ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS EM MACIÇOS FRACTURADOS ATRAVÉS DO MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Fernando A. L. Pacheco[3]; Alcino de Sousa Oliveira, & Ana Maria P. Alencoão

[1] Prof Auxiliar do Dep. de Geologia - UTAD - Vila Real, Tel:259 350280, Fax:259 350480, fpacheco@utad.pt

INÍCIO

Resumo

No presente estudo, foram estimados os valores medianos e respectiva distribuição espacial dos parâmetros hidráulicos permeabilidade (K), velocidade linear da água subterrânea (v) e porosidade eficaz (n_e) de zonas de falha condutoras em maciços fracturados (bacia hidrográfica do rio Sordo, Norte de Portugal). As zonas de falha foram identificadas através da interpretação de lineamentos em fotografias aéreas, dados que foram comparados com as correlações temporais entre a condutividade da água de duas dezenas de pontos de água (poços e nascentes). O método utilizado na determinação dos parâmetros hidráulicos foi o método das diferenças finitas e as equações de fluxo (lei de Darcy) e de transporte de massa por advecção. Os valores medianos, $K = 3.3\times10^{-6}$ m/s, $v = 3.3\times10^{-6}$ m/s e $n_e = 0.013$, estão em acordo com os vulgarmente citados na literatura referente a aquíferos em maciços fracturados.

Abstract

In the present work, the median values as well as the spatial distribution of the hydraulic parameters permeability (K), linear groundwater velocity (v) and effective porosity (n_e) of conductive fault zones in fractured massifs (Sordo river hydrographic basin, North Portugal) have been estimated. The fault zones were identified by interpretation of aereal photographs, and these data have been compared with the time correlations between electrical conductivities of two tens of water sites (springs and wells). The method used for the determination of the hydraulic parameters was the finite difference method and the flow (Darcy law) and mass transport equations by advection. The results, $K = 3.3\times10^{-6}$ m/s, $v = 3.3\times10^{-6}$ m/s and $n_e = 0.013$, are in agreement with those commonly cited in the literature about aquifers in fractured massifs.

LOCALIZAÇÃO E ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO DA ZONA ESTUDADA

A zona estudada (Figura 1) cobre uma área com cerca de 136.4 hectares localizados na bacia hidrográfica do rio Sordo (área: 51.2 km^2), uma pequena bacia do norte de Portugal, região de Trás-os-Montes e Alto Douro.

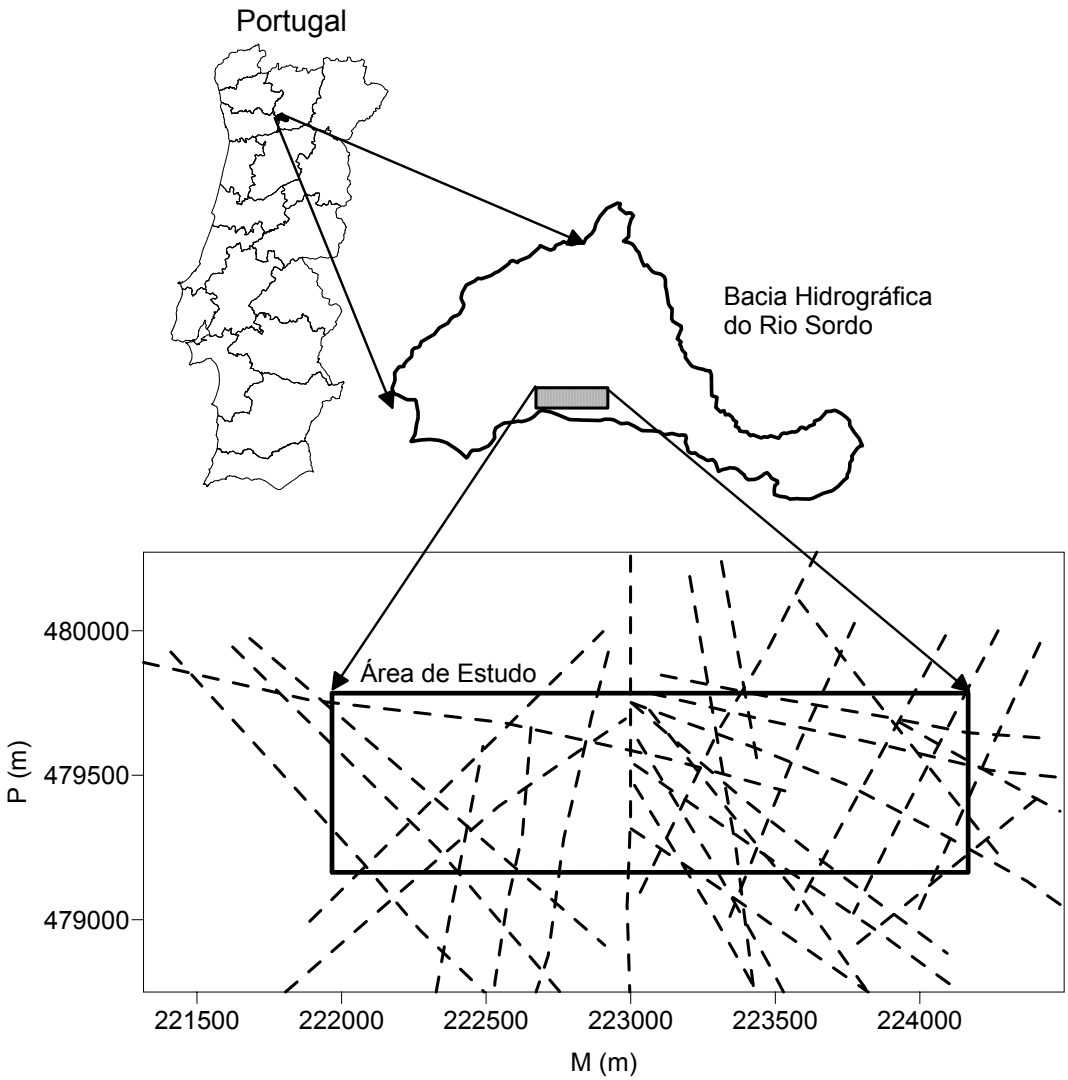

Figura 1 - Enquadramento e mapa de lineamentos da zona estudada.

A geologia da região é caracterizada por rochas cristalinas em que dominam os metassedimentos do Paleozóico (Sousa, 1982). Durante a orogenia Hercínica, estes metassedimentos foram intruídos por granitos, que apresentam expressão cartográfica na zona da foz do rio Sordo. Os depósitos recentes surgem representados de forma significativa na zona de vale, constituindo uma mancha com aproximadamente 3.2 km^2.

A fracturação da região é intensa. De acordo com Pereira (1989), os sistemas dominantes seguem as direcções NE-SW a NNE-SSW e as conjugadas daquelas, NW-SE. Na Figura 1 apresenta-se um mapa de lineamentos da zona estudada, obtido através da interpretação de fotografias aéreas à escala 1/25000. Pode constatar-se que as direcções preferenciais dos lineamentos coincidem com as direcções da fracturação.

Os sistemas aquíferos principais são de tipo fissural, que naturalmente dependem da fracturação e alteração dos afloramentos. Os depósitos de cobertura, pela

elevada produtividade e espessura em algumas zonas de vale, poderão nesses locais constituir bons sistemas aquíferos.

DADOS E METODOLOGIA

Nos meses de Julho de 2002 e Fevereiro, Março e Abril de 2003, foram monitorizados os níveis piezométricos (*h*) e as condutividades (*Ec*) de poços e nascentes, num total de 15 pontos de água. A distribuição dos pontos de água mostra-se na Figura 2 e os valores medidos no Quadro 1.

Definição de Sectores de Continuidade para os Valores da Condutividade

O traçado de linhas de isovalor relativas a uma dada variável pressupõe que essa variável seja contínua no espaço considerado. Se a variável em estudo for a condutividade de um conjunto de amostras de água subterrânea distribuídas num espaço onde afloram rochas cristalinas, os conceitos atrás referidos pressupõem a continuidade do meio cristalino relativamente ao parâmetro condutividade hidráulica (*K*). Porém, o parâmetro *K* nos meios cristalinos só pode ser considerado tendencialmente contínuo nos horizontes superficiais de rocha alterada. No interior dos maciços, isto é quando a circulação da água se faz predominantemente ao longo de diaclases, fracturas ou zonas de falha, a condutividade hidráulica do meio rochoso poderá ser contínua ao longo dessas estruturas, mas apresentará descontinuidades na direcção ortogonal às mesmas uma vez que usualmente $K_f >> K_b$, em que K_f representa a condutividade hidráulica do material que constitui a zona de falha e K_b é a condutividade hidráulica dos blocos de rocha que as delimitam. Para se traçarem linhas de isovalor relativas a uma variável definida num meio cristalino descontínuo deverá pois, antes de mais, subdividir-se o meio em sectores que apresentem continuidade. No presente estudo, propõe-se que a continuidade espacial da condutividade da água seja indexada à correlação temporal que a mesma apresenta entre pontos desse meio.

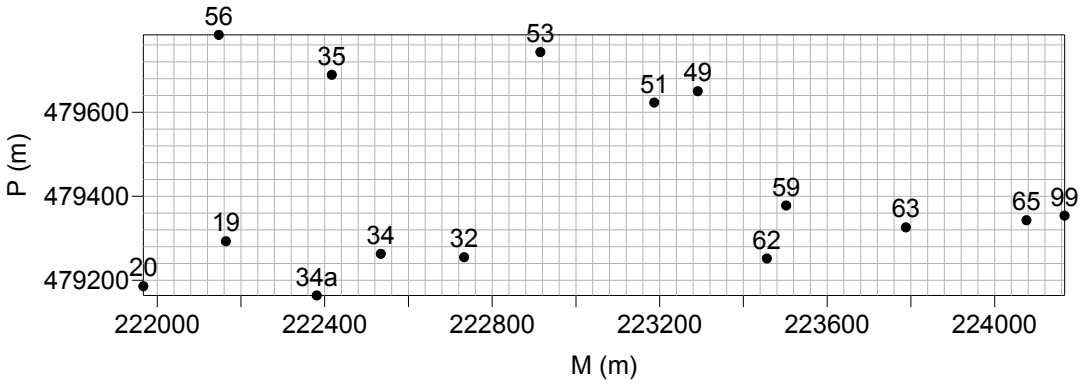

Figura 2 - Distribuição espacial dos pontos monitorizados.

Quadro 1 - Dados registados durante as campanhas de monitorização. Símbolos: *M(m)* – Meridiana do lugar, *P(m)* – Perpendicular do lugar, *h*(m) – Cota piezométrica, *Ec*(μS/cm) – Condutividade da água.

Ponto	*M* (m)	*P* (m)	*h* (m)				*Ec* (μS/cm)			
			Jul	Fev	Mar	Abr	Jul	Fev	Mar	Abr
19	222164	479293	746.60	747.53	747.50	747.3	54	48.7	60.2	51.4
32	222733	479255	741.70	741.90	744.10	743.2	196.8	216	214	213
35	222417	479689	716.30	717.20	717.40	717.6	47.4	47.3	41.6	40.4
49	223291	479650	688.20	689.00	688.85	688.8	52	58.2	56	53.5
51	223187	479623	699.00	699.60	699.70	699.5	48	53.6	56.8	49.8
53	222915	479743	698.70	699.40	700.40	699.8	49	57	56.4	51.3
59	223502	479378	697.50	698.00	698.00	698	74	61.6	62	66
62	223456	479252	700.40	701.90	703.10	702.4	125	178.9	207	170.9
63	223788	479326	696.10	697.00	697.00	697	178	203	202	226
99	224167	479354	692.50	693.00	693.00	693	102.7	100.7	95.8	96.6
20	221967	479186					64.2	78.6	86.8	91.6
34	222534	479263					150.9	167.9	167.1	179.5
34a	222381	479164					-1	98.4	124	128.8
56	222147	479784					28.7	28.6	27.3	29.2
65	224076	479343					106.7	113.4	112.8	112.7

Na prática, a delimitação de sectores de continuidade para os valores da condutividade, é conseguida do seguinte modo:

(1) Para cada ponto de água monitorizado, consideram-se os registos respectivos da condutividade (no presente caso, as condutividades relativas aos meses de Julho de 2002 e Fevereiro, Março e Abril de 2003);

(2) Determinam-se os coeficientes de correlação de Pearson entre os pontos, tendo em consideração os valores da condutividade relativos a cada um deles (no presente caso, quatro valores para cada ponto);

(3) Organizam-se em grupos os pontos que apresentem padrões de correlação idênticos;

(4) Para cada grupo, determinam-se os coeficientes de correlação médios, projectam-se esses valores nos locais respectivos, e traçam-se as isolinhas correspondentes aos valores -1, -0.5, 0, 0.5 e 1;

(5) Elabora-se um mapa resumo integrando os valores máximos dos mapas desenhados no item anterior;

(6) Neste mapa resumo, assinalam-se os sectores com correlações no intervalo 0.5 a 1.0.

Forma Geral e Formas Particulares da Equação da Taxa de Variação

A equação geral da taxa de variação pode escrever-se da seguinte forma (Domenico & Schwartz, 1990):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = B \frac{\partial \phi}{\partial s} \qquad (1)$$

em que $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ é um fluxo de algo (taxa de variação no tempo), $\frac{\partial \phi}{\partial s}$ é o seu gradiente (taxa de variação no espaço) e B é uma condutância (propriedade do meio).

A lei de Darcy na forma

$$\frac{\partial h}{\partial t} = K \frac{\partial h}{\partial s} \qquad (2)$$

é um caso particular da equação geral, sendo que neste caso o fluxo $\left(\frac{\partial h}{\partial t}\right)$ é o caudal específico, o gradiente $\left(\frac{\partial h}{\partial s}\right)$ é o declive da superfície piezométrica e a condutância (K) é a condutividade hidráulica do meio. No âmbito do transporte de massa pela água subterrânea (componentes dissolvidos), assumindo que o mesmo se processa exclusivamente por advecção e que a massa se move à mesma velocidade que a água, a equação geral da taxa de variação assume a seguinte forma particular:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = v \frac{\partial C}{\partial s} \qquad (3)$$

em que C é a concentração do elemento dissolvido, $v = \frac{K}{n_e}\frac{\partial h}{\partial s}$ é velocidade da água subterrânea na direcção do fluxo, e n_e é a porosidade eficaz do meio condutor. A condutividade (Ec) é um proxy do total de sólidos dissolvidos na água. Por essa razão, se na equação 3 se substituir a concentração C pelo valor de Ec, a condutividade hidráulica K obtida poderá ser considerada representativa da mobilidade média desses solutos.

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA, VELOCIDADE E POROSIDADE EFICAZ A PARTIR DOS DADOS MONITORIZADOS

A determinação dos parâmetros condutividade hidráulica, velocidade linear da água e porosidade eficaz em cada ponto da área estudada recorre ao método das diferenças finitas em que as taxas de variação no tempo e as taxas de variação no espaço se estimam da seguinte forma:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} \approx \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \frac{\phi(t_2) - \phi(t_1)}{t_2 - t_1} \tag{4a}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial s} \approx \frac{\Delta \phi}{\Delta s} = \nabla_{\phi}^{2} = \sqrt{\left(\frac{\phi_E - \phi_O}{2\Delta x}\right)^2 \left(\frac{\phi_N - \phi_S}{2\Delta y}\right)^2} \tag{4b}$$

e em que t_1 e t_2 ($t_2 > t_1$) são dois tempos relativamente aos quais foi feita a medição do parâmetro ϕ. Os subscritos E, O, N e S representam 4 pontos localizados Δx metros a Este ou Oeste e Δy metros a Norte ou a Sul relativamente ao ponto considerado (Golden Software, 2002).

A aplicação das equações 4a e 4b aos dados é precedida da interpolação dos valores medidos em cada ponto sobre os nós de uma grelha rectangular com m linhas e p colunas distanciadas Δy metros Δx metros entre si, respectivamente, idêntica à materializada pelos quadrados da Figura 2. No presente caso, pelo facto da área em estudo ser discretizada em sectores onde se observa a correlação temporal entre os valores da condutividade, a interpolação só cobrirá a área limitada por esses sectores. O método de interpolação utilizado foi o da ponderação pelo inverso da distância (Golden Software, 2002)

Os dados usados nas equações 4a e 4b para representar o parâmetro ϕ foram as cotas piezométricas (h), a partir dos quais se determinaram as condutividades hidráulicas pontuais, e as condutividades eléctricas da água (Ec), a partir das quais se estimaram as velocidade lineares e pontuais da água na direcção do fluxo.

Depois de se determinarem as taxas de variação no tempo e no espaço dos parâmetros h e Ec para cada ponto da grelha rectangular (Equações 4a,b), os valores de K, v e n_e nesses mesmos pontos determinam-se a partir das seguintes equações:

$$K = \left|\frac{\Delta h}{\Delta t}\right| \Big/ \left|\frac{\Delta h}{\Delta s}\right| \qquad (5a)$$

$$v = \left|\frac{\Delta Ec}{\Delta t}\right| \Big/ \left|\frac{\Delta Ec}{\Delta s}\right| \qquad (5b)$$

$$n_e = \frac{K}{v}\left|\frac{\Delta h}{\Delta s}\right| \qquad (5c)$$

em que $|X|$ representa o valor absoluto de X. Faz-se notar que, para cada intervalo de tempo (t_2-t_1), a taxa de variação no espaço utilizada ($\left|\frac{\Delta h}{\Delta s}\right|$ ou $\left|\frac{\Delta Ec}{\Delta s}\right|$) é a que se refere ao tempo t_2. Por exemplo, se na equação 5a for introduzida a variação do nível piezométrico dos poços entre Fevereiro de 2003 e Março de 2003, a variação desse mesmo nível no espaço será representada pela distribuição espacial do parâmetro h no mês de Março de 2003.

Os valores de K, v e n_e poderão ser analisados e interpretados para cada período de tempo considerado, ou então ser representados pelos valores médios desses períodos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sectores de Continuidade

Com base nos valores da condutividade apresentados no Quadro 1, determinaram-se os coeficientes de correlação de Pearson entre os pontos monitorizados. A análise das correlações permitiu distinguir dois grupos de pontos, um grupo englobando os locais 20, 32, 34, 34A, 49, 51, 53, 62, 63 e 65, o outro os locais 35, 56 e 99. Os padrões de correlação

correspondentes mostram-se nas Figuras 3a,b. Por apresentarem padrões de correlação muito diferentes destes, os locais 19 e 59 formaram dois grupos de pontos isolados (Figura 3c).

A delimitação dos sectores de continuidade para os valores da condutividade, de acordo com o método das correlações proposto acima, mostra-se na Figura 4. Os primeiros quatro painéis mostram os coeficientes de correlação de cada grupo (valores médios) ou de cada amostra isolada. O painel inferior regista os valores máximos dos painéis anteriores. As zonas assinaladas a cinzento apresentam coeficientes de correlação entre 0.5 e 1 sendo por isso consideradas sectores de continuidade.

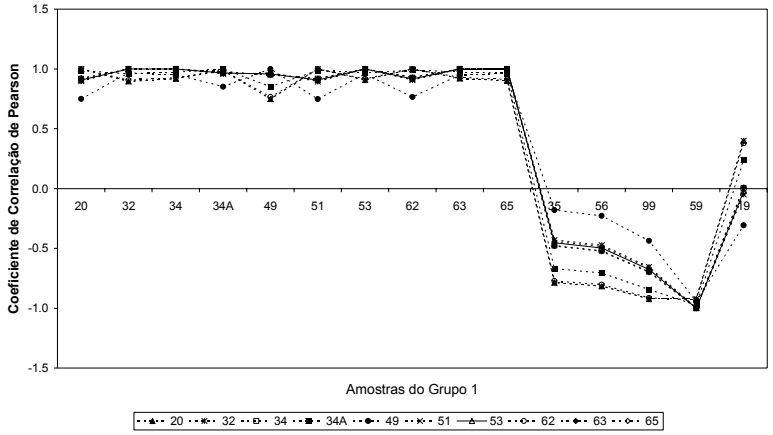

Figura 3a - Padrão de correlação dos pontos do Grupo 1.

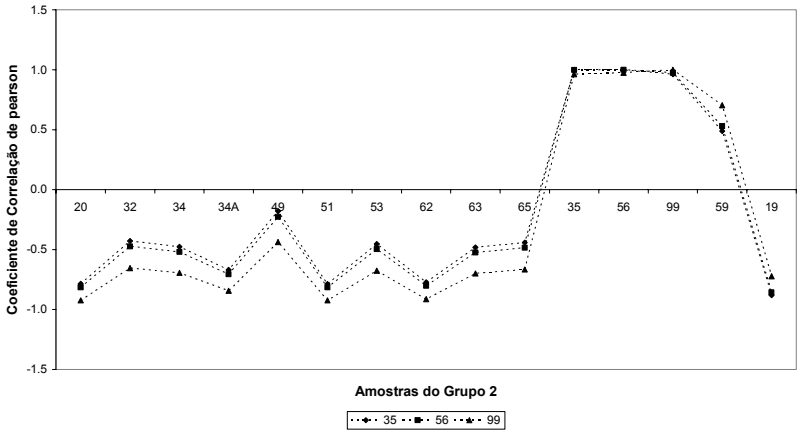

Figura 3b - Padrão de correlação dos pontos do Grupo 2.

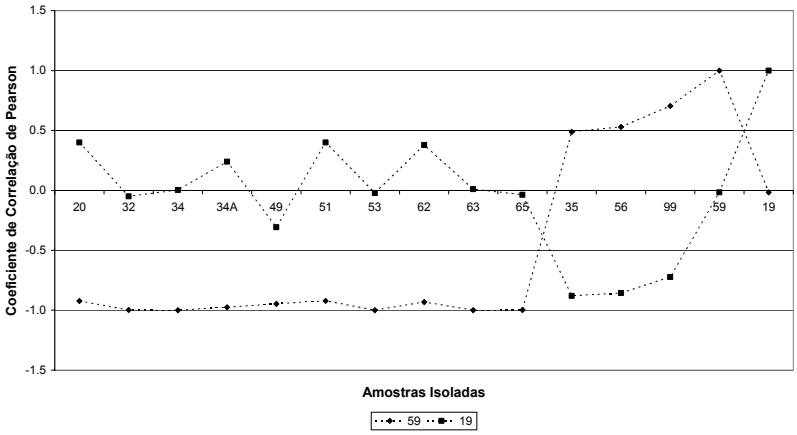

Figura 3c - Padrão de correlação dos pontos isolados.

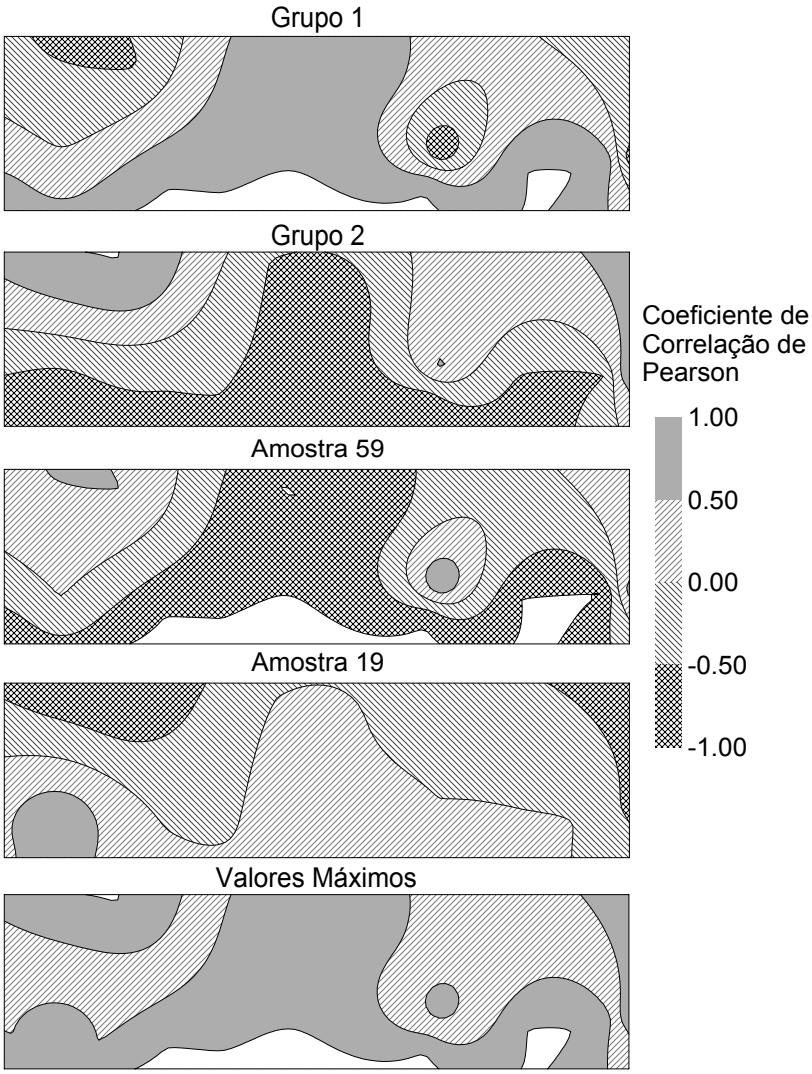

Figura 4 - Delimitação dos sectores de continuidade da variável condutividade.

Sectores de Continuidade vs Densidades de Lineamentos

A demarcação dos sectores de continuidade no interior da área estudada (Figura 4, painel inferior) sugere a presença de duas estruturas condutoras que se cruzam na parte central da mesma. Essas estruturas possuem direcção NE-SW e NW-SE, direcções que coincidem com as dos padrões da fracturação e dos lineamentos foto-interpretados (Figura 1).

No sentido de se proceder a uma análise mais detalhada da relação entre os sectores de continuidade da condutividade e a distribuição dos lineamentos, foi elaborado um mapa de densidades de lineamentos, no qual se representaram o comprimento total dos mesmos em cada metro quadrado. De seguida este mapa foi combinado com o mapa dos sectores de continuidade resultando a Figura 5.

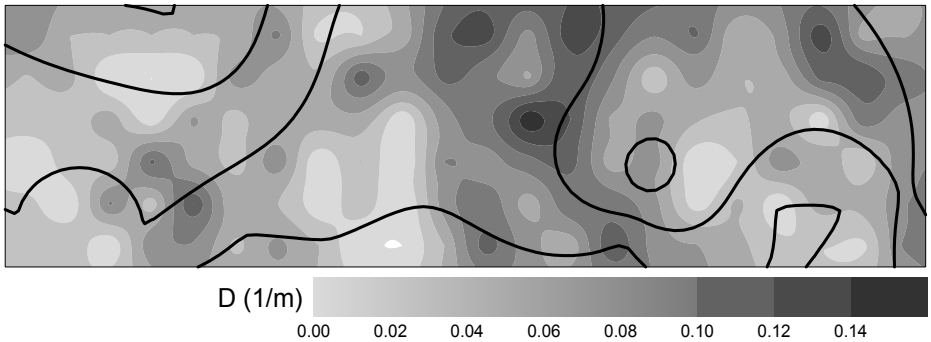

Figura 5 - Relação entre os sectores de continuidade e as densidades de lineamentos (D em metro de lineamento por metro quadrado de área).

Em 50% dos casos, as densidades dos lineamentos variam entre 0.04 m^{-1} e 0.08 m^{-1}. Não havendo uma correspondência total entre as zonas ocupadas pelos sectores de continuidade e as zonas onde a densidade dos lineamentos é maior, é notória a presença de uma zona alargada onde essas densidades são as mais elevadas (sector centro-norte da zona estudada) que grosso modo corresponde ao sector de cruzamento das estruturas definidas no mapa dos sectores de condutividade.

Cotas Piezométricas e Condutividades nos Sectores de Continuidade

A distribuição espacial dos níveis piezométricos e das condutividades da água no interior dos sectores de continuidade apresentam-se nas Figuras 6a e 6b, respectivamente.

A distribuição espacial dos níveis piezométricos é idêntica nos quatro meses analisados, variando os NHE no intervalo 680 m a 750 m. O fluxo da água subterrânea dá-se preferencialmente de SW para NE (setas sobre as manchas da Figura 6a), embora localmente

esse sentido possa ser diferente. Em particular, na zona mais a SE da área de estudo, o fluxo parece ser convergente, embora o gradiente seja reduzido (setas de comprimento reduzido), enquanto que na zona mais a SW o fluxo parece divergir em várias direcções.

A distribuição das condutividades da água, ao contrário dos níveis piezométricos, varia significativamente quando se consideram os mapas relativos aos diferentes meses da monitorização. No período considerado, a tendência geral é para o aumento das condutividades entre Julho de 2002 e Março de 2003, passando-se de um valor mediano de 78.9 μS/cm em Julho para um de 103.0 μS em Março; de Março até Abril, observou-se um ligeiro decréscimo da condutividade mediana, que em Abril se fixou nos 100 μS.

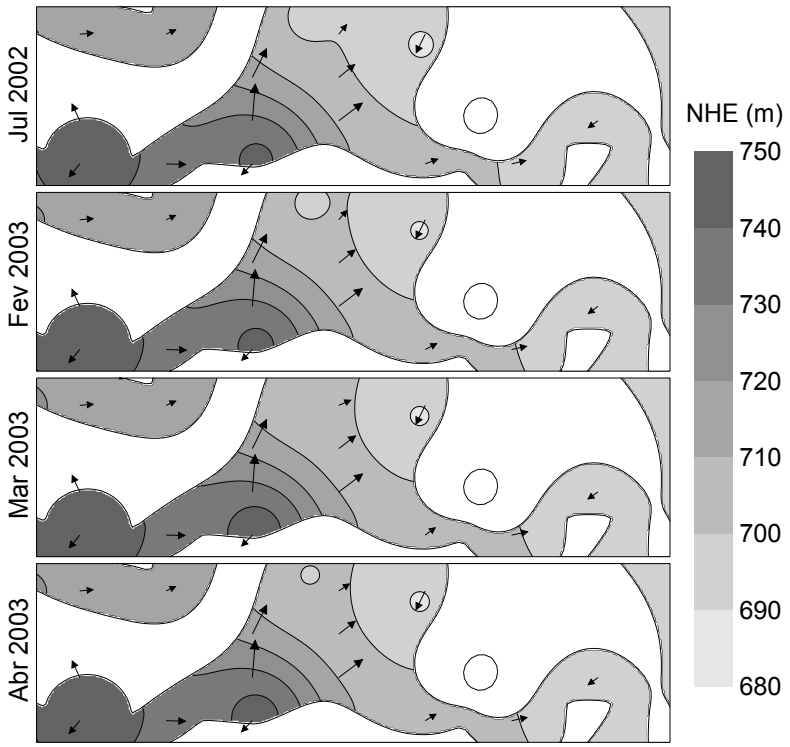

Figura 6a - Distribuição dos níveis piezométricos no interior dos sectores de continuidade.

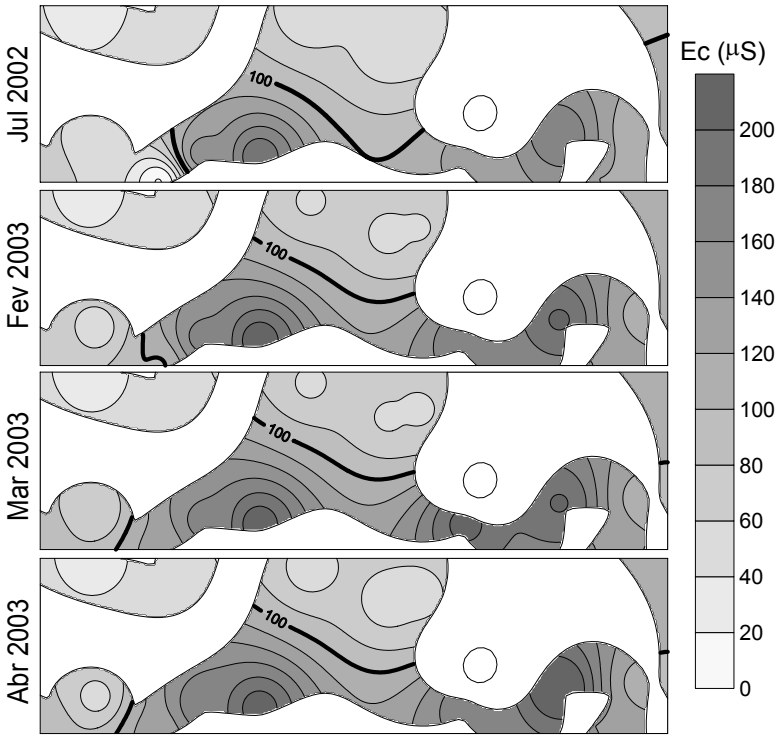

Figura 6b - Distribuição da condutividade da água no interior dos sectores de continuidade.

Devido ao aumento generalizado das condutividades, assiste-se a uma propagação centrífuga das linhas de isovalor a partir dos núcleos de maior valor, conforme se ilustra através da isolinha dos 100 S.

Valores Médios da Condutividade Hidráulica, Velocidade Linear e Porosidade Eficaz.

Os valores médios dos parâmetros condutividade hidráulica, velocidade linear e porosidade eficaz mostram-se na Figura 7.

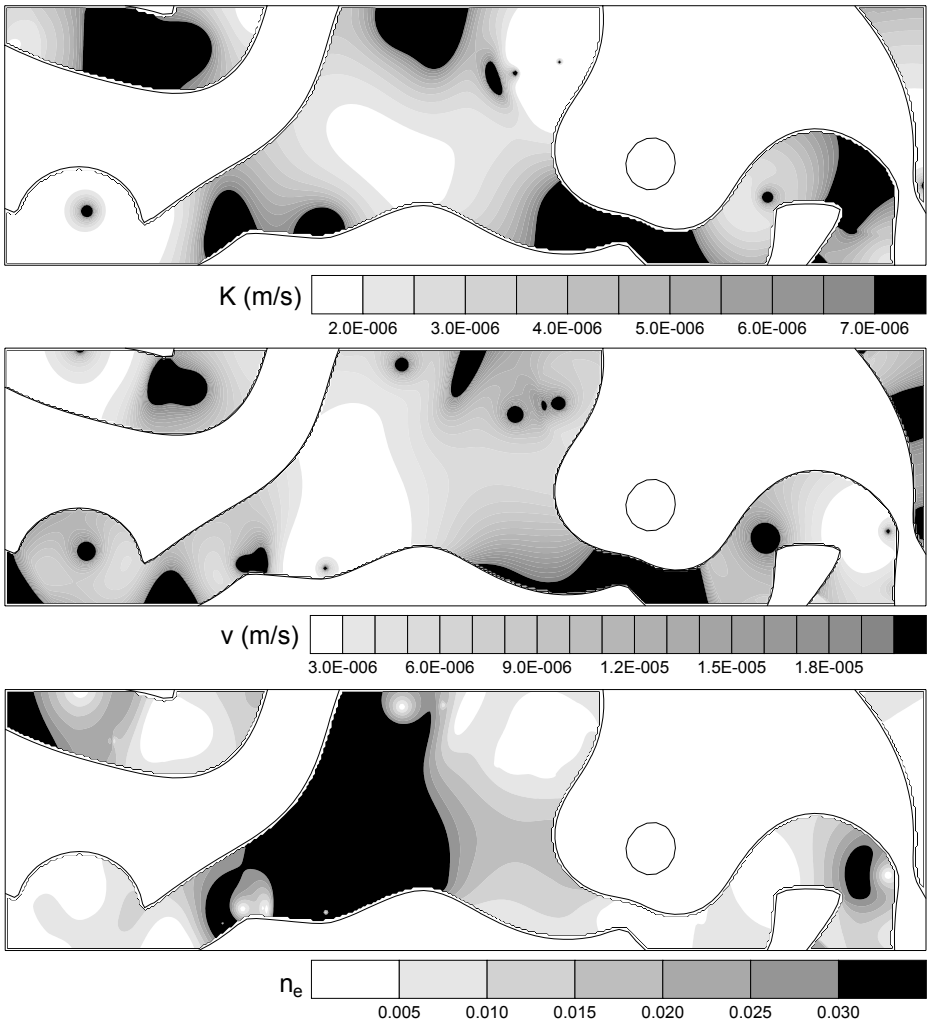

Figura 7 – Distribuição espacial da condutividade hidráulica (K), velocidade linear (v) e porosidade eficaz (n_e).

Relativamente à condutividade hidráulica, o valor mediano da distribuição que se mostra no painel superior da Figura 7 é cerca de 3.3×10^{-6} m/s, valor que pode ser considerado aceitável tratando-se de rochas cristalinas fracturadas. A sub-população correspondente ao intervalo percentile-25 a percentile-75 apresenta valores entre 2.0×10^{-6} m/s e 6.3×10^{-6} m/s, ou seja 50% da população em torno da mediana apresenta uma dispersão no valor de *K* que pouco supera um factor de 3 entre os maiores e os menores valores. Quando se considera a sub-população que representa 90% da distribuição em torno da mediana, os valores de *K* situam-se no intervalo 1.4×10^{-6}–1.3×10^{-5} m/s, ou seja, mesmo quando se considera a quase totalidade da população a diferença entre os maiores e os menores valores não atinge uma ordem de grandeza, podendo por isso considerar-se o meio relativamente homogéneo no que respeita à condutividade hidráulica.

A situação de relativa homogeneidade também se verifica quando se considera a distribuição espacial das velocidades lineares, *v*. Neste caso, o valor mediano é 6.8×10^{-6} m/s e

a sub-população relativa aos 90% da distribuição em torno da mediana compreende valores entre 1.9×10^{-6} e 2.2×10^{-5} m/s. Como seria de esperar já que $n_e < 1$ (Equação 5c), os valores de *v* são sistematicamente superiores aos valores de *K*.

Os resultados relativos à porosidade eficaz mostram-se no painel inferior da Figura 7. A mediana situa-se nos 0.01 e os 90% da população em redor desse valor apresentam valores entre 0.003 e 0.08. Os valores n_e obtidos estão de acordo com os vulgarmente encontrados na literatura referente a parâmetros hidráulicos de rochas cristalinas fracturadas. Também é esperada a relação inversa entre a velocidade linear e a porosidade eficaz (Equação 5c). Ao contrário das situações anteriores, a porosidade eficaz apresenta uma dispersão que ultrapassa claramente uma ordem entre os valores mais altos e os valores mais baixos, ou seja o meio pode ser considerado heterogéneo relativamente a este parâmetro.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi suportado pelo projecto Sapiens POCTI/CTA/40772/2001.

BIBLIOGRAFIA

DOMENICO, P.A., & SCHWARTZ, F.W. (19). *Physical and Chemical Hydrogeology.* John Wiley & Sons Inc., New York etc, 824p.

GOLDEN SOFTWARE (2002). Surfer Version 8 – Surface Mapping System. Golden, Colorado, www.goldensoftware.com.

PEREIRA, E. (1989). *Notícia explicativa da folha 10A (Celorico de Basto).* Direcção Geral de Geologia e Minas, Serviços Geológicos de Portugal.

SOUSA, M. B. (1982). *Litoestratigrafia e Estrutura do "Complexo Xisto-Grauváquico ante-Ordovícico" - Grupo do Douro (Nordeste de Portugal).* Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra.