

A HETEROGENEIDADE HIDROGEOLÓGICA NUM MACIÇO DE ROCHAS METAMÓRFICAS COM FRACTURAS SISTEMÁTICAS.

Fernando L. Pacheco

*Assistente da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Secção de Geologia
5000 Vila Real, Portugal
Telefone: 320186, Fax: 320480; fpacheco@utad.pt*

Ana M. Alençoo

*Assistente da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Secção de Geologia
5000 Vila Real, Portugal
Telefone: 320280, Fax: 320480; alencoao@utad.pt*

Alcino S. Oliveira

*Assistente da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Secção de Geologia
5000 Vila Real, Portugal
Telefone: 320279, Fax: 320480; soliver@utad.pt*

Carlos A. C. Pires

*Professor Associado da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Secção de Geologia
5000 Vila Real, Portugal
Telefone: 320216, Fax: 320480*

Martim R. V. Portugal Ferreira

*Prof. Catedrático
U.I. 304/94 JNICT
Universidade de Coimbra, Portugal*

1 - Introdução

A fracturação de maciços homogéneos e isotrópicos (por exemplo, granitos) é condicionada, fundamentalmente, pela orientação do campo de tensões. Em maciços anisotrópicos (quartzitos, filádios), a natureza e a direcção das anisotropias complementa a influência da orientação do campo de tensões e esta dupla influência torna mais sistemático o padrão da fracturação.

O movimento da água subterrânea em maciços de rochas cristalinas é controlado pela condutividade hidráulica planar, que é função da densidade e abertura das fracturas. Como consequência directa da anisotropia, a condutividade hidráulica destas rochas,

medida sobre um volume representativo, não é a mesma em todas as direcções. Nas rochas metamórficas estas diferenças deverão acentuar-se devido à fracturação sistemática que lhes é característica. A diversidade litológica também influencia o comportamento hidráulico das rochas metamórficas, que em princípio poderão ser encaradas com sistemas de múltiplas transmissividades cada um representando um volume de rocha no qual as propriedades hidráulicas são conservativas.

Neste artigo relacionaram-se a distribuição das nascentes e o rebaixamento da superfície piezométrica com os tipos rochosos e respectivos padrões de fracturas, existentes em 25Km² de uma região montanhosa do Norte de Portugal (Serra da Padrela).

2- Localização e enquadramento geológico

A zona estudada compreende o sector da Serra da Padrela entre Tinhela de Baixo e Lagoa (Vila Pouca de Aguiar, Norte de Portugal) e representa-se por um quadrado com 5Km de lado limitado pelas coordenadas Gauss (M,P)=(245,505) e (M,P)=(250,510) km.

No contexto geotectónico, a área de Balugas (pequena aldeia situada no centro da área de estudo) enquadra-se na Sub-Zona Galiza Média Trás-os-Montes, que corresponde a um sub-dominio da Zona Centro Ibérica. A geologia regional (Figura 1) caracteriza-se, fundamentalmente, por granitos Hercínicos intruídos em formações metassedimentares do Paleozóico constituídas essencialmente por filádios quartzosos, xistos carbonosos e quartzitos. As unidades metamórficas podem ser interpretadas como pertencentes ao Peritransmontano Inferior-Médio (Portugal Ferreira, 1965) ou ao Peritransmontano Basal-Inferior (Noronha & Ribeiro, 1993).

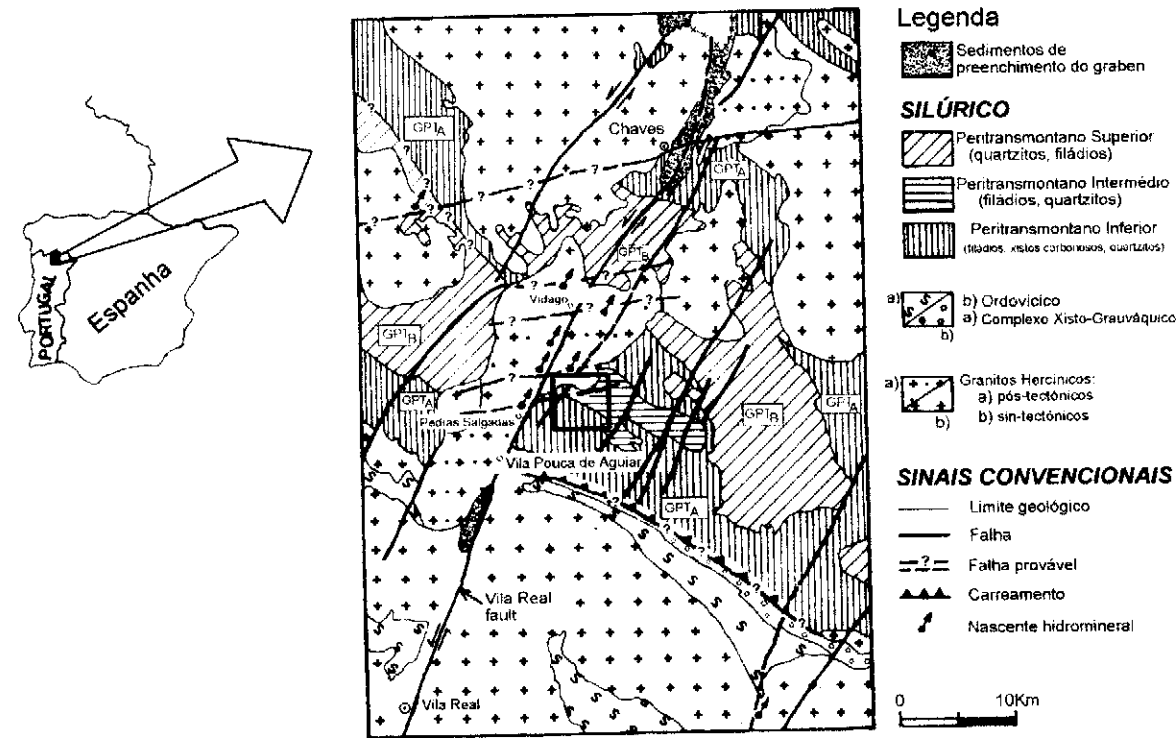


Figura 1 - Localização da área de estudo e enquadramento geológico regional.

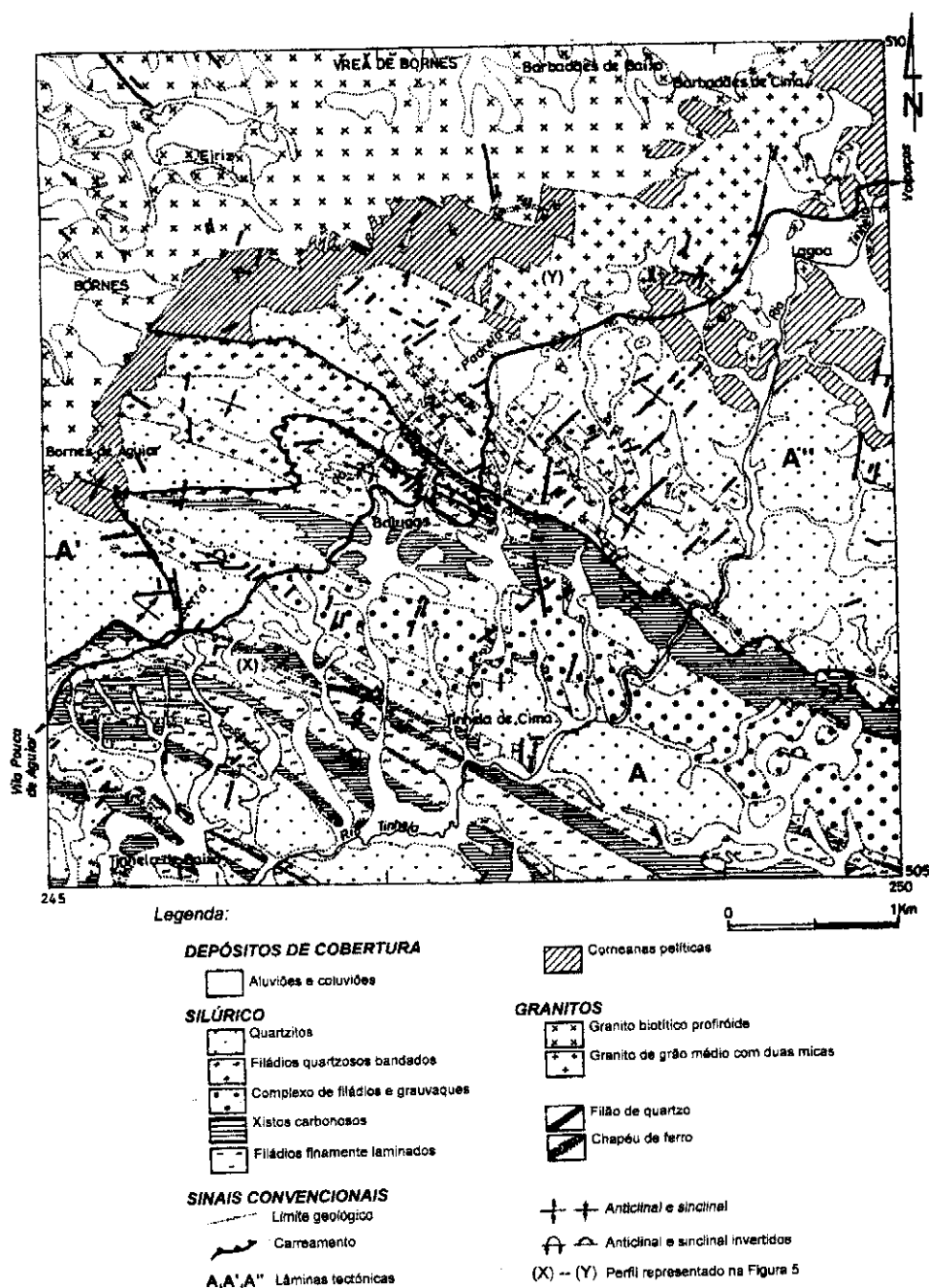


Figura 2 - Mapa geológico mostrando a diversidade litológica e a estrutura.

Na zona de Balugas pode definir-se uma estrutura geológica em “empilhamento de lâminas tectónicas” (A, A', e A'', Figura 2), separadas por carreamentos, cada uma apresentando as seguintes unidades litostratigráficas (Portugal Ferreira & Pacheco, 1993):

- Lâmina A : 1) Quartzitos inferiores (Q₁); 2) Xistos listrados finos, intercalados com xistos carbonosos e filádios quartzosos; 3) Ampelitos e liditos; 4) Quartzitos (Q₂); 5) Complexo de filádios, grauvaques e quartzitos impuros;

Lâmina A': 1) Unidade 5 da lâmina A; 2) Quartzitos (Q₃); 3) Filádios quartzosos bandados; 4) Quartzitos superiores (Q₄);

Lâmina A'': Unidades 2, 3 e 4 da lâmina A'.

3 - Distribuição das nascentes; relação com o padrão de fracturação e com a diversidade litológica

Grande parte das nascentes da área de estudo estão espacialmente conectadas e hidraulicamente dependentes de fracturas discretas (Figuras 3 e 4). Essas fracturas podem ser classificadas com base nos seguintes critérios:

- a) Grupos de orientação, que são coerentes com os principais eixos de dobramento Hercínico (F₁ e F₂), e que por isso podem ser discriminados em longitudinal L₁ (N40±10°W) e L₂ (N60±10°W), cruzado C₁ (N50°E) e C₂ (N30°E) e diagonal D₁ (N20°E), D_{1a} (N80°E), D₂ (NS) e D_{2a} (N60°E). A fracturação alpina tende a jogar ao longo destes azimutes, seguindo principalmente os sistemas C₁ e D₂, sendo também representada pela família N10°W;
- b) A frequência (N) de fracturas, aqui representada pelos comprimentos totais;
- c) A frequência (N_k) de nascentes, que é expressa pelo número de nascentes por quilómetro de lineamento;
- d) A abertura das fracturas (b), que condiciona fortemente as respectivas condutividades hidráulicas planares. Em virtude de actualmente o eixo principal do campo de tensões se encontrar orientado segundo NW-SE (Cabral, 1996), as diaclases e fracturas L₁ e L₂ deverão encontrar-se mais abertas. Tal é difícil de confirmar uma vez que as diaclases L e as foliações não são facilmente distinguíveis. Contudo, num afloramento quartzítico bem como num afloramento lidítico próximo de uma zona de carreamento, foram registadas aberturas de diaclases L entre 1 e 4 cm.

Considerando os critérios a) e c) e tendo em consideração os caudais de Verão das nascentes cartografadas, é possível estimar o contributo das diversas famílias de fracturas para o controlo da distribuição das nascentes e da descarga por elas produzida (Tabela 1a). Torna-se importante salientar as diferenças obtidas na afiliação entre nascentes e fracturas, enquanto usando sobreposição de mapas (quarta coluna, a) ou observações de campo (b). Com base nestes últimos resultados é clara a importância que as orientações longitudinais e Alpinas assumem relativamente à circulação da água subterrânea. Convém referir que a descarga está sub-avaliada, uma vez que não foram contabilizados os caudais das nascentes exploradas para uso particular nem a descarga produzida por nascentes emergentes no leito ou margens do rio Tinhela.

A distribuição das nascentes e a descarga de água subterrânea também são controladas pela litologia. A densidade (número de nascentes por quilómetro quadrado de afloramento) e os caudais de Verão de nascentes perenes estão representados na Tabela 1b para cada unidade litostratigráfica. Os quartzitos são responsáveis por dois terços da descarga natural na região.

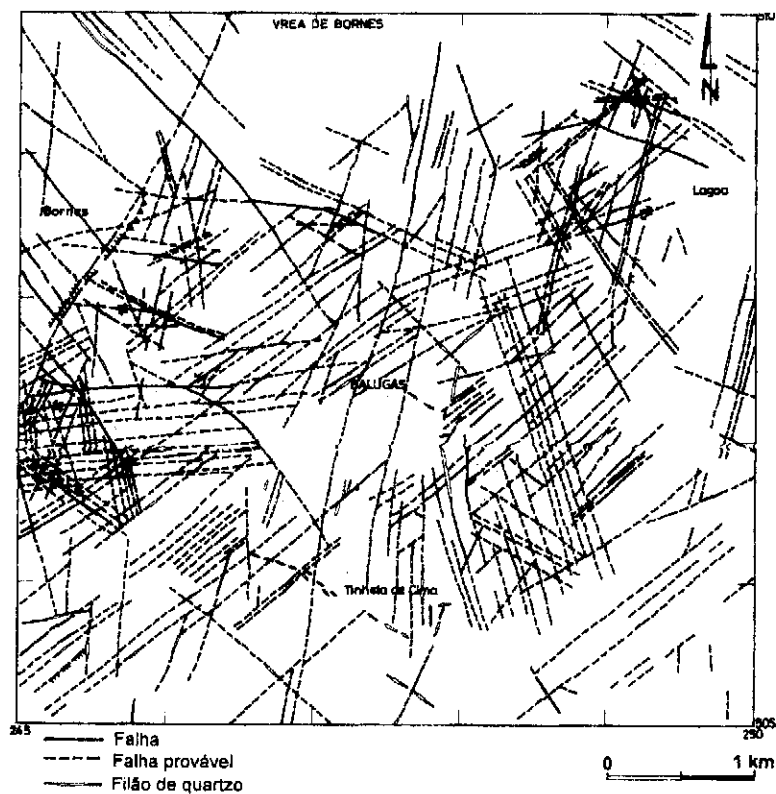


Figura 3 - Mapa de fracturação da região.

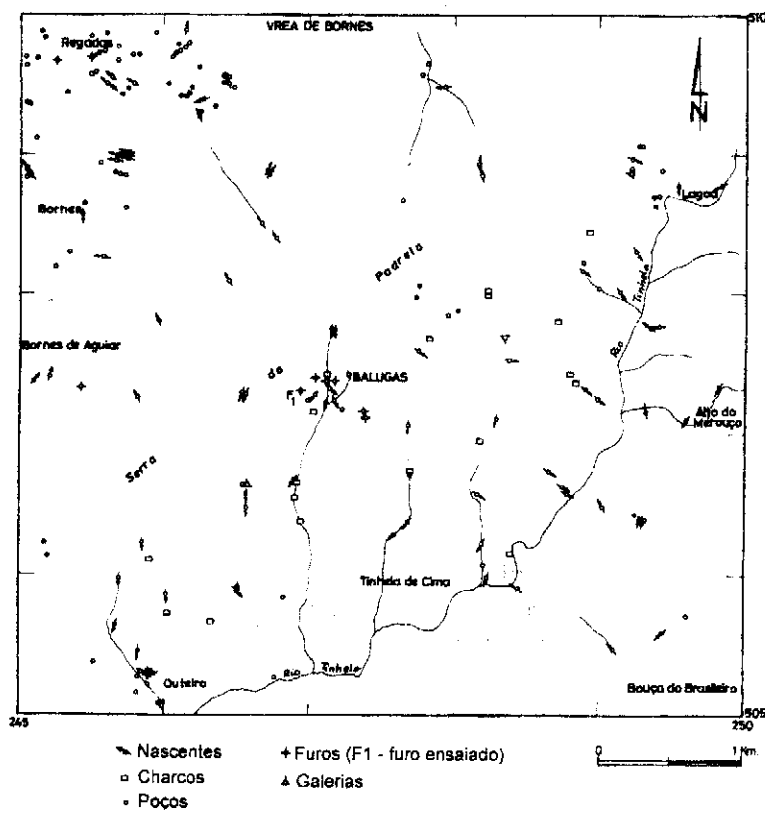


Figura 4 - Mapa com nascentes, charcos, poços e furos da região.

Tabela 1a - Relação entre a orientação das famílias de fracturas e a distribuição e correspondente descarga estival das nascentes da zona de Balugas. N.A. - nascente não atribuída a nenhuma família. Grupos de caudal assumidos: Ef - efêmero; MB - muito baixo (descarga média de 0.05 l/s); B - baixo (0.1 l/s); M - médio (0.2 l/s); E - elevado (0.6 l/s).

Família	Orientação	Extensão total (km)	Número de nascentes		Nascentes/km de lineamento (N _k)		Nascentes por grupo de caudal					Descarga estival medida (l/s)
			(a)	(b)	(a)	(b)	Ef	MB	B	M	E	
L ₁ +L ₂	N30-70°W	34.4	12	30	0.35	0.87	9	5	6	5	5	4.85
C ₁	N50°E	66.9	22	0	0.33	0.00	0	0	0	0	0	0.00
C ₂ +D ₁ +D ₂ (c)	NS-N30°E	51.2	5	22	0.1	0.43	3	4	6	6	3	3.80
D _{1a} +D _{2a}	N60-80°E	28.8	5	2	0.17	0.07	0	0	1	0	1	0.70
Alpina	N10W	?	?	9	?	?	1	4	2	2	0	0.80
N.A.	-	-	20	4	-	-	4	0	0	0	0	0.00
Total	-	-	64	67	-	-	17	13	15	13	9	10.15

(a) - Resultados obtidos por sobreposição das Figuras 3 e 4 (Pacheco & Portugal Ferreira, 1995).

(b) Resultados obtidos a partir de observações de campo e critérios hidrogeológicos.

(c) Também correspondentes a azimutes alpinos

Tabela 1b - Densidade de nascentes perenes e descarga estival em cada unidade litostratigráfica (cf. unidades na Figure 2).

Unidade	N	A (Km ²)	d	Nascentes por grupo de caudal				Q(l/s)
				MB	B	M	E	
Q ₁ + Q ₂	8	2.8	2.9	2	2	2	2	1.90
X _B	5	2.2	2.3	2	1	2	0	0.60
N _N	3	2.7	1.1	1	2	0	0	0.25
X _L	4	1.9	2.1	1	0	3	0	0.65
f _{qb}	2	1.1	1.8	1	1	0	0	0.15
Q ₃ + Q ₄	19	5.7	3.3	5	6	2	6	4.85
Comeanas pelíticas	6	2.3	2.6	0	2	3	1	1.40
Granito duas micas	3	1.7	1.8	1	1	1	0	0.35
Total	50	20.4	2.5	13	15	13	9	10.15

Símbolos: N, A, d, Q - numero de nascentes, area de afloramento, densidade de nascentes (d=N/A) e descarga medida em cada unidade, respectivamente; informação adicional idêntica à da Tabela 1a.

4 - Comportamento hidráulico das unidades metamórficas

Foram realizados alguns ensaios de bombagem num furo com 110 metros de profundidade, que alcançou produtividade a partir da zona de contacto entre os filádios X_B e os quartzitos Q₁ (furo F₁, Figura 5). O gráfico semi-logarítmico rebaixamento *versus* tempo revela um aquífero semi-cativo com transmissividade “total” igual a 5.5x10⁻⁴ m²/s. A interpretação dos dados registados durante a execução de dois ensaios de bombagem a 3 l/s, um de curta e outro de longa duração (Figuras 6ab), pode ser usada para discriminar um sistema de múltiplas transmissividades que nos parece geologicamente aceitável. Tais transmissividades (em m²/s) ordenam-se segundo a seguinte sequência: T₁=7.0x10⁻⁴, T₂=2.0x10⁻⁴, T₃=10⁻⁴, T₄=2.6x10⁻⁴.

Tendo em atenção os volumes de água extraída (e os correspondentes volumes de rocha afectados) e dados geológicos, pode propor-se que as transmissividades T₁-T₄ sejam explicadas pelas heterogeneidades das rochas; elas correspondem à integração progressiva dos seguintes volumes de rocha (cf. Figura 5): R₁ - zona de carreamento; R₂ - expansão para os quartzitos Q₁, sendo, no entanto, o rebaixamento influenciado pela barreira dos filádios X_B; R₃ - nova expansão para quartzitos intercalados com filádios (Q₃ + F_{qb} + Q₄);

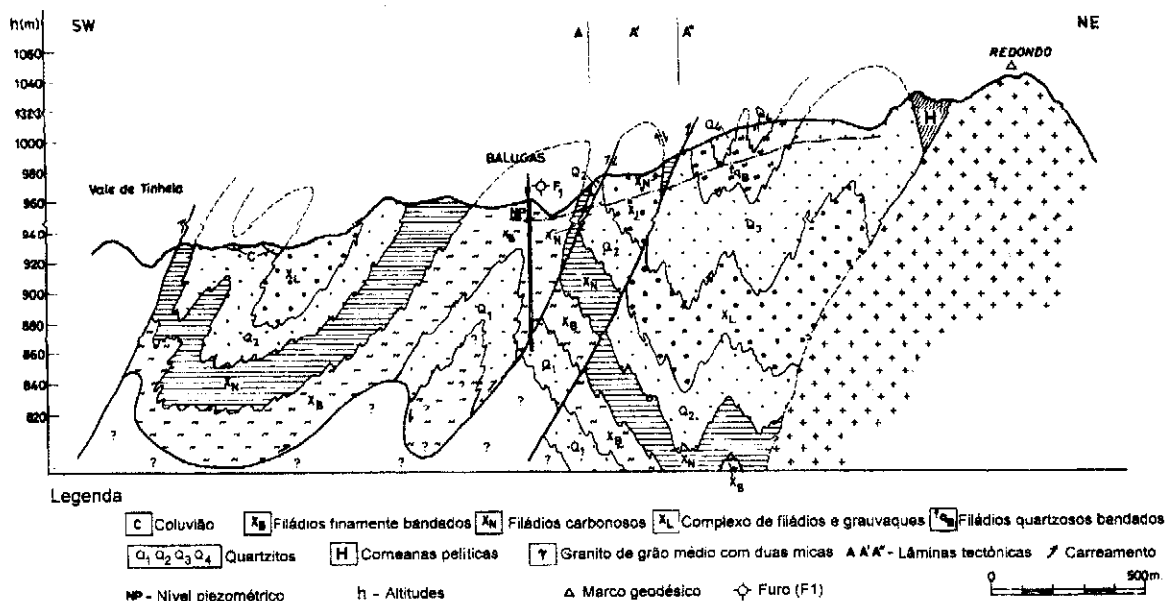


Figura 5 - Perfil Geológico mostrando o furo F₁ e a estrutura.

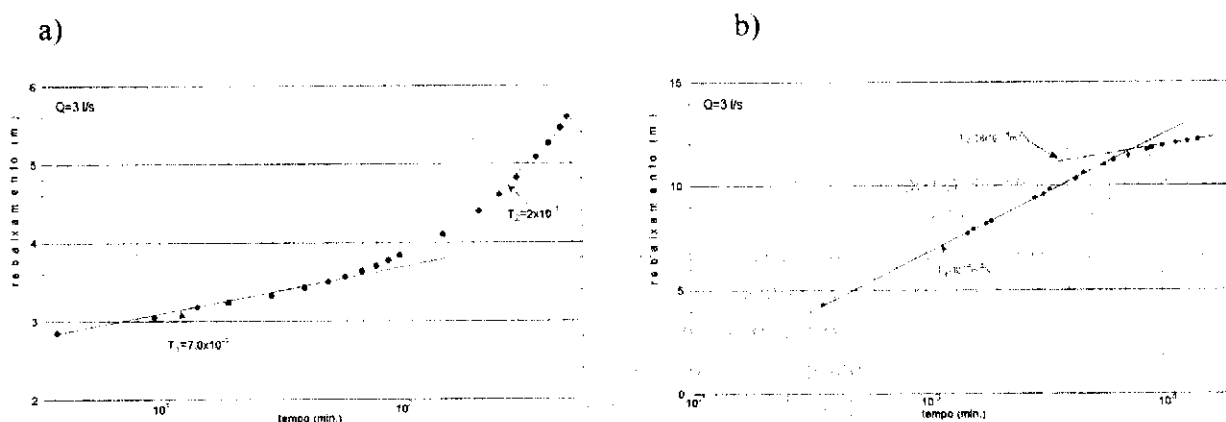


Figura 6 - Curvas rebaixamento-tempo; a) ensaio de curta duração, b) ensaio de 10-dias.

e R₄ - compreendendo os quartzitos que existem para Nordeste (Q₃). Sugere-se que o fluxo da água subterrânea provém principalmente do compartimento Norte, e interpretam-se os pontos das curvas rebaixamento-tempo onde os gradientes mudam como tendo o significado geológico de limites entre unidades rochosas. A densidade (N) e abertura (b) das fracturas (medidas directamente sobre rochas dos domínios R₁, R₃ e R₄ e indexadas pelo parâmetro Nb^3/m^2 - "influência hidráulica") e a distribuição e descarga das nascentes (Tabelas 1ab) não contradizem esta interpretação (Tabela 3). Os dados usados para definir as influências hidráulicas foram obtidos em afloramentos próximos da zona do furo F₁. Esses dados deveriam resultar de uma observação cuidada de domínios cujo tamanho pudesse ser considerado representativo das diferentes litologias. Os que se representam na

Tabela 3 deverão ser criticamente considerados uma vez que o varrimento efectuado incluiu apenas 170 fracturas e 1470 m² de área de afloramento.

Tabela 3 - Densidades (N), aberturas (b) e influências hidráulicas (Nb³/m²) determinadas para os domínios R₁, R₃ e R₄, com base em 170 fracturas e 1470 m² de área de afloramento.

Domínio	Densidade - N (Número de fracturas por m ²) (*)		Abertura - b (mm)		Influência hidráulica (Nb ³ /m ²) (****)
	Total	Efectiva (***)	Média	Intervalo	
R ₁ (carreamento) (**)	0.2	0.14	2.6	0-8	1.1
R ₂	?	?	?	?	?
R ₃ (em filádios Quartzosos)	0.1	0.03	1.6	0-9	0.3
R ₄ (em quartzitos)	0.2	0.13	2.7	0-13	4.2

(*) As densidades estão sub-avaliadas uma vez que foram calculadas assumindo o varrimento total dos afloramentos.

(**) Foram medidas apenas fracturas discretas (grande parte da zona está fortemente brechificada); as observações estenderam-se 40 m para Nordeste da superfície de carreamento.

(***) Foram consideradas apenas fracturas com abertura visível.

(****) O Nb³ foi calculado para cada classe de abertura; a abertura considerada foi b/2, uma vez que os valores de b registados correspondem aos máximos observados ao longo do comprimento visível das fracturas.

Devido ao facto de existir uma forte correlação entre a frequência de nascentes e a frequência de fracturas (Tabela 1a), pode sugerir-se a hierarquização dos sistemas de fracturas como uma segunda interpretação dos resultados obtidos com os ensaios de bombagem. Por exemplo, o segmento da curva rebaixamento-tempo que mostra um ligeiro decréscimo de transmissividade (o que inclui T₂ = 2.0x10⁻⁴ m²/s e T₃ = 10⁻⁴ m²/s) pode ser interpretado do seguinte modo: a água armazenada em fracturas progressivamente menos produtivas fornece o volume de água necessário para a bombagem.

Bibliografia

- CABRAL, J., (1996). Sismotectónica de Portugal. Colóquio/Ciências, Ed. Fundação Gulbenkian, n. 18, p. 39-58.
- NORONHA, F. & RIBEIRO, M.A., (1993). Mineralizações em contexto granítico. Guia de excursão, IX Semana de Geoquímica e II Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade do Porto.
- PACHECO, F.A.L. & PORTUGAL FERREIRA, M.R., (1995). Relação entre a fracturação, a distribuição de nascentes e o comportamento hidráulico de um maciço de rochas metamórficas. In. IV Congresso de Geologia, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Universidade do Porto, Memórias 4, p. 501-506.
- PORTUGAL FERREIRA, M.R., (1965). Geologia e petrologia da região de Rebordelo-Vinhais. Revista da Faculdade de Ciências da Universidade de Coimbra, v. XXXVI, 287pp.
- PORTUGAL FERREIRA, M.R. & PACHECO, F.A.L., (1993). Hidrogeologia em quartzitos peritrasmontanos carreados da Serra da Padrela: a recarga e a produtividade. In. Seminário de Águas Subterrâneas e Ambiente, A.P.R.H., LNEC, Lisboa.

The distribution of springs in a mountainous area of NE Portugal (Padrela Mountain) with Silurian metamorphic rocks (quartzites, phyllites, carbonaceous slates) and Hercynian granites is interpreted as a function of: a) the fracture patterns with their specific bearings and spring densities (N_k); b) the planar porosities and conductivities of the different rock types, as approached with systematic measurements of the fracture densities (N) and openings (b) to determine the average Nb^3 of each rock type. A pumping test made on an exploration well was used to discriminate four regimens of transmissivities ranging between 10^{-4} and 7×10^{-4} m²/s. The successive transmissivities are to be interpreted as showing: a) the prograde zones of water outflow (thrust zone, quartzites, quartzites with phyllites and quartzites); b) the stepwards functioning of fracture systems with lower and lower conductivities.