

Estimativa de porosidades em rochas básicas a partir de diagrfias eléctricas e nucleares através de dois métodos - um estudo comparativo

R. Rocha^(a, b), E. Ramalho^(a) & A. Andrade Afonso^(a)

a - Fac. Ciências, Univ. Lisboa – Ed. C8, Campo Grande, 1700 Lisboa

b - Instituto Geológico e Mineiro, Apartado 7586, 2721-866 Amadora

RESUMO

Palavras-chave: hidrogeologia; geofísica; diagrfias.

A estimativa de parâmetros hidráulicos dos aquíferos poderá ser efectuada com o auxílio da interpretação de diagrfias. Porém, ao contrário dos métodos geofísicos de superfície, estas apenas podem ser utilizadas em furos, e, mesmo esses, por vezes não têm características que permitam uma campanha que englobe a utilização de sondas eléctricas, nucleares e da coluna de fluido. Outras vezes, o orçamento disponível para a campanha não permite a mobilização de tais meios ou a paragem da equipa de sondagens durante um período de tempo mais ou menos longo. Este trabalho pretende fazer um estudo comparativo da estimativa da diagrfia da porosidade utilizando dois métodos distintos; por um lado, recorrendo às diagrfias eléctricas (resistividades normais) quando o furo se encontra desentubado e, no caso deste se encontrar entubado, à diagrfia de Neutrões. Estes dados poderão ser úteis para modelações posteriores a partir de dados espaciais de resistividade obtidos a partir de sondagens eléctricas verticais (SEVs).

Introdução

A região onde se situa o furo em estudo tem apenas este como o único furo com dados de diagrfias disponíveis. Por outro lado, existem dados de uma SEV cujo centro geométrico é o próprio furo. Assim, foi intenção proceder-se à estimativa da diagrfia da porosidade no furo, para calibração das SEVs e possibilitar a sua extrapolação. A estimativa da porosidade a partir das diagrfias pode ser feita com o recurso a vários métodos empíricos. Na sua maior parte foram estudados para aquíferos porosos. Não é o que se passa neste caso; no entanto, tendo em conta as ferramentas disponíveis, designadamente diagrfias de Neutrões e Resistividades Normais com vários espaçamentos interelectrónicos, foram testados dois métodos empíricos, cuja aplicabilidade a este caso específico vai ser discutida. A utilização de uma sonda sónica para determinação de porosidades ou de uma sonda gama-gama, para determinação de densidades melhorariam substancialmente a qualidade dos resultados, uma vez que se poderiam utilizar outros métodos mais rigorosos.

Breve caracterização geológica e hidrogeológica da zona

Na zona em estudo (Gabros de Beja), as formações predominantes são rochas básicas gabro-dioríticas, cobrindo uma área de cerca de 350 km². Próximo da superfície, como resultado directo de clima árido e seco, ocorrem calcretos, devido à mobilização e reprecipitação de Ca²⁺ na solução (Paralta, 1998; 2001). A zona alterada varia localmente, podendo atingir espessuras de 30 metros (Pais Quina, 1983; Paralta, 1998; 2001) (figura 1), criando assim um aquífero livre, hidraulicamente homogéneo. A mancha gabro-diorítica é uma das formações mais produtivas da região quando comparada com outras rochas compactas, à excepção de sistemas cársicos. Tem transmissividades que, em algumas áreas pode atingir cerca 350 m²/dia e produz caudais que variam 1 a 15 l/s (excepcionalmente), com valores médios entre 3 e 6 l/s (Paralta, 1998; 2001). De acordo com relatórios de companhias de perfuração que operam na área, as zonas c) e d) da figura 1 parecem ser as formações aquíferas mais promissoras localizadas próximo da superfície e a zona fracturada (zona d) pode estar ausente. De acordo com os mesmos relatórios, a maior parte dos furos efectuados na zona atinge a zona fracturada. Sob a rocha-mãe impermeável, a circulação da água ocorre sobretudo por porosidade secundária. A caracterização hidroquímica destas águas indica-as com TDS que oscilam entre os 400 mg/l e os 900 mg/l (Paralta, 1998; 2001).

Metodologias utilizadas

O furo que vai ser objecto de estudo das diagrfias foi efectuado pelo Instituto Geológico e Mineiro no âmbito do Projecto do Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (ERHSA) e atingiu uma profundidade de 99.6m. Até aos 37m, o furo tinha um diâmetro de 146 mm. Entre os 37 m e os 99.6 m o diâmetro foi HQ (90 mm). Devido a esta redução de diâmetro, as diagrfias foram efectuadas em duas campanhas distintas, sempre com o furo em “open-hole” e preenchido com água nativa, após limpeza.

Efectuaram-se diagrfias de Neutrões, Radiação Gama Natural (RGN), SP, SPR, Resistividades Normais (RN) 8”, 16”, 32” e 64” em ambas as campanhas (Ramalho & Torres, 1998). As medidas com a sonda Heat Pulse

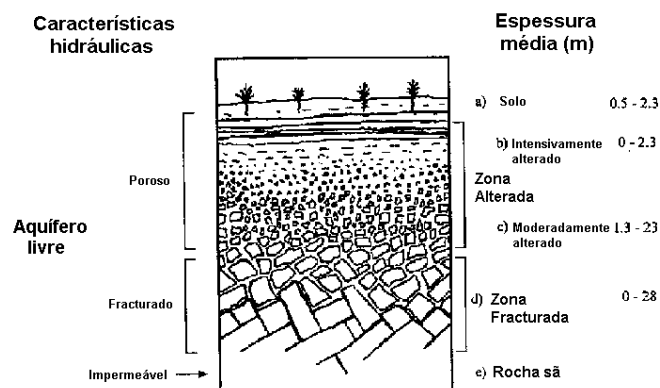


Figura 1 – Perfil típico de alteração de uma rocha gabro-diorítica e as suas características hidráulicas (Paralta, 1998; 2001), baseado em dados recolhidos a partir de várias companhias de perfuração que trabalharam na área.

Flowmeter foram realizadas a partir dos 40 m de profundidade, a cada 5 metros, com a sonda estabilizada; no entanto, devido ao reduzido diâmetro do furo, não foi utilizado o dispositivo que permite a aquisição de dados calibrados (Ramalho & Torres, 1998). Apenas se registaram medidas reprodutíveis (Ramalho & Torres, 1998). A figura 2 mostra algumas diagragias efectuadas no furo em estudo, designadamente diagragias eléctricas (RN 8” e RN 16”), Neutrões e diagragia de Fluxo. A diagragia de RGN exibiu valores muito constantes e sempre inferiores a 25 cps.

A estimativa da diagragia da porosidade foi feita a partir de dois métodos; o primeiro, a partir de diagragias eléctricas, apenas pode ser utilizado com os dados adquiridos com o furo desentubado. O segundo método utiliza os dados da sonda de neutrões, utilizável, por isso

num espectro mais largo de condições do furo.

• Estimativa da porosidade a partir da Lei de Archie

A Lei de Archie, estabelecida experimentalmente em 1942 para meios saturados, relaciona a resistividade da rocha, a porosidade, a natureza da distribuição e a resistividade do electrólito. O quociente entre a resistividade total de um nível litológico permeável, R_t e a resistividade da água da formação R_w , é uma constante adimensional (Fórmula de Archie):

$$F = \frac{R_t}{R_w} = \frac{a}{(\varphi)^m} \quad (1)$$

onde: F = factor de formação (adimensional);

R_t = resistividade volumétrica da rocha (Ohm.m);

R_w = resistividade da água de formação (Ohm.m);

φ = porosidade (%);

m = factor de cimentação (adimensional), bastante constante para dada rocha e independente do fluido. “ m ”

caracteriza a distância percorrida pela corrente eléctrica que equivale ao que se costuma designar por “tortuosidade”, que depende da forma dos poros e das interconexões entre eles, variando geralmente entre 1.3 e 2.2;

a = factor que depende da litologia e varia entre 0.6 e 2.

As relações seguintes são geralmente aceites para formações não consolidadas e arenitos (Chappelier, 1992):

$$F = 0.62\varphi^{-2.15} \text{ (fórmula de Humble)} \quad (2)$$

$$F = 0.81\varphi^{-2} \quad (3)$$

Para carbonatos e formações que estão bem cimentadas e consolidadas (Chappelier, 1992):

$$F = 1 \varphi^{-2} \quad (4)$$

Para estimativa da diagragia da porosidade através da aplicação deste método (figura 2, coluna Porosidade Archie) utilizou-se a diagragia de Resistividade Normal 64”, por ser aquela que penetra mais profundamente na rocha circundante e o valor constante de 600 $\mu\text{S/cm}$ para a condutividade da água do furo. Caso se tivesse utilizado a diagragia da condutividade do fluido, o valor desta seria o aplicado.

• Estimativa da porosidade a partir da diagragia de Neutrões (fórmula empírica para sonda Mount Sopris LLP-2676 e fonte radioactiva de 1Ci)

A partir de testes em furos de diferentes diâmetros sob condições idênticas, Baron & Chappelier (1998) calibraram os furos para um diâmetro de 3” e eliminaram os efeitos do entubamentos de PVC, devido à presença de cloretos neste material. Após a eliminação destes efeitos, os mesmos autores admitiram para a determinação da porosidade a fórmula empírica

$$\text{CPS} = 1078 \times e^{-6.08\varphi} \quad (5)$$

No presente caso, uma vez que o furo se encontra em “open-hole”, não foi necessária a utilização da correcção do entubamento de PVC. Da mesma forma, não foi utilizada a correcção do diâmetro do furo, o que implica desvios significativos na zona superior aos 37m. Apesar desta diferença de calibrações, a sonda utilizada nesta campanha é idêntica. A possível diferença de valores devido à idade distinta de ambas as sondas foi desprezada,

devido à meia vida da fonte radioactiva, de Am-Be, cerca de 400 anos. A diagrafia assim estimada encontra-se na figura 2, coluna Porosidade B&C.

A partir da diagrafia da porosidade obtida com o método de Baron & Chappellier (1998), estimou-se a diagrafia da permeabilidade (figura 2, coluna Perm Darcy) a partir da fórmula de Temples (1997) in Sopris Signals (1997), que estabelece uma relação entre a permeabilidade e a porosidade expressa pela equação (6):

$$k = 30.713 \times 10^{0.061797\phi} \quad (6)$$

onde k é a permeabilidade em miliDarcies e ϕ é a porosidade.

Discussão dos resultados

De acordo com a observação das carotes, a característica mais marcante evidenciada pelas diaggrafias realizadas, consiste no aumento mais ou menos constante da resistividade média das formações em profundidade, aumento este directamente relacionado com a diminuição da alteração (Ramalho & Torres, 1998) e de acordo com o modelo geral de alteração típico de uma rocha gabro-diorítica referido por Paralta (1998; 2001) para o aquífero dos Gabros de Beja. De acordo com a observação das diaggrafias eléctricas e de neutrões, poder-se-á admitir que a rocha sã foi atingida a cerca de 72 m de profundidade, apresentando uma posança de cerca de 9 m.

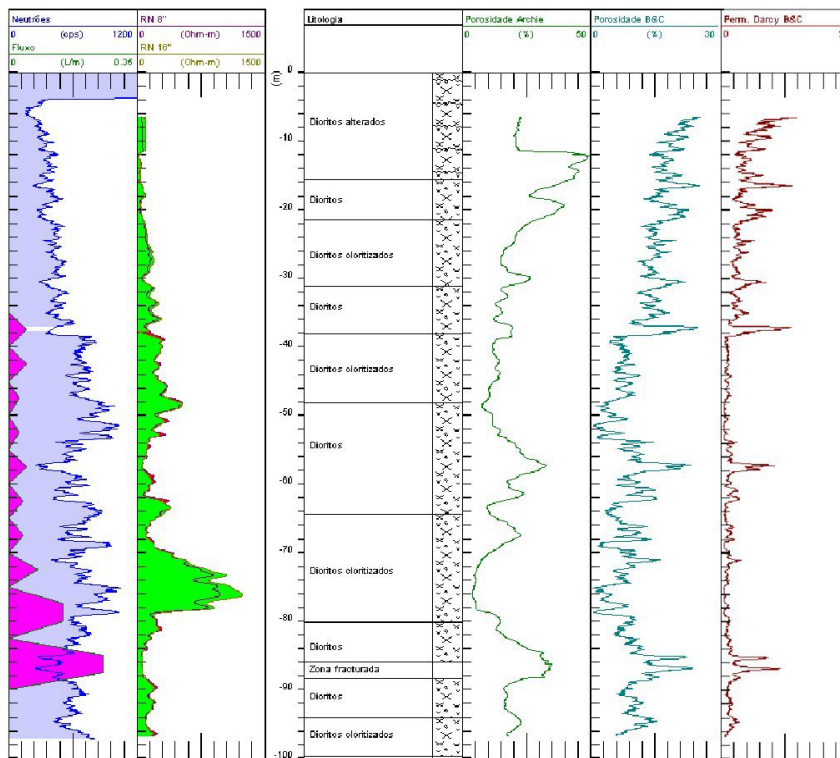


Figura 2 – Algumas diaggrafias efectuadas no furo em estudo: diaggrafias eléctricas (RN8'' e RN 16''), Neutrões e diagrafia de Fluxo. Diagrafias da porosidade a partir da aplicação da equação (1) (Porosidade Archie) e equação (5) (Porosidade B&C). Diagrafia da permeabilidade determinada a partir da aplicação da equação (6) à diagrafia da porosidade determinada por Baron & Chappellier (1998) (Perm Darcy).

Da observação global do conjunto de diaggrafias efectuadas, parece, pois salientar-se a existência de duas zonas distintas, eventualmente com diferente comportamento hidráulico, separadas pela zona impermeável de dioritos sãos dos 70 aos 79 metros. Uma primeira zona, que de acordo com o esquema de Paralta (1998; 2001), corresponderá a um aquífero livre, caracterizada pelo ligeiro aumento constante dos valores registados da diagrafia de Neutrões conjugados com a ligeira, porém também constante subida dos valores de resistividade ao longo dos primeiros 60 metros da diagrafia. Nesta zona verifica-se pois, como seria de esperar, uma porosidade decrescente com a profundidade, visível pela aplicação de ambos os métodos. As espessuras

médias para a zona de alteração estão igualmente de acordo com as espessuras mencionadas por Paralta (1998; 2001). No entanto, a zona muito alterada, constituída por argilas residuais de alteração dos dioritos, por vezes com algumas zonas de impregnações margosas ou calcárias, sobretudo na parte superior, parece identificar-se na série de diaggrafias eléctricas até cerca dos 12 m.

A diagrafia de Neutrões, efectuada desde o início do furo, apresenta na zona muito alterada mais superficial descrita por Paralta (1998; 2001), constituída por argilas residuais de alteração dos dioritos, por vezes com algumas impregnações margosas ou mesmo calcárias, algumas características que a permitem distinguir da camada subsequente, menos alterada, geralmente com fracturas preenchidas por produtos argilosos e pouco permeável (Partal, 1998;2001), nomeadamente o aumento nítido do número de contagens por segundo registados a partir dos 6.7m. No entanto, e uma vez que as diaggrafias eléctricas só foram registadas a partir dos 6.5 m, não é possível determinar algum contraste visível entre estas duas camadas de alteração. Na segunda zona, localizada sob a formação diorítica com características sãs, detecta-se a presença de fracturas, onde parece existir circulação de água. Esta hipótese baseia-se na observação simultânea da diminuição das RN registadas, em especial diagrafia RN 8'', na regularidade da diagrafia de RGN (com valores sempre inferiores a 25 CPS), e ainda nos picos negativos irregulares da diagrafia de Neutrões, que indicam a existência de fracturas. A partir ainda da observação

conjunta das diagrfias de Neutrões, Fluxo e SPR da figura 2 conclui-se da existência de uma zona falhada aos 85 m (que inclusivé ofereceu resistência aquando da passagem da sonda polieléctrica), que se prolonga até aos 88m onde, sem dúvida, ocorre circulação de água. Outras zonas potencialmente fracturadas situam-se entre os 31 e os 33 metros 51, 52.5, 53 metros e outras, que aparentam ser mais pronunciadas, aos 58, 63 e 65 m.

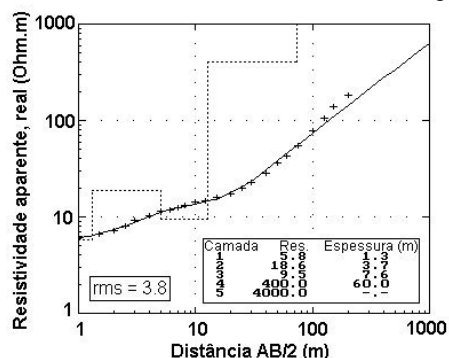


Figura 3 – Modelação para 5 camadas da SEV cujo centro geométrico é o furo em estudo.

neste caso específico, os dioritos, o que elevou consideravelmente os valores de CPS obtidos por Baron & Chapellier (1998). Este facto afecta os resultados, na medida em que a correcção implicaria uma diminuição dos CPS (aumento da porosidade). Como facilmente se verifica, se os valores fossem afectados de correcção, os valores de porosidade aumentariam, aproximando-se dos valores obtidos pela Lei de Archie. Além disso, os valores de porosidade obtidos pela equação empírica de Baron & Chapellier (1998), apresentam uma menor amplitude (maior nos primeiros 37 m) em relação aos valores obtidos pela equação de Archie, mas com um comportamento semelhante ao longo do furo, isto é, valores mais elevados nas zonas mais alteradas e menores valores nas zonas de rochas menos alteradas. Em relação à permeabilidade, pode dizer-se que esta atinge os menores valores quando a resistividade é maior, atingindo os valores mais elevados em zonas mais porosas e fracturadas, sendo consistentes com valores referentes a rochas ígneas fracturadas.

Os resultados de uma SEV cujo centro geométrico é o próprio furo ($AB/2_{máx.}=250m$) podem ser correlacionados com as diagrfias efectuadas e estimadas da figura 2, dando origem a um modelo de várias camadas (Tabela 1), cujos valores podem ser relacionados com a figura 1.

Tabela 1 - Modelo de várias camadas a partir dos dados da modelação da SEV e das diagrfias efectuadas e estimadas da figura 2, correlacionando com os dados da figura 1.

Prof. (m)	Camada correspondente na fig. 1	Resistividade aparente média (Ohm.m)	Porosidade média (%)	Permeabilidade de Darcy
0 – 12	a,b	20	20	0.53
12 – 22	c	70	18	0.40
22 – 53	d	340	10	0.13
53 – 70	Zona fracturada	230	15	0.26
70 – 79	e	1300	6	0.07
79 – 86	Zona fracturada	75	18	0.40
86 – 96	e	150	10	0.13

Considerando esta zona hidraulicamente homogénea, os dados obtidos neste ponto poderão ser cautelosamente extrapolados, uma vez que foram efectuadas cerca de 50 SEVs nesta área.

Bibliografia

- Baron, L. & Chappelier, D. (1998) – Nuclear well logging in soils calibration of slim hole nuclear tools gamma-gamma and neutron-thermal neutron. *Proceedings IV Meeting Environmental and Engineering Geophysical Society (E S)*, Barcelona: 275-278.
- Chappelier, D. (1992) – Well logging in hydrogeology. *A. A. Balkema Publishers*, 175 p.
- Paralta, E. (1998) - Caracterização hidrogeológica da zona da Ribeira da Chaminé (aquífero dos Gabros de Beja) – Resultados preliminares. *IV Congresso da Água*.
- Paralta, E. (2001) – Hidrogeologia e Modelação Estocástica da Contaminação por Nitratos do Aquífero Gabro-diorítico da Região de Beja. *Tese Mestrado em Georrecursos*, IST: 157 p.
- Quina, P. (1983) - Pesquisas e captações em gabro-dioritos. *Seminário sobre Hidrogeologia rochas compactas fissuradas*, APRH, Lisboa.
- Ramalho, E. C. & Torres, L. (1998) – Relatório das diagrfias efectuadas na sondagem SDH-1 Beja. *Relatório interno Instituto Geológico Mineiro âmbito Projecto ERHSA*: 10 p.
- Rocha, R. (2001) - Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Área dos Barros de Beja; Parâmetros Hidrogeofísicos. *Tese Mestrado*, Univ. Lisboa, 134 p.
- Sopris Signals (1997) – Estimate Hydrogeologic Parameters with MGXII Loggers, 3(1): 1-3.