMPSON e WALSH, 1983). Em QUINTA FERREIRA (1987), encontram-se descritos os modos de preparação e ensaio utilizados. A perda por ignição (LOI) a 950°C foi previamente determinada para todas as amostras ensaiadas, devendo adicionar-se aos outros óxidos de modo a determinar-se a precisão analítica. A precisão (σ , ou 1 desvio padrão) para os elementos maiores é de 0,30 % para o SiO_2 ; de 0,08 % para o Al_2O_3 ; de 0,05 % para o Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O e K_2O ; de 0,01 % para o P_2O_5 , TiO_2 e MnO . FeO foi analisado pelo método clássico por via húmida. A precisão para os elementos traço é de 10 ppm para Cr, Cu, La, Ni, V, Zn e Zr; de 5 ppm para Ba, Sr e Co; e de 0,2 ppm para Be. Os limites de detecção para os elementos traço são aproximadamente de 0,4 ppm para o Be; de 10 ppm para Ba, Cu, Sr, Zn e Co; de 15 ppm para Cr, La e V; de 20 ppm para Ni e Zr. A composição das plagioclases foi determinada usando uma microsonda.

Na determinação das propriedades físicas e mecânicas utilizaram-se diversos procedimentos. As recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) foram utilizadas para os seguintes ensaios: — pesos volúmicos e porosidade pelo método da saturação no vácuo; resistência à compressão uniaxial; ensaio de desgaste (slake durability test) e expansibilidade (ISRM, 1981); — carga pontual (ISRM, 1985). Para a resistência ao esmagamento utilizou-se o procedimento referido por MARSAL e RESENDIZ (1975). Para a fragmentação dinâmica utilizou-se o procedimento descrito em QUINTA FERREIRA *et al.* (1987).

3. GEOLOGIA

Para os quatro locais escolhidos, Paradela, Castelo de Paiva, Midões e Lagoacho apresentamos sumariamente alguns aspectos da geologia.

3.1. Paradela

Paradela situa-se próximo da bordadura de uma mancha de granito porfiróide grosseiro biotítico, pós-tectónico, vulgarmente conhecido por granito do Gerês. Em NORONHA e RIBEIRO

(1983) pode encontrar-se um estudo detalhado da geologia da região.

A geologia do local da barragem de Paradela encontra-se descrita em NEIVA (1956). As amostras estudadas foram recolhidas quer na pedreira do Corucho da Roca, junto à povoação da Ponteira, três quilómetros a Sul de Paradela, quer no enrocamento da própria barragem. Foi daquela pedreira que foram extraídos os materiais graníticos que constituem o enrocamento da barragem de Paradela. A rocha aflorante é o granito do Gerês, já referido. Este granito apresenta por vezes uma tonalidade rosada, mesmo em amostras não alteradas. Localmente apresenta afloramentos de granito róseo a vermelho, em especial próximo das fracturas do maciço.

3.2. Castelo de Paiva

A geologia da região (MEDEIROS *et al.*, 1964) é sumariamente constituída por materiais do «complexo xisto-grauváquico», ante-Ordovícico a Sul e por granitos predominantemente porfiróides a Norte e Nordeste. O maciço granítico é, na sua maioria, porfiróide, grosseiro, essencialmente biotítico-moscovítico, possuindo manchas de granito porfiróide médio a fino biotítico-moscovítico. Encontram-se também manchas de granito médio a fino biotítico-moscovítico.

O local estudado situa-se no vale do rio Paiva, junto à Ponte da Bateira (Travanca). À superfície a mancha de rocha aflorante é pouco extensa, com excepção de uma zona imediatamente a jusante da ponte, na margem direita, em que existe um extenso afloramento rochoso. O granito é porfiróide grosseiro biotítico-moscovítico, sendo atravessado por filões de aplito-pegmatito e com menos frequência por filões de quartzo.

3.3. Midões

A geologia regional (TEIXEIRA *et al.*, 1961) é constituída quase exclusivamente por granito porfiróide muito grosseiro a médio predominantemente biotítico. Granito porfiróide médio a fino biotítico aflora raramente e em manchas de reduzida expressão

Granito médio a fino de duas micas encontra-se distribuído pelo corpo granítico em manchas de tamanho variável.

As amostras utilizadas foram recolhidas junto ao local onde se pretende implantar a barragem, situando-se cerca de 100 m para montante da ponte Eng. Rui Sanches, na estrada que liga Carregal do Sal a Tábua, passando por Currelos e Póvoa de Midões. O granito aflorante é porfiróide, grosseiro, essencialmente biotítico, sendo atravessado por filões de aplito-pegmatito com turmalina. Neste granito, encontram-se ocasionalmente xenólitos arredondados de grão fino, do tipo corneana, com cor cinzenta escura.

3.4. Lagoacho

O local que se designa por Lagoacho situa-se no Covão do Lagoacho, na Serra da Estrela, aproximadamente a meia distância entre o Vale do Rossim e a Lagoa Comprida, e imediatamente a jusante da confluência da ribeira do Covão do Urso com a ribeira do Vale do Conde.

A geologia da região é fundamentalmente constituída por um substrato granítico e materiais quaternários que ocorrem sob a forma de depósitos glaciares e aluviões. O granito mais abundante é porfiróide de grão fino, moscovítico-biotítico, e granito de grão médio ou médio a fino, moscovítico-biotítico, levemente porfiróide. Uma descrição mais detalhada da geologia pode encontrar-se em TEIXEIRA *et al.*, 1967 e 1974; e NEIVA *et al.*, 1987.

As amostras estudadas foram recolhidas numa escarpa, em que o granito é porfiróide e de grão grosseiro, cerca de 500m a Sul do local da barragem, no local em que se previa poder vir a extrair o material destinado ao enrocamento.

4. PETROGRAFIA

4.1. Petrografia dos granitos não alterados

Petrograficamente todos os granitos estudados são rochas de grão grosseiro e porfiróides. Na Tabela 1 apresentamos resumidamente as principais características petrográficas dos granitos. As análises modais correspondentes estão sintetizadas na Tabela 2.

O tamanho máximo dos megacristais é variável, indo desde os 30mm, para Paradela, até cerca dos 80mm para os restantes locais. A elevada dimensão dos cristais aconselhou a utilização de dois processos de contagem para o cálculo da análise modal.

Tabela 1 — Características petrográficas dos granitos não alterados.

	Lagoacho	Paradela	Midões	Castelo de Paiva
GRÃO	Grossoiro	Grossoiro	Grossoiro	Grossoiro
TEXTURA	Porfiróide hipidiomórfica granular	Porfiróide hipidiomórfica granular	Porfiróide hipidiomórfica granular	Porfiróide hipidiomórfica granular
TIPO	Biotítico-moscovítico	Biotítico	Biotítico-moscovítico	Biotítico-moscovítico
MEGACRISTAIS	Microclina (16 %) Plagioclase (14 %) (An ₂₆₋₂₄)	Microclina (12 %)	Microclina (19 %)	Microclina (16 %)
COMPOSIÇÃO DA PLAGIOCLASE DA MATRIZ	An ₂₁₋₁₆	An ₂₂₋₁₂	An ₂₅₋₁₃	An ₂₇₋₂₁
TIPO DE MOSCOVITE	Primária e secundária	Secundária	Primária e secundária	Primária e secundária

Paralelamente à contagem sobre a matriz granular, efectuada ao microscópico, procedeu-se à determinação macroscópica da percentagem de megacristais. As análises modais apresentadas são o resultado destes dois procedimentos, à excepção de Paradela em que se optou apenas pela contagem de pontos em lâminas delgadas devido à menor dimensão dos megacristais.

Seguidamente faz-se a descrição dos minerais, conjuntamente para os 4 locais.

Os grãos de quartzo são xenomórficos, apresentam geralmente extinção rolante, possuindo inclusões de biotite e de moscovite. No granito de Midões, o quartzo inclui também alguns cristais de

plagioclase. O quartzo ocorre ainda nas plagioclases, sob a forma de mirmequite, nos granitos de Paradela e de Midões.

Tabela 2 — Análises modais dos granitos não alterados.

	Lagoacho	Paradela	Midões	Castelo de Paiva
Quartzo	40.1	32.9	38.4	32.2
K Feldspato	24.3	28.7	24.0	28.9
Plagioclase	23.5	33.2	24.1	23.4
Biotite	6.2	3.8	10.8	10.7
Clorite	0.9	0.5	0.8	0.9
Moscovite	4.3	0.0	1.1	3.0
Apatite	0.3	0.1	0.3	0.2
Outros	0.4	0.8	0.5	0.7
Área de contagem (cm ²)				
Lâmina	46.2	130	44.3	47.3
Superfície de rocha	346	—	1160	1120

O feldspato potássico é a microclina pertítica, ocasionalmente com aspectos micropertíticos no granito de Castelo de Paiva, mostrando bandas de exsolução de albite. A microclina da matriz é hipidiomórfica a xenomórfica. Os megacristais são hipidiomórficos, possuindo como inclusões cristais de plagioclase, biotite e moscovite.

A plagioclase da matriz em todos os granitos estudados é a oligoclase (Tabela 1). Mesmo nas amostras pouco alteradas, a plagioclase encontra-se por vezes muito sericitizada, particular-

mente no centro dos cristais. Os megacristais de plagioclase que se encontram no Lagoacho são hipidiomórficos e possuem inclusões de biotite e de ilmenite. Estão menos alterados que a matriz, apresentando-se também mais alterados no núcleo.

A biotite é hipidiomórfica, de cor castanha, possuindo inclusões de zircão, de apatite e de ilmenite. No diagrama $Mg-(Fe^{2+} + Mn)-(Al + Fe^{3+} + Ti)$ de FOSTER (1960), projecta-se na zona de transição entre as biotites ferríferas e as siderofilites. Mesmo nas amostras não alteradas a biotite apresenta-se por vezes parcialmente cloritizada. A moscovite tabular ocorre frequentemente associada à biotite, tendo-se confirmado, com base no diagrama $Mg-Ti-Na$ de MILLER *et al.* (1981), ser moscovite primária. A moscovite encontrada nos granitos de Paradela apresenta por vezes arranjo radial característico das moscovites secundárias, o que se confirmou com o diagrama $Mg-Ti-Na$. A clorite aparece quer junto às biotites cloritizadas quer isoladamente, resultando da alteração da biotite.

Encontra-se ainda a apatite, a ilmenite e o zircão com ocorrências normais em todos os locais. O epidoto foi apenas encontrado em Paradela.

4.2. Petrografia da alteração

Na descrição do grau de alteração das rochas graníticas tem sido usado, por diversos autores, uma classificação com cinco graus de alteração da rocha e por vezes um sexto grau para o solo residual (NEIVA *et al.*, 1965; IRFAN e DEARMAN, 1978; DEARMAN e IRFAN, 1978; IAEG, 1981; ISRM, 1981; SARAIVA, 1982; IRFAN e POWELL, 1985, LEE e FREITAS, 1989). Na tabela 3 referem-se sinteticamente os aspectos macroscópicos e microscópicos relevantes para cada grau de alteração.

Ao microscópico observa-se que as amostras mais alteradas se apresentam mais microfissuradas, crescendo também a quantidade de óxidos de ferro que as preenchem. A distribuição das microfissuras tem padrões distintos no quartzo e nos feldspatos. No quartzo, tendem a localizar-se ao longo de zonas de fractura. Nos feldspatos, as microfissuras tendem a ser mais fechadas e em maior número que no quartzo, apresentando orientação mais dispersa que tende a ser controlada pela orientação das clivagens.

Tabela 3 — Graus de alteração dos granitos. Para o Lagoacho apenas se estudaram amostras dos graus I e II.

Grau de alteração	Designação do material	Mudanças sofridas	
		Macroscopia	Microscopia
I	Não alterado (são)	Os minerais encontram-se sem alteração visível e a rocha não possui fracturas.	As plagioclases estão por vezes levemente sericitizadas no centro. Encontram-se raras biotites cloritizadas.
II	Pouco alterado	Os feldspatos perdem o brilho. As biotites apresentam leve auréola de oxidação acastanhada.	As plagioclases estão ligeiramente alteradas. As biotites encontram-se parcialmente cloritizadas. Notam-se óxidos castanhos nas microfissuras e clivagens dos minerais.
III	Medianamente alterado	A alteração é evidente em toda a rocha. As plagioclases alteradas apresentam cor creme. Em torno das biotites e nas fracturas observam-se manchas de óxidos de ferro, por vezes atingindo quase toda a rocha.	As plagioclases estão francamente alteradas. As biotites estão parcialmente descoloridas e/ou cloritizadas e com óxidos ao longo das clivagens. A rocha encontra-se bastante microfissurada. A microclina apresenta leve alteração.
IV	Muito alterado	Toda a rocha se encontra alterada e manchada pelos óxidos de ferro. As plagioclases estão pulverulentas. A rocha é parcialmente desagregável.	Observação apenas possível em amostras impregnadas. As amostras estão intensamente microfissuradas e coloridas com óxidos de ferro. As biotites tendem a estar totalmente cloritizadas ou descoloridas. As plagioclases estão muito sericitizadas e caulinizadas. A microclina apresenta-se muito caulinizada, mas existem cristais pouco alterados.
V	Extremamente alterado	A rocha é facilmente desagregável, conservando a sua estrutura original. Os cristais estão fragmentados e muito alterados.	Não se observou.

O estudo incidiu sobre amostras com estados de alteração indo desde a rocha sã (I) até ao granito muito alterado (IV). Não efectuámos o estudo dos granitos extremamente alterados (V), pois estes materiais, após as operações de extracção, transporte e colocação num enrocamento, adquirem um comportamento de solo. Para o Lagoacho apenas foram estudados o granito não alterado e o granito pouco alterado. Esta limitação deve-se ao facto do estudo se ter realizado sobre os materiais que presumivelmente virão a ser usados no enrocamento, excluindo-se os materiais de menor resistência que são os mais alterados.

5. GEOQUÍMICA

O estudo geoquímico foi efectuado para cada local sobre algumas amostras seleccionadas, de modo a cobrirem a gama de materiais com interesse.

Na Tabela 4 apresentamos os resultados obtidos nas análises químicas dos elementos maiores e elementos traço. Para cada local ordenaram-se as amostras, da esquerda para a direita, por ordem crescente do seu grau de alteração, à excepção dos granitos róseos de Paradela (amostras P13, P6 e P5) que foram colocados separadamente.

5.1. Perdas e ganhos

Para o cálculo das perdas e ganhos dos elementos maiores utilizou-se o método de GRESENS ⁽¹⁾ (1967), que permite comparar as análises químicas de amostras com diferentes graus de alteração. Os cálculos são feitos entre amostras alteradas e não alteradas. Na Fig. 2 apresenta-se um exemplo de um diagrama de composição-volume em que os ganhos e perdas dos componentes são projectados em função das mudanças de volume que acompanham a alteração. O ponto de intersecção do Al_2O_3 com o eixo isoquímico é considerado como sendo o valor do factor de volume (fv)

$$^{(1)} \left[fv \left(\frac{\gamma_d^{alt}}{\gamma_d^{sã}} \right) C_n^{alt} - C_n^{sã} \right] = X_n \text{ em que: } fv \text{ — factor de volume;}$$

C_n — concentração do óxido; γ_d — peso volúmico aparente seco;
 X_n — perda ou ganho; alt — amostra alterada; sã — amostra sã.

a utilizar no cálculo das perdas e ganhos. As perdas e ganhos foram calculadas para os diferentes locais utilizando o fv obtido para cada amostra. Para os elementos menores determinaram-se as perdas e ganhos por diferença entre as concentrações nas amostras alteradas e não alteradas. Na Tabela 5 apresentam-se os resultados obtidos.

Para os elementos maiores verifica-se que CaO , SiO_2 , Na_2O e FeO apresentam perdas que de um modo geral crescem com o avanço da alteração. Fe_2O_3 apresenta sistematicamente ganhos em todos os locais. A perda do CaO e do Na_2O deve-se à remoção dos íões cálcio e sódio por alteração das plagioclases. A perda de FeO deve-se à oxidação do ferro para Fe_2O_3 , o que é coerente com o ganho sistemático de Fe_2O_3 . A formação do óxido férrico, que é insolúvel, impossibilita a sua remoção da rocha, aumentando a concentração de Fe_2O_3 . A perda de SiO_2 surge na sequência da decomposição parcial das estruturas de $Al-Si-O$ dos silicatos (KRAUSKOPF, 1972), quando da solubilização dos catiões, que, sendo parcialmente reconstruídas nas estruturas dos minerais argilosos, somente libertam parte da sílica. As perdas do K_2O são devidas à meteorização do feldspato potássico, à exceção de Midões. Neste local, os feldspatos potássicos, mesmo nas amostras mais alteradas, apresentam-se pouco alterados, o que poderá em parte explicar a inexistência de perdas para o K_2O . Para o MgO observam-se na generalidade perdas (Paradela, Midões e Lagoacho), ou ganhos pouco significativos (Castelo de Paiva). As perdas podem ser explicadas pela meteorização da biotite, pois é neste mineral que existem as mais elevadas concentrações de MgO . Para o TiO_2 , MnO e P_2O_5 as perdas e ganhos são bastante pequenas, considerando-se sem significado.

Quanto às perdas e ganhos dos elementos menores analisados, não é possível tirar uma conclusão geral para os 4 locais estudados.

Nos granitos róseos de Paradela há ganho de Na_2O e perda generalizada nos restantes elementos. No que se refere aos elementos traço, os granitos róseos apresentam perdas de Zn e de La e ganhos de Sr . Quanto ao Sr , as nossas observações concordam com MARTINS e SAAVEDRA (1976) quando referem que nos granitos róseos se encontram teores de Sr mais elevados nas amostras mais ricas em albite que são as amostras mais alteradas, o que é contrário ao que sucede na generalidade dos granitos não róseos. O granito róseo está na dependência de zonas de fractura.

Tabela 4 — Percentagem de óxidos e concentração dos elementos menores (ppm) das amostras analisadas.

	Lagoaço		Midiões								
	L1 I	L2 II	M23 I	M11 I	M25 II	M22 II	M15 II	M12 II	M8* III	M9 III	M18 IV
A)											
B)											
SiO ₂	73.21	73.92	72.04	71.11	70.09	72.03	70.69	70.33	70.34	69.24	69.21
TiO ₂	0.30	0.30	0.53	0.44	0.53	0.44	0.47	0.52	0.57	0.51	0.55
Al ₂ O ₃	14.61	14.09	13.89	14.38	14.52	13.73	14.20	14.24	13.93	14.60	15.93
Fe ₂ O ₃	0.11	0.31	0.40	0.17	0.71	0.60	0.46	0.45	65.0	0.45	1.64
FeO	1.75	1.62	2.80	2.47	2.56	2.05	2.53	2.70	2.86	2.75	1.68
MnO	0.03	0.02	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03
MgO	0.45	0.42	0.73	0.59	0.70	0.59	0.59	0.68	0.72	0.67	0.59
CaO	0.91	0.82	1.63	1.54	1.48	1.36	1.20	1.31	1.27	1.07	0.34
Na ₂ O	3.44	3.19	3.16	3.31	3.18	3.08	3.08	3.07	2.79	2.80	1.29
K ₂ O	5.18	4.86	4.43	5.03	5.06	4.88	5.12	4.96	5.02	5.04	5.30
P ₂ O ₅	0.31	0.31	0.28	0.24	0.27	0.25	0.24	0.27	0.27	0.27	0.11
LOI	0.44	0.84	0.61	0.55	0.67	0.65	0.81	0.80	0.89	1.90	3.38
Total	100.74	100.70	100.54	99.87	99.82	99.70	99.43	99.37	99.36	99.34	100.05
H ₂ O ⁺	0.39	0.61	0.74	0.45		0.51	0.90	0.89	0.76	1.58	3.05
H ₂ O ⁻	0.05	0.13	0.04	0.08		0.07	0.07	0.15	0.16	0.34	0.55
γd	25.79	25.69	26.04	25.89	25.80	25.58	25.55	25.62	24.61	24.83	24.24
Be	10	7	6	5	12	5	5	5	4	5	4
Cr	◇	◇	12	◇	15	◇	◇	◇	◇	◇	◇
V	11 ◇	14	24	17	25	15	16	20	23	17	24
Zn	80	76	74	58	69	60	64	65	75	71	62
Zr	114	108	212	172	217	188	184	221	218	213	232
Co	◇	◇	84	80	87	92	78	93	75	82	86
Cu	21	23	28	18	21	19	17	14	26	23	14
Sr	72	66	100	108	106	101	96	97	92	98	86
Ba	244	223	324	408	406	371	381	352	381	376	434
La	29	30	43	27	33	29	32	33	42	31	59

Tabela 4 — (Continuação)

A) B)	Castelo de Paiva						Paradela						
	C1 I	C3 I	C2 II	C7 III	C5* IV	C4* IV	P1 I	P8 II	P4 III	P2 IV	P13‡ II	P6‡ III	P5‡ III
SiO ₂	69.33	69.39	69.19	68.35	69.72	62.99	76.02	75.89	75.30	74.14	74.10	68.18	70.54
TiO ₂	0.59	0.59	0.65	0.66	0.55	0.82	0.19	0.18	0.18	0.20	0.17	0.23	0.21
Al ₂ O ₃	14.54	15.19	15.15	15.26	15.30	17.49	12.77	13.06	12.86	13.78	13.93	17.41	16.31
Fe ₂ O ₃	0.46	0.51	1.11	0.74	0.96	3.21	0.28	0.20	0.67	1.10	0.14	1.24	0.99
FeO	2.54	2.53	2.33	2.89	2.12	1.86	1.46	1.45	1.07	0.81	1.43	0.24	0.10
MnO	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01
MgO	0.72	0.75	0.80	0.88	0.69	1.05	0.27	0.25	0.25	0.27	0.45	0.18	0.08
CaO	1.66	1.73	1.20	1.33	0.96	0.50	1.10	1.09	0.83	0.43	0.31	0.33	0.19
Na ₂ O	2.98	3.00	2.65	2.65	3.11	3.65	3.57	3.73	3.37	2.66	5.20	6.25	5.43
K ₂ O	5.06	5.52	5.09	5.35	4.83	5.05	4.63	4.49	4.53	4.91	3.48	5.08	5.28
P ₂ O ₅	0.30	0.30	0.32	0.36	0.31	0.40	0.07	0.06	0.05	0.06	0.06	0.07	0.03
LOI	1.40	0.80	1.52	1.40	1.76	2.86	0.43	0.43	0.76	2.00	0.91	1.06	0.97
Total	99.62	100.35	100.05	99.92	100.36	99.94	100.83	100.87	99.91	100.39	100.21	100.28	100.14

Tabela 4 — (Continuação)

	Castelo de Paiva						Paradela						
	C1 I	C3 I	C2 II	C7 III	C5* IV	C4* IV	P1 I	P8 II	P4 III	P2 IV	P13‡ II	P6‡ III	P5‡ III
H ₂ O+	0.30	0.03	1.08	0.83	1.50	2.53	0.19	0.29	0.18	1.15	0.56	0.50	0.35
H ₂ O—	0.08	0.13	0.24	0.30	0.32	0.35	0.04	0.07	0.17	0.47	0.25	0.34	0.35
γ _d	26.27	26.06	25.02	25.09	23.04	24.53	25.65	25.46	24.96	22.91	25.34	24.31	24.88
Be	5	5	7	4	4	5	7	6	5	5	5	13	7
Cr	9	14	14	15	13	14	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
V	15	22	26	26	28	48	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Zn	70	74	85	93	79	96	65	48	54	58	34	29	33
Zr	226	220	244	242	194	288	174	138	142	184	132	181	188
Co	86	82	75	67	72	40	10	10	◇	◇	9	◇	◇
Cu	37	41	27	22	18	27	17	16	9	11	17	27	17
Sr	151	171	153	150	151	143	42	41	37	32	57	116	82
Ba	585	789	597	565	580	567	142	130	127	141	127	240	254
La	37	46	52	48	49	56	33	20	◇	14	17	31	27

A) — Amostra;

B) — Grau de alteração (Ver tabela 3);

LOI — Perda por ignição a 950° C (Loss On Ignition);

γ_d — Peso volúmico aparente seco em kN/m³.

‡ — Granito róseo;

* — Granito recolhido junto a zona de falha;

◇ — Abaixo dos limites de detecção;

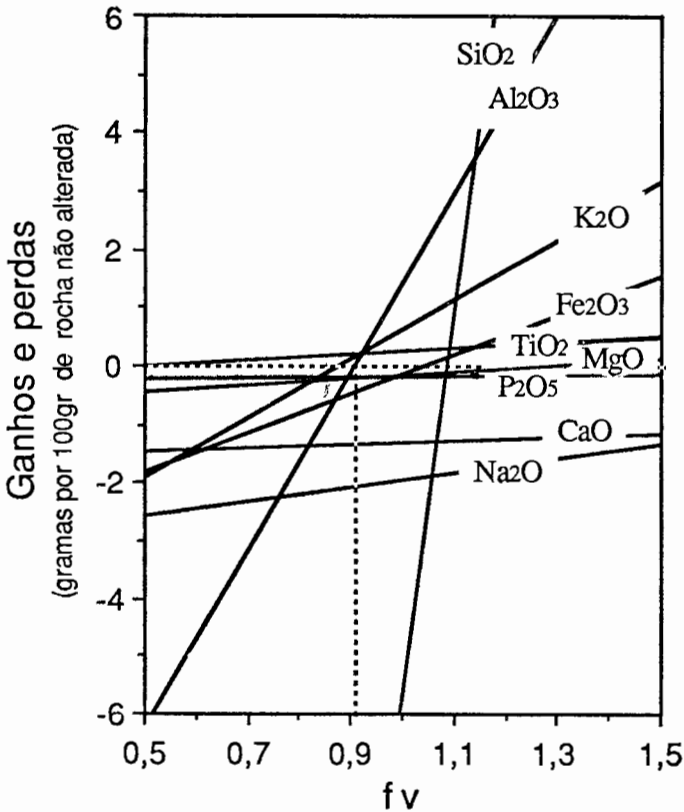


Fig. 2 — Diagrama composição-volume do granito alterado (M18) e não alterado (M23). As linhas a tracejado destinam-se à determinação de fv. Fe₂O₃ calculado como ferro total.

5.2. Proporções moleculares

Na Fig. 3-A apresentamos a projecção, num diagrama triangular, das proporções moleculares K₂O-CaO-Na₂O. Verifica-se, para todos os locais, que as amostras mais alteradas tendem a deslocar-se no sentido das menores concentrações de CaO, o que está de acordo com as observações anteriores. A relação K₂O-Na₂O mantém-se sensivelmente constante para o Lagoacho e Castelo de Paiva, aumentando no sentido do K₂O para Midões e Paradela.

Tabela 5 — Perdas e ganhos dos granitos analisados utilizando o método de GRESENS (1967).

	Lagoacho		Midões								
	L1: I	→ L2 II	M23: I	→ M11 I	→ M25 II	→ M22 II	→ M15 II	→ M12 II	→ M8* III	→ M9 III	→ M8 IV
SiO ₂		+ 3.69		- 3.05	- 4.86	+ 0.77	- 3.17	- 3.30	- 1.88	- 6.37	- 11.45
TiO ₂		+ 0.01		- 0.10	- 0.02	- 0.09	- 0.07	- 0.02	+ 0.04	- 0.05	- 0.05
Fe ₂ O ₃		+ 0.22		- 0.23	+ 0.29	+ 0.21	+ 0.05	+ 0.04	+ 0.25	+ 0.03	+ 1.04
FeO		- 0.06		- 0.40	- 0.35	- 0.73	- 0.34	- 0.16	+ 0.05	- 0.19	- 1.33
MnO		- 0.01		0.00	+ 0.01	0.00	0.00	0.00	+ 0.01	0.00	- 0.01
MgO		- 0.01		- 0.16	- 0.06	- 0.13	- 0.16	- 0.07	- 0.01	- 0.09	0.21
CaO		- 0.06		- 0.14	- 0.21	- 0.26	- 0.46	- 0.35	- 0.36	- 0.62	- 1.33
Na ₂ O		- 0.12		+ 0.05	- 0.11	- 0.05	- 0.16	- 0.16	- 0.38	- 0.50	- 2.03
K ₂ O		- 0.12		+ 0.45	+ 0.42	+ 0.50	+ 0.56	+ 0.42	+ 0.58	+ 0.35	+ 0.21
P ₂ O ₅		+ 0.01		- 0.05	- 0.02	- 0.03	- 0.05	- 0.02	- 0.01	- 0.02	- 0.18
fv		1.04		0.97	0.96	1.02	0.98	0.98	1.04	0.97	0.91
Be		- 3		- 1	+ 6	- 1	- 1	- 1	- 2	- 1	- 2
Cr		◇		◇	+ 3	◇	◇	◇	◇	◇	◇
V		+ 3 ◇		- 7	+ 1	- 9	- 8	- 4	- 1	- 7	0
Zn		- 3		- 16	- 5	- 14	- 10	- 9	+ 1	- 3	- 12
Zr		- 6		- 40	+ 5	- 24	- 28	+ 9	+ 6	+ 1	+ 20
Co		◇		- 4	+ 3	+ 8	- 6	+ 9	- 9	- 2	+ 2
Cu		+ 3		- 10	- 7	- 8	- 11	- 14	- 2	- 5	- 14
Sr		- 6		+ 8	+ 6	+ 1	- 4	- 3	- 8	- 2	- 14
Ba		- 21		+ 84	+ 82	+ 47	+ 57	+ 28	+ 57	+ 52	+ 110
La		+ 1		- 16	- 10	- 14	- 11	- 10	- 1	- 12	+ 16

Tabela 5 — (Continuação)

	Castelo de Paiva					
	C1: I	→C2 I	→C2 II	→C7 III	→C5* IV	→C4* IV
A) B)						
SiO ₂		- 2.82	- 3.04	- 4.33	- 2.99	-17.27
TiO ₂		- 0.02	+ 0.03	+ 0.04	- 0.07	+ 0.09
Fe ₂ O ₃		+ 0.03	+ 0.62	+ 0.25	+ 0.47	+ 2.25
FeO		- 0.12	- 0.31	+ 0.22	- 0.53	- 1.01
MnO		0.00	0.00	+ 0.01	+ 0.01	+ 0.01
MgO		0.00	+ 0.05	+ 0.12	- 0.06	+ 0.16
CaO		0.00	- 0.52	+ 0.40	- 0.76	- 1.27
Na ₂ O		- 0.10	- 0.45	- 0.47	- 0.02	+ 0.06
K ₂ O		+ 0.24	- 0.18	+ 0.03	- 0.47	- 0.88
P ₂ O ₅		- 0.01	+ 0.01	+ 0.04	0.00	+ 0.03
fv		0.98	1.01	1.00	1.09	0.88
Be		0	+ 2	- 1	- 1	0
Cr		+ 5 ⚡	+ 6 ⚡	+ 6 ⚡	+ 4 ⚡	+ 5 ⚡
V		+ 7	+11	+11	+13	+33
Zn		+ 4	+15	+23	+ 9	+26
Zr		- 6	+18	+16	-32	+62
Co		- 4	-11	-19	-14	-46
Cu		+ 4	-10	-15	-19	-10
Sr		+ 20	+ 2	- 2	0	- 8
Ba		+205	+12	-20	- 5	-17
La		+ 8	+15	+11	+12	+19

A) Amostra; B) Grau de alteração; fv — Factor de volume; ‡ — Granito róseo; * — Granito recolhido junto a zona da falha; ⚡ — Abaixo dos limites de detecção.

Tabela 5 — (Continuação)

A) B)	Paradela						
	P1: I	→P8 II	→P4 III	→P2 IV	→P13‡ II	→P6‡ III	→P5‡ III
SiO ₂		- 1.47	- 1.08	- 7.07	- 7.90	-26.88	-21.21
TiO ₂		- 0.01	- 0.01	0.00	- 0.03	- 0.02	- 0.03
Fe ₂ O ₃		- 0.08	+ 0.39	+ 0.74	- 0.15	+ 0.61	+ 0.49
FeO		- 0.04	- 0.39	- 0.70	- 0.15	- 1.28	- 1.38
MnO		0.00	0.00	- 0.01	- 0.01	- 0.03	- 0.03
MgO		- 0.02	- 0.02	- 0.02	+ 0.14	- 0.14	- 0.21
CaO		- 0.03	- 0.27	- 0.70	- 0.81	- 0.86	- 0.95
Na ₂ O		+ 0.09	- 0.22	- 1.09	+ 1.20	+ 0.92	+ 0.64
K ₂ O		- 0.22	- 0.12	- 0.07	- 1.43	- 0.97	- 0.53
P ₂ O ₅		- 0.01	- 0.02	- 0.01	- 0.01	- 0.02	- 0.05
fv		0.99	1.01	1.02	0.92	0.75	0.79
Be		- 1	- 2	- 2	- 2	+ 6	0
Cr		◇	◇	◇	◇	◇	◇
V		◇	◇	◇	◇	◇	◇
Zn		-17	-11	- 7	-31	-36	-32
Zr		-36	-32	+10	-42	+ 7	+14
Co		0	◇	◇	- 1	◇	◇
Cu		- 1	- 8	- 6	0	+10	0
Sr		- 1	- 5	-10	+15	+74	+40
Ba		-12	-15	- 1	-15	+98	+112
La		-13	◇	-19	-16	- 2	- 6

A) Amostra; B) Grau de alteração; fv — Factor de volume; ‡ — Granito róseo; * — Granito recolhido junto a zona de falha; ◇ — Abaixo dos limites de detecção.

Os granitos róseos de Paradela formam um grupo à parte, evidenciando uma composição proporcionalmente muito pobre em CaO e mais rica em Na₂O que os restantes granitos. A formação destes granitos junto a zonas de circulação hidrotermal no maciço estará na origem da remoção do CaO e do K₂O, mais facilmente mobilizáveis, permitindo o aumento do Na₂O. A interpretação do diagrama triangular é concordante com os resultados das perdas e ganhos apresentados na tabela 5.

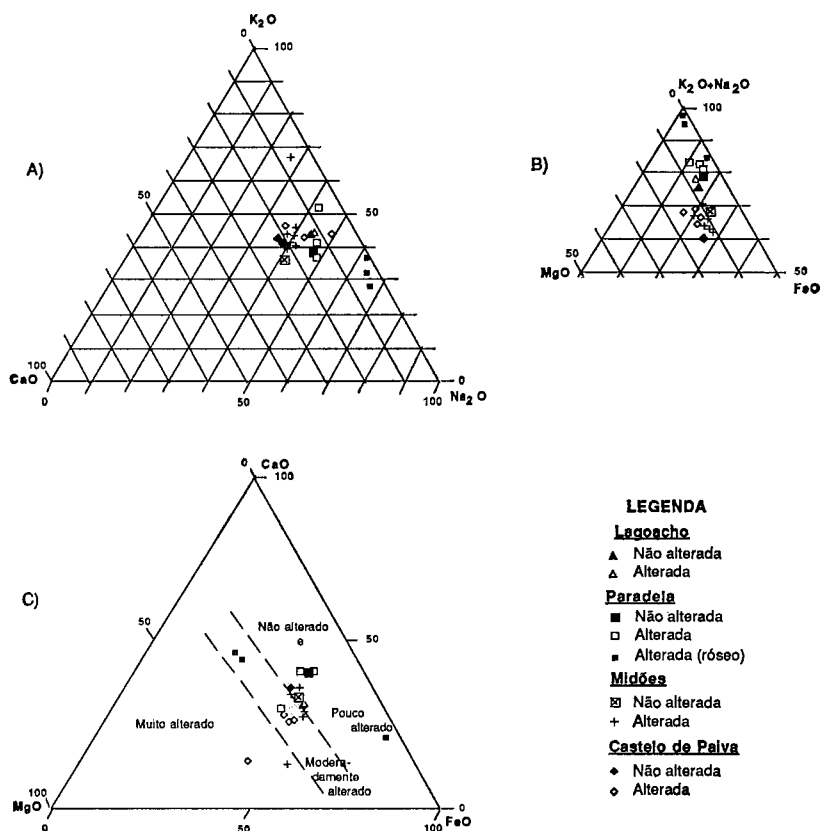


Fig. 3 — Diagramas triangulares. A) K₂O-CaO-Na₂O molecular; B) (Na₂O + K₂O)-MgO-FeO molecular; C) CaO-MgO-FeO molecular.

Considerando agora a projecção triangular das proporções moleculares (K₂O + Na₂O)-MgO-FeO (Fig. 3-B), verifica-se que

todas as amostras apresentam relações MgO-FeO aproximadamente iguais. Em Paradela, Lagoacho e Castelo de Paiva, com o aumento da alteração as proporções moleculares de $K_2O + Na_2O$ aumentam enquanto que para Midões diminuem.

Na Fig. 3-C apresenta-se a projecção das proporções moleculares no diagrama triangular CaO-MgO-FeO com os campos de alteração sugeridos por KANIMENI e DUGAL (1982), verificando-se que as amostras menos alteradas se projectam na direcção do canto do CaO. Os resultados aqui obtidos estão de acordo com o observado pelos autores referidos

6. ANÁLISE DAS MUDANÇAS QUÍMICAS, FÍSICAS E MECÂNICAS DURANTE A ALTERAÇÃO

No processo de alteração das rochas graníticas ocorrem mudanças químicas, físicas e mecânicas que vamos procurar analisar conjuntamente. O estudo geoquímico já foi apresentado anteriormente, pelo que apenas lhe faremos referência quando oportuno.

Quanto às propriedades físicas e mecânicas dos granitos, utilizaram-se resultados obtidos quer neste trabalho quer em trabalhos anteriores (QUINTA FERREIRA *et al.*, 1987; VEIGA PINTO *et al.*, 1988; QUINTA FERREIRA e VEIGA PINTO, 1988). As propriedades físicas e mecânicas foram determinadas sobre um maior número de amostras que as utilizadas para a caracterização geoquímica que, como já foi referido, se efectuou apenas sobre algumas amostras seleccionadas.

6.1. Relações que parecem existir entre a quantificação geoquímica da alteração e as propriedades dos granitos

A análise das perdas e ganhos anteriormente apresentadas na Tabela 5 mostra que no processo de alteração há principalmente perdas de CaO, SiO_2 , Na_2O e FeO que de um modo geral crescem com o avanço da alteração. Fe_2O_3 apresenta sistematicamente ganhos, pois a meteorização do FeO origina Fe_2O_3 que, sendo insolúvel, se acumula na rocha.

A relação molecular ($2Fe_2O_3 / (2Fe_2O_3 + FeO)$), apresentada por ONODERA *et al.* (1974), permite avaliar o grau de oxidação

do Fe. AIRES-BARROS e MIRANDA (1979) e MIRANDA (1984) utilizaram esta relação em conjunto com a densidade aparente, tendo verificado que inicialmente se processa uma pequena diminuição da densidade acompanhada de uma grande variação na relação molecular. No trabalho de MIRANDA (1984) observou-se ainda que nos estádios finais da alteração há uma diminuição drástica da densidade com uma pequena variação da relação molecular.

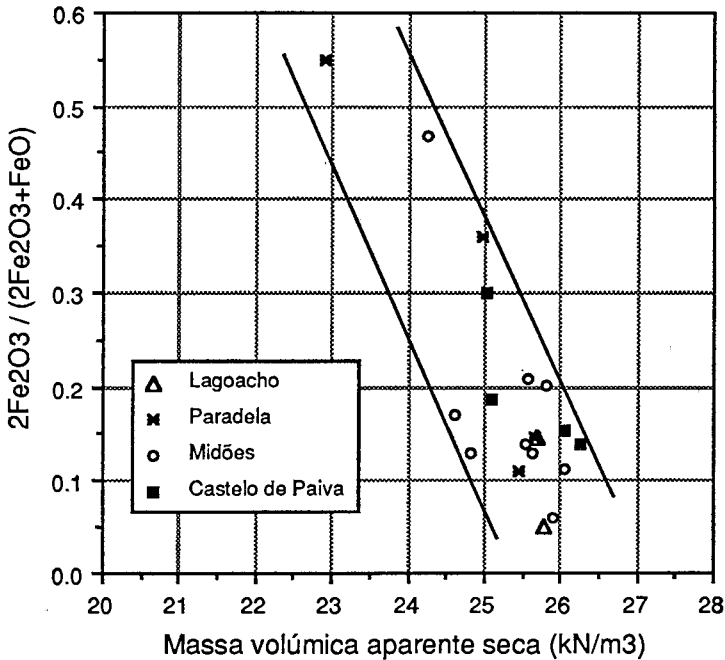


Fig. 4 — Diagrama de variação da relação molecular $\frac{2\text{Fe}_2\text{O}_3}{2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}$ em função do peso volúmico aparente seco.

Os resultados apresentados na Fig. 4 mostram pequenas variações do peso volúmico que podem ser acompanhadas por variações significativas da relação molecular. Na construção da Fig. 4 utilizaram-se as amostras referidas na Tabela 4 e que apenas sofreram alteração meteórica, não se tendo utilizado os granitos róseos nem as amostras recolhidas junto a zonas de falha. No seu conjunto estes resultados são concordantes com as obser-

vações apresentados nos dois trabalhos anteriormente referidos, se bem que individualmente algumas amostras apresentem uma evolução um pouco irregular que se poderá dever ao facto de não se terem recolhido todas as amostras no mesmo perfil de alteração.

Procurámos ainda saber da existência de outras relações entre a composição geoquímica dos granitos e as suas propriedades físicas e mecânicas. Para quantificar a alteração química utilizámos alguns índices geoquímicos conhecidos. Os índices que utilizámos foram: — índice de meteorização potencial¹ (WPI) e o potencial index² (PI) de REICHE (1943); — índice de Parker³ (PARKER 1970); — índice de Miura⁴ (MIURA, 1973). Efectuámos comparações entre os índices geoquímicos referidos e as seguintes propriedades (Tabela 6): pesos volúmicos aparentes e porosidade; resistência à compressão uniaxial; resistência à carga pontual; resistência ao esmagamento das partículas; expansão por embebição; desgaste em meio húmido (slake durability) e fragmentação dinâmica.

$$(1) \text{ WPI} = \frac{\text{moles (CaO + Na}_2\text{O + MgO + K}_2\text{O - H}_2\text{O}^+)}{\text{moles (SiO}_2\text{ + Al}_2\text{O}_3\text{ + Fe}_2\text{O}_3\text{ + CaO + Na}_2\text{O + MgO + K}_2\text{O)}} \times 100.$$

$$(2) \text{ PI} = \frac{\text{moles SiO}_2}{\text{moles (SiO}_2\text{ + Al}_2\text{O}_3\text{ + Fe}_2\text{O}_3\text{ + FeO + TiO}_2)} \times 100.$$

$$(3) \text{ Índice de PARKER} = \left[\frac{(\text{Na})_a}{0,35} + \frac{(\text{Mg})_a}{0,9} + \frac{(\text{K})_a}{0,25} + \frac{(\text{Ca})_a}{0,7} \right] \times 100,$$

sendo (X)_a a proporção atómica.

$$(4) \text{ Índice de MIURA} = \frac{\left\{ \frac{\text{FeO + MnO + MgO + CaO + Na}_2\text{O + K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3\text{ + Fe}_2\text{O}_3\text{ + H}_2\text{O}^+} \right\}}{\text{rocha alterada}}$$

$$\left\{ \frac{\text{FeO + MnO + MgO + CaO + Na}_2\text{O + K}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3\text{ + Fe}_2\text{O}_3\text{ + H}_2\text{O}^+} \right\}$$

rocha sã.

Tabela 6 — Índices geoquímicos de alteração e propriedades físicas e mecânicas das amostras analisadas.

	Lagoacho		Midões								
	L1 I	L2 II	M23 I	M11 I	M25 II	M22 II	M15 II	M12 II	M8* III	M9 III	M18 IV
WPI	7.8	6.3	7.0	8.4	10.2	7.6	6.2	6.4	6.7	3.3	-5.1
PI	87.6	88.1	86.8	86.7	86.1	87.4	86.5	86.3	86.2	85.8	85.4
PARKER	78.7	73.5	72.4	78.9	78.6	75.2	76.9	75.9	74.0	73.7	59.2
MIURA	1.0	0.93	1.0	1.02	1.01	0.95	0.95	0.96	0.97	0.87	0.52
n (%)	1.4	2.2	0.9	1.5	1.4	2.1	2.8	2.6	6.8	5.9	7.4
σ_c (kN/m ²)	75.25	49.0	82.3	71.2	61.3	61.5	38.4	36.1	25.6	13.8	
Pa (kgf)	1207	974									
Is(50) (MPa)	4.63	3.09									
I _{d2} (% perd.)	1.11	2.78	1.25	2.67	1.61	2.95	1.93	2.41	2.73	6.54	
FD (%)	28.9	34.3									
$\Delta I/L$ (x 10) ⁻⁴	1.12	2.05	1.0		0.8		1.1		6.6	1.5	
γ_d (kN/m ³)	25.79	25.69	26.04	25.89	25.80	25.58	25.55	25.62	24.61	24.83	24.24
γ_{sat} (kN/m ³)	25.89	25.89	26.13	26.03	25.93	27.79	25.82	25.88	25.28	25.41	24.96

Tabela 6 — (Continuação)

	Castelo de Paiva						Paradela						
	C1	C3	C2	C7	C5*	C4*	P1	P8	P4	P2	P13#	P6#	P5#
A)	I	I	II	III	IV	IV	I	II	III	IV	II	III	III
B)	I	I	II	III	IV	IV	I	II	III	IV	II	III	III
WPI	9.2	10.6	5.4	6.9	3.6	0.5	8.0	7.7	7.5	3.1	7.1	9.3	8.7
PI	86.0	85.6	85.5	84.9	85.8	82.2	89.4	89.3	89.5	88.8	88.5	86.0	87.3
PARKER	77.8	81.3	73.0	76.0	73.7	80.7	75.3	75.4	72.7	68.1	79.4	102.0	95.7
MIURA	1.0	1.01	0.82	0.92	0.78	0.62	1.0	0.98	0.88	0.68	0.89	0.75	0.75
n (%)	0.9	1.1	5.0	5.0	12.8	6.7	1.0	1.7	3.7	11.06	1.7	5.0	3.5
σ_c (kN/m ³)	63.2	85.0	40.0	15.7		25.0	116.5	70.0	36.0		85.5	44.5	31.5
Pa (kgf)							797	562	267		1024	497	
Is(50) (MPa)							4.16	3.29	1.41	0.33	3.53	1.97	0.47
I _{d2} (% perda)	1.2	1.15	2.49	5.03		2.82	1.42	1.76	3.59		1.31	1.95	4.51
FD (%)							34.5	33.6	42.2		31.2	33.9	
$\Delta l/L$ (x 10 ⁻⁴)	2.8						1.97	3.87	4.38		1.99	7.95	11.22
γ_d (kN/m ³)	26.27	26.06	25.02	25.09	23.04	24.53	25.65	25.46	24.96	22.91	25.34	24.31	24.88
γ_{sat} (kN/m ³)	26.36	26.16	25.51	25.57	24.29	25.19	25.75	25.63	25.33	23.99	25.51	24.80	25.23

WPI — Weathering potencial index;

PI — Potencial index;

PARKER — Índice de Parker;

MIURA — Índice de Miura.

n (%) — Porosidade;

σ_c (kN/m³) — Resistência à compressão uniaxial;

Pa (kgf) — Resistência ao esmagamento de partículas;

Is(50) (MPa) — Resistência à carga pontual;

I_{d2} (% perda) — Ensaio de desgaste (Slake Durability Test);

FD (%) — Fragmentação dinâmica;

$\Delta l/L$ (x 10⁻³) — Expansão por embebição (48 h);

γ_d (kN/m³) — Peso volúmico aparente seco;

γ_{sat} (kN/m³) — Peso volúmico aparente saturado;

Ver também outros símbolos na tabela 4.

As relações mais evidentes foram obtidas entre o índice de Miura (MIURA, 1973) com o peso volúmico aparente seco e com a resistência à carga pontual (Fig. 5). A perda de óxidos durante a alteração, principalmente CaO, Na₂O e FeO, é responsável quer pela diminuição do peso volúmico quer pela diminuição do índice de Miura, justificando a relação positiva apresentada na fig. 5-A. A perda de elementos durante a alteração diminui também a resistência do granito, expressa pela resistência à carga pontual. No ensaio de carga pontual a rotura das amostras processa-se essencialmente por tracção. A resistência da rocha à tracção é significativamente diminuída pelas fissuras e pela alteração dos minerais. É a partir das fissuras que a alteração nos minerais se tende a desenvolver, pois é ao longo delas que circulam os fluidos envolvidos nos fenómenos de alteração. Na fig. 5-B apresenta-se a relação obtida entre o índice de Miura os resultados do ensaio de carga pontual.

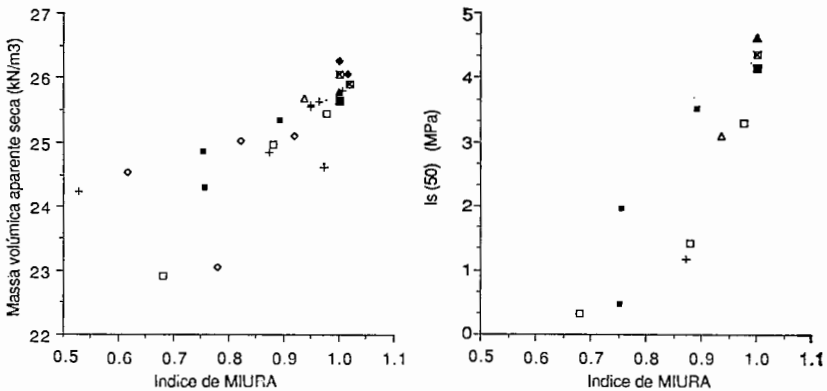


Fig. 5 — Relação entre o índice de Miura e: A) peso volúmico aparente seco; B) a resistência à carga pontual ($I_{s(50)}$). Ver símbolos na legenda da Fig. 3.

6.2. Variação das propriedades físicas e mecânicas durante a alteração

Projectando os resultados da resistência à compressão uniaxial em função da porosidade (Fig. 6), observa-se que ocorre

uma transição no comportamento para valores da porosidade próximos dos 2 %, a que correspondem resistências de aproximadamente 50 MPa. O gráfico amostra que nas amostras mais resistentes há uma variação da resistência superior a 80 MPa, a que corresponde uma variação na porosidade de apenas 1,5 %.

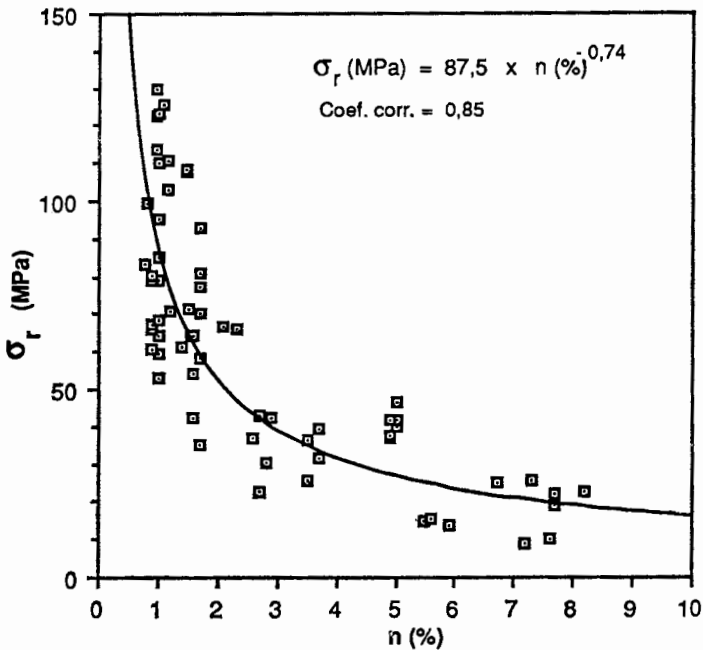


Fig. 6 — Variação da resistência à compressão uniaxial com a porosidade nos granitos.

Uma situação diferente ocorre nas amostras mais alteradas, para as quais há uma variação da resistência inferior a 50 MPa para uma gama de variação da porosidade maior que 6 %. Noutro trabalho (QUINTA FERREIRA e VEIGA PINTO, 1988) verificou-se que a alteração nos granitos, para além de diminuir a resistência, tende a transformar a rotura frágil das amostras não alteradas numa rotura mais ductil, diminuindo também a tensão de cedência relativamente à tensão de rotura.

A acentuada diminuição da resistência nas amostras pouco porosas (n menor que 2 %), até valores de apenas 40 % dos máximos obtidos, mostra que nos estádios iniciais da alteração

o granito sofre uma diminuição significativa das propriedades mecânicas que é acompanhada por pequenas variações físicas. As porosidades inferiores a 2 % e as pequenas diminuições nos pesos volúnicos indicam que as perdas de materiais são reduzidas, o que se confirma com os resultados dos cálculos geoquímicos das perdas e ganhos para as amostras seleccionadas (Tabela 5). Os catiões removidos da rede cristalina dos minerais desempenhavam importantes funções estruturais, pelo que a sua ausência diminui drasticamente a resistência da rocha. Além disso a lixiviação da rocha ocorre essencialmente ao longo das fissuras originadas pelo arrefecimento, descompressão e tectonização dos granitos, realçando a importância das fissuras nos processos de alteração e na diminuição da resistência.

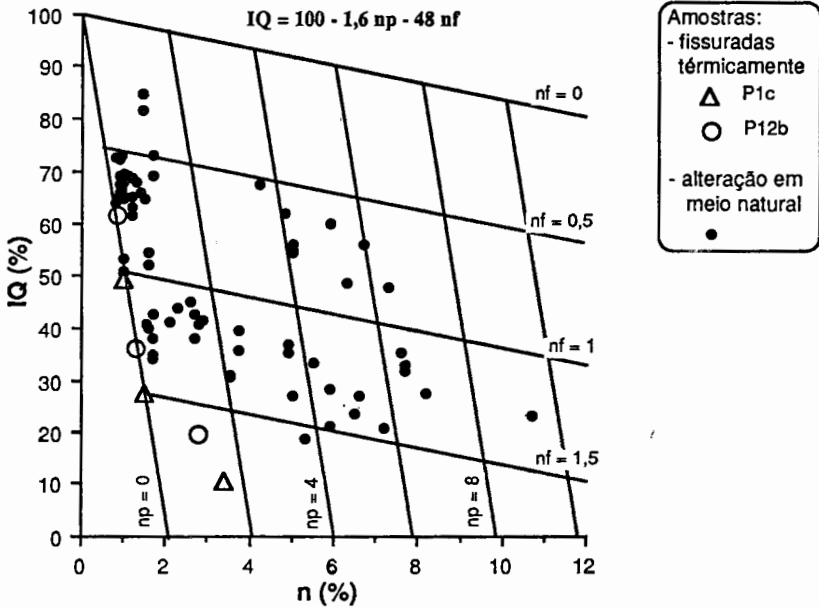


Fig. 7 — Diagrama de variação do índice de qualidade em função da porosidade ($n = nf + np$, sendo: n — porosidade, nf — porosidade de fissura, np — porosidade de poro).

Na Fig. 7 apresentam-se os valores do índice de qualidade (IQ) em função da porosidade. Com base na figura é possível separar a porosidade total nas fracções poro e fissura, segundo o procedi-

mento apresentado em TOURENQ *et al.* (1971) e TOURENQ e FOURMAINTRAUX (1974). O índice de qualidade é obtido pela equação:

$$IQ (\%) = \frac{V_L \text{ amostra}}{V_L \text{ teórico}} \times 100. \text{ A análise da figura mostra que,}$$

para porosidades inferiores a 2 %, a diminuição do índice de qualidade se deve principalmente ao aumento da porosidade de fissura. Para valores superiores a 2 % cresce o peso da fracção poro, pois a porosidade de fissura não tende a ultrapassar 1,5 %, à excepção dos granitos fissurados termicamente.

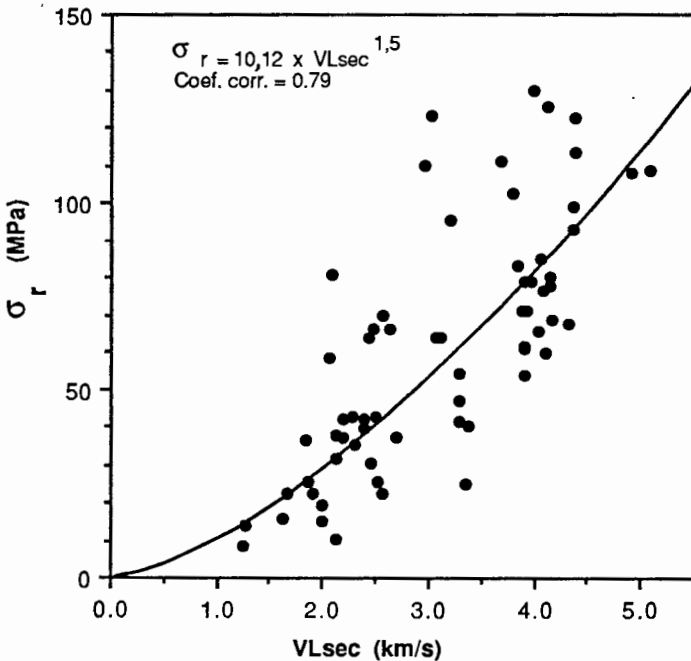


Fig. 8 — Diagrama de variação da resistência à compressão uniaxial versus velocidade de propagação das ondas longitudinais nas amostras secas.

A relação entre a resistência à compressão uniaxial e a velocidade de propagação das ondas longitudinais (Fig. 8) mostra que a resistência tende a diminuir com o decréscimo da velocidade de propagação das ondas longitudinais na amostra seca, segundo um andamento não linear. Nas amostras com resistência superior a 50 MPa, quer as ondas longitudinais quer a resistência apre-

sentam grande dispersão. Para estas amostras já se verificou que apresentam uma melhor relação entre a porosidade e a resistência à compressão uniaxial (Fig. 6).

KAZI *et al.* (1983), ao estudarem a relação entre a velocidade de propagação das ondas longitudinais e a resistência à compressão uniaxial nas rochas, obtiveram a equação $\log \sigma = 0,608 + 0,314\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, em que σ é a resistência à compressão uniaxial (MN/m²), E é o módulo de elasticidade dinâmico (GN/m²) calculado a partir das ondas elásticas e ρ a densidade (g/cm³).

Na Fig. 9-A mostra-se a relação obtida entre a velocidade de propagação das ondas elásticas na amostra seca e a resistência à carga pontual. Os dois parâmetros referidos são significativamente influenciados pela alteração e pela fissuração das amostras, exibindo uma relação positiva com um coeficiente de correlação baixo.

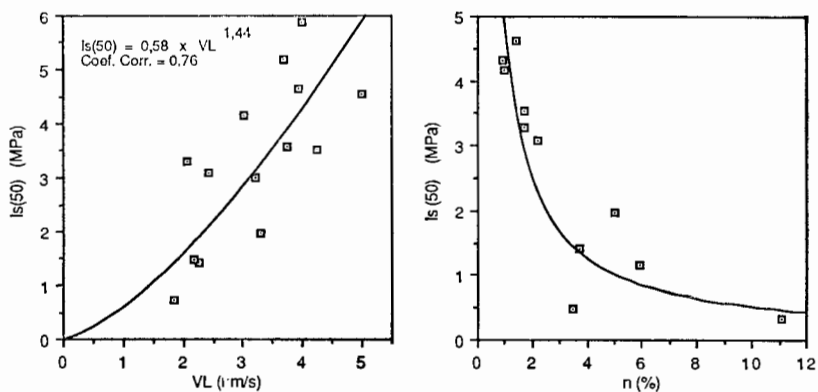


Fig. 9 — Relação de $Is_{(50)}$ em função da velocidade de propagação das ondas longitudinais e da porosidade.

O diagrama de variação de $Is_{(50)}$ em função da porosidade (Fig. 9-B) apresenta um andamento semelhante ao observado para a resistência à compressão uniaxial em função da porosidade, o que seria de esperar face à conhecida relação existente entre os resultados dos ensaios de carga pontual e de compressão uniaxial.

Há que ter em atenção que os resultados obtidos para os granitos estudados, que são porfiróides e de grão grosseiro, podem

não se adequar a outros tipos de granitos. DEARMAN e IRFAN (1978) verificaram que as relações entre diversos parâmetros: — porosidade e valor do ensaio com o martelo Schmidt, — porosidade ou peso volúmico aparente seco com a velocidade de propagação das ondas elásticas nas amostras secas — e resistência à compressão uniaxial com um índice de microfacturação, apresentavam relações diferentes para os granitos de grão fino e para os granitos de grão grosseiro.

7. CONCLUSÕES

As rochas graníticas sofrem modificações de natureza química, física e mecânica durante o processo de alteração que, mesmo para locais diferentes, apresentam aspectos comuns. Para os elementos maiores verifica-se que CaO, SiO₂, Na₂O e FeO apresentam perdas que de um modo geral crescem com o avanço da alteração. Fe₂O₃ apresenta sistematicamente ganhos em todos os locais. Quanto às perdas e ganhos dos elementos menores, não é possível tirar uma conclusão geral para os 4 locais. A projecção das proporções moleculares em diagramas triangulares mostra que as amostras mais alteradas tendem a deslocar-se no sentido das menores concentrações de CaO. O diagrama triangular CaO-MgO-FeO permite separar diferentes intensidades de alteração nos granitos. A acção meteórica foi predominante no processo de alteração, com excepção dos granitos róseos de Paradela. O comportamento geoquímico das amostras recolhidas próximo das zonas de falha e dos granitos róseos é significativamente diferente.

Neste trabalho confirmou-se ser difícil relacionar directamente a composição química das rochas graníticas, exibindo diferentes estados de alteração, com as respectivas propriedades físicas ou mecânicas. Para além da composição química existem outros factores, como a fissuração, a porosidade e os minerais de neoformação, originando modificações microtexturais, cuja influência não é considerada quando se utilizam parâmetros para a quantificação geoquímica da alteração. As melhores relações que obtivemos foram entre: 1) o índice de Miura com o peso volúmico aparente seco e com a resistência à carga pontual; 2) a relação molecular $\frac{2\text{Fe}_2\text{O}_3}{2\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}}$ com o peso volúmico aparente seco.

A resistência dos granitos durante a alteração mostra uma boa relação com a porosidade e mesmo com a velocidade de propagação das ondas longitudinais, apresentando no entanto maior dispersão. As fissuras desempenham um papel de relevo no comportamento dos granitos, em especial nas fases iniciais de alteração.

Agradecimentos — O autor expressa o seu agradecimento ao Prof. Dr. COTELO NEIVA pela supervisão do trabalho. No Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade de Coimbra recebeu várias contribuições, nomeadamente da Prof.^a Dr.^a ANA MARGARIDA NEIVA, do Prof. Dr. PORTUGAL FERREIRA, e do Prof. Dr. FERREIRA PINTO. Do Laboratório Nacional de Engenharia Civil agradece a colaboração do Dr. DELGADO RODRIGUES e do Eng. VEIGA PINTO.

BIBLIOGRAFIA

- AIRES-BARROS, L. e MIRANDA, A. M. (1979) — A alteração laboratorial de rochas pelo extractor de Soxhlet e a sua repercussão na oxidação $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ e na variação da densidade aparente. *Comunic. Serv. Geol. Port.*, Tomo LXIV, pp. 234-256.
- DEARMAN, W. R. e IRFAN, T. Y. (1978) — Assessment of the degree of weathering in granite using petrographic and physical index tests. *Int. Symp. on Deterioration and Protection of Stone Monuments*, 2.3, pp. 1-35, Paris.
- FOSTER, M. D. (1960) — Interpretation of the composition of trioctahedral micas. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 354-B, pp. 1-49.
- GRESENS, R. L. (1967) — Composition-volume relationships of metassomatism. *Chemical Geology*, 2, pp. 47-65.
- IAEG (1981) — Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. Report by the IAEG Comission on Eng. Geol. Mapping, *Bull. IAEG* N.º 24, pp. 235-237.
- IRFAN, T. Y. e DEARMAN, W. R. (1978) — The engineering petrography of a weathered granite in Cornwall, England. *Q. J. Engng. Geol.*, Vol. 11, pp. 233-244.
- IRFAN, T. Y. e POWELL, G. E. (1985) — Engineering geological investigations for pile foundations on a deeply weathered granitic rock in Hong Kong. *Bull. IAEG*, N.º 32, pp. 67-80.
- ISRM (1981) — Rock characterization testing & monitoring — ISRM Suggested methods. Editado por E. T. Brown, Pergamon Press.
- ISRM (1985) — Suggested method for determining point load strength. *Int. J. Rock Mech.* Vol. 22, N.º 2, pp. 51-60.
- KANIMENI, D. C. e DUGAL J. B. (1982) — A study of rock alteration in the Eye-Dashwa Lakes pluton, Atikokan, Northwestern Ontario, Canadá. *Chemical Geology*, 36, pp. 35-57.

- KRAUSKOPF, K. B. (1972) — Introdução à geoquímica Vol. 1, MacGraw-Hill, edição Portuguesa da Editora Polígono, São Paulo.
- LEE, S. G. e FREITAS, M. H. (1989) — A revision of the description and classification of weathered granite and its application to granites in Korea. *Q. J. Engng. Geol.*, Vol. 22, pp. 31-48.
- MARSAL, R. J. e RESENDIZ, D. (1975) — Presas de tierra y enrocamiento. Limusa, México.
- MARTINS, J. A. e SAAVEDRA, J. (1976) — Estudo do processo de enrubescimento do granito da Serra do Gerês (Norte de Portugal). *Memórias e Notícias*. Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra, N.º 82, pp. 79-93.
- MEDEIROS, A. C., PILAR, L. e FERNANDES, A. P. (1964) — Notícia explicativa da folha 13-B — Castelo de Paiva. *Carta geológica de Portugal*, Escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.
- MILLER, C. F., STODDARD, E. F., BRADFISH, L. J. e DOLLASE, W. A. (1981) — Composition of plutonic muscovite: genetic implications. *Canadian Mineralogist*, Vol. 19, pp. 25-34.
- MIRANDA, A. M. (1984) — Contribuição para o conhecimento da evolução mineralógica e geoquímica da meteorização no maciço eruptivo de Sintra. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- MIURA, K. (1973) — Weathering in plutonic rocks (Part I) — Weathering during late Pliocene of Gotsu plutonic rocks. *Japan Soc. Eng. Geol.*, 14(3).
- NEIVA, A. M. R., NEIVA, J. M. C. e PARRY S. J. (1987) — Geochemistry of the granitic rocks and their minerals from Serra da Estrela, Central Portugal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol. 51, pp. 439-454.
- NEIVA, J. M. C. (1956) — Géologie des grands barrages du Cávado et du Rabagão, Portugal. *XX Cong. Geológico Internacional*, Sec. XIII, pp. 91-107, Cidade do México.
- NEIVA, J. M. C., NEIVA, A. M. R. e GODINHO, M. M. (1965) — Meteorização do granito em clima temperado quente — Alteração do granito de Pisões (Montalegre). *Memórias e Notícias*. Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra, N.º 60, pp. 3-23.
- NORONHA, F. e RIBEIRO, M. L. (1983) — Notícia explicativa da folha 6-A — Montalegre. *Carta geológica de Portugal*, Escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.
- ONODERA, T. F., YOSHINAKA, R. e ODA, M. (1974) — Weathering and its relation to mechanical properties of granite. *Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mechanics*, V. II(A), pp. 71-78, Denver.
- PARKER, A. (1970) — An index of weathering for silicate rocks. *Geo. Mag.*, Vol. 107, pp. 501-504.
- QUINTA FERREIRA, M. (1987) — Chemical and mineralogical characters of granites used in Portuguese rockfill dams and their possible relationship with mechanical properties. Eng. Geology Section, Imperial College of Science and Technology, London (não publicado).
- QUINTA FERREIRA, M. e VEIGA PINTO, A. (1988) — Estudo da resistência

- à compressão simples de granitos numa prensa rígida. *Geotecnia* N.º 54, pp. 27-39, Novembro.
- QUINTA FERREIRA, M., ANA QUINTELA e VEIGA PINTO, A. (1987) — Barragem de Paradelá. Estudo dos enrocamentos e análise do comportamento estrutural. Relatório 230/87-NF/NP do LNEC, Outubro de 1987, Lisboa.
- REICHE, P. (1943) — Graphic representation of chemical weathering. *J. Sed. Petrol.*, 13, pp. 58-68.
- SARAIVA, A. L. (1982) — Propriedades geotécnicas dos granitos em função do seu grau de alteração: caso dos granitos de Santa Comba Dão. *Memórias e Notícias*, Publ. Mus. Lab. Mineral. Geol., Univ. Coimbra, N.º 93, pp. 57-70.
- TEIXEIRA, C., CARVALHO, H. F., SANTOS, J. P., PERES, A. M. e BARROS, R. F. (1967) — Notícia explicativa da folha 17-D. *Carta geológica de Portugal*, Escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.
- TEIXEIRA, C., CARVALHO, L. H., BARROS, R. F., MARTINS, J. A. e HAAS, W. E. (1961) — Notícia explicativa da folha 17-C — Santa Comba Dão. *Carta geológica de Portugal*, Escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.
- TEIXEIRA, C., SANTOS, J. P., CARVALHO, H. F., FERNANDES, A. P. e VAIRINHO, M. M. (1974) — Notícia explicativa da folha 20-B — Covilhã. *Carta geológica de Portugal*, Escala 1/50 000. Serv. Geol. Portugal.
- THOMPSON, M. e WALSH, J. N. (1983) — A handbook of inductively coupled plasma spectrometry. *Blackie & Son*, Glasgow.
- TOURENQ, C., FOURMAINTRAUX, D. e DENIS, A. (1971) — Propagation des ondes et discontinuités des roches. *Symp. Soc. Int. Mec. Roches*, Nancy.
- TOURENQ, C. e FOURMAINTRAUX, D. (1974) — L'indice de qualite des roches, quelques applications. *Proc. 2nd Int. Cong. IAEG*, IV-20₁₋₈, S. Paulo.
- VEIGA PINTO, A., QUINTA FERREIRA, M. e ANA QUINTELA (1988) — Estudo do enrocamento e análise do comportamento estrutural da barragem de Paradelá. *Geotecnia* N.º 52, pp. 3-23.

NOTA DE REVISÃO: Nas figuras 4 e 5 onde se lê «Massa volúmica aparente seca» deverá lêr-se «Peso volúmico aparente seco».

