

ESTUDO DO EFEITO DE MARÉ EM AQUÍFEROS COSTEIROS: O CASO DE ESTUDO DA ILHA DO PICO (AÇORES - PORTUGAL)

José V. CRUZ¹; Manuel O. SILVA²

RESUMO

No intuito de determinar a difusividade hidráulica efectuaram-se 17 ensaios de maré nos aquíferos costeiros basálticos do Pico, a segunda maior ilha do arquipélago dos Açores. Complementaram-se estes dados mediante a reinterpretação de ensaios de bombeamento e observações de maré publicadas anteriormente.

Testaram-se dois modelos, um respeitante aos aquíferos confinados, aplicável também a aquíferos livres quando se observam algumas condições, e aos aquíferos semi-confinados. Os resultados obtidos são extremamente variáveis, demonstrando a heterogeneidade dos aquíferos vulcânicos. O primeiro modelo adoptado permitiu estimar uma difusividade hidráulica média de 6875.10 m²/min, com um desvio padrão igual a 8012.95 m²/min, enquanto os valores calculados pela formulação de aquíferos semi-confinados são mais baixos, e respectivamente iguais a 2284.69 m²/min e 3767.46 m²/min.

Observa-se em qualquer dos casos considerados uma relação linear bem marcada entre o valor da difusividade hidráulica e a distância dos pontos de água à linha de costa. Tal facto expressa a influência crescente da rede de fracturas sobre a propagação das ondas sinusoidais nos aquíferos, ou poderá sugerir a inadequabilidade do modelo adoptado. No entanto, em alguns casos esta última hipótese carece de fundamento.

Em pontos de água onde existiam valores de difusividade e transmissividade foi possível estimar o coeficiente de armazenamento. A maioria dos resultados aponta para coeficientes de armazenamento extremamente baixos, compatíveis com os valores comuns em meios fracturados, o que aliás se aproxima das condicionantes geológicas dos aquíferos basálticos em estudo.

Palavras-chave: Aquíferos costeiros; ensaios de maré; difusividade hidráulica.

1 - INTRODUÇÃO

¹ Geólogo; Assistente do Departamento de Geociências da Universidade dos Açores, Ponta Delgada, Portugal.

² Geólogo; Prof. Catedrático do Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

A ilha do Pico pertence ao grupo central do arquipélago dos Açores, e localiza-se entre os 38°22'54"N e 38°33'41"N de latitude e 28°01'44"W a 28°32'37"W de longitude (Figura 1). Com 447 Km² de área esta ilha de origem vulcânica é a segunda maior daquele arquipélago embora, no entanto, conte apenas com aproximadamente 15000 habitantes.

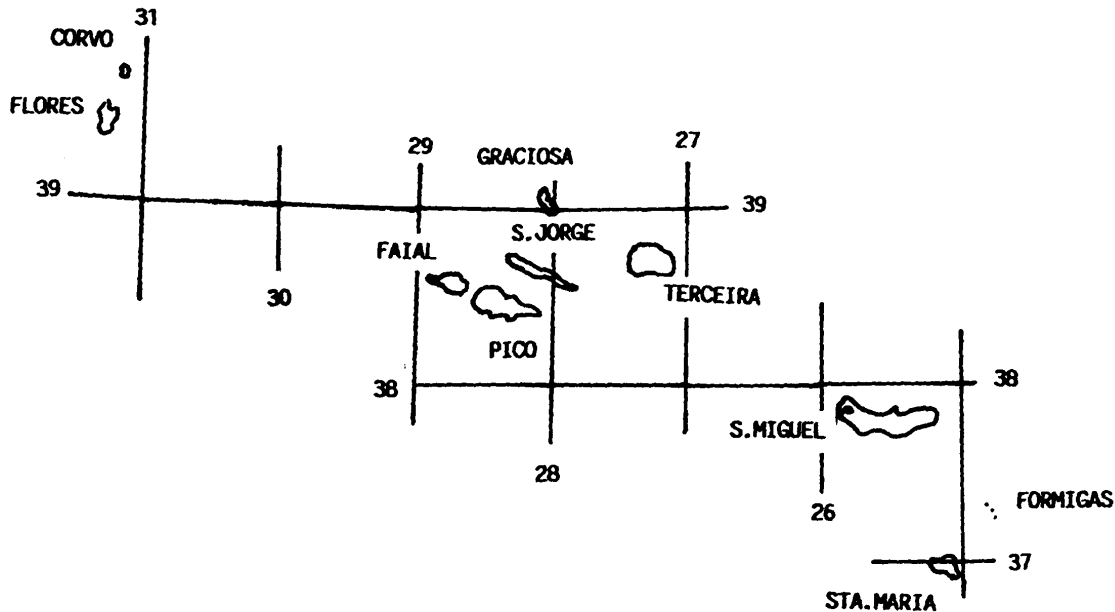


Figura 1 - Localização geográfica da ilha do Pico (Açores).

Geologicamente a ilha do Pico é a mais recente dos Açores, com menos de 300000 anos de idade. A história vulcânica caracteriza-se pelo predomínio de erupções efusivas, que originaram um grande volume de escoadas lávicas basálticas *s.l.*, significativamente maior que o respeitante aos piroclastos resultantes de fenómenos de maior explosividade.

O estratovulcão da Montanha do Pico, com 2351 m de altitude, domina o sector ocidental da ilha, e as suas formações mais recentes apresentam uma permeabilidade superficial extremamente elevada, o que se traduz por uma densidade de drenagem nula ou extremamente reduzida. Desta forma, são de esperar taxas de infiltração elevadas, possivelmente análogas ou superiores ao valor de 82% determinado em formações similares da metade ocidental da ilha.

Neste último sector, desenvolve-se ao longo de cerca de 27 Km um sistema vulcânico fissural, materializado por alinhamentos de orientação WNW-ESE e W-E de cones estrombolianos e fissuras eruptivas, onde ocorreram erupções de idades variadas.

A caracterização hidrogeológica da ilha do Pico é fortemente limitada pela distribuição dos pontos de água, na sua grande maioria disseminados na faixa litoral, o que resulta de constrangimentos técnicos e económicos relacionados com a perfuração de furos de captação a maiores cotas. O número de nascentes em altitude é muito baixo e, invariavelmente, estas apresentam caudais extremamente baixos.

Na maioria dos pontos de água litorais observam-se efeitos de maré, resultantes da influência das marés oceânicas. Neste contexto, e no âmbito dum estudo hidrogeológico aprofundado da ilha do Pico (CRUZ, 1997), investigaram-se os processos decorrentes de tal fenómeno, com o intuito final de caracterizar o funcionamento hidrodinâmico dos aquíferos.

2 - GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

A escala vulcanoestratigráfica simplificada da ilha do Pico considera três unidades principais que, da mais antiga à mais recente, são o Complexo Vulcânico do Topo, o Sistema Vulcânico Fissural e o Complexo Vulcânico da Montanha do Pico. As erupções vulcânicas mais recentes ocorreram após o povoamento iniciado no século XV, nomeadamente na Prainha (1562/64), Em Santa Luzia e São João (1718) e na Silveira (1720; Fig. 2).

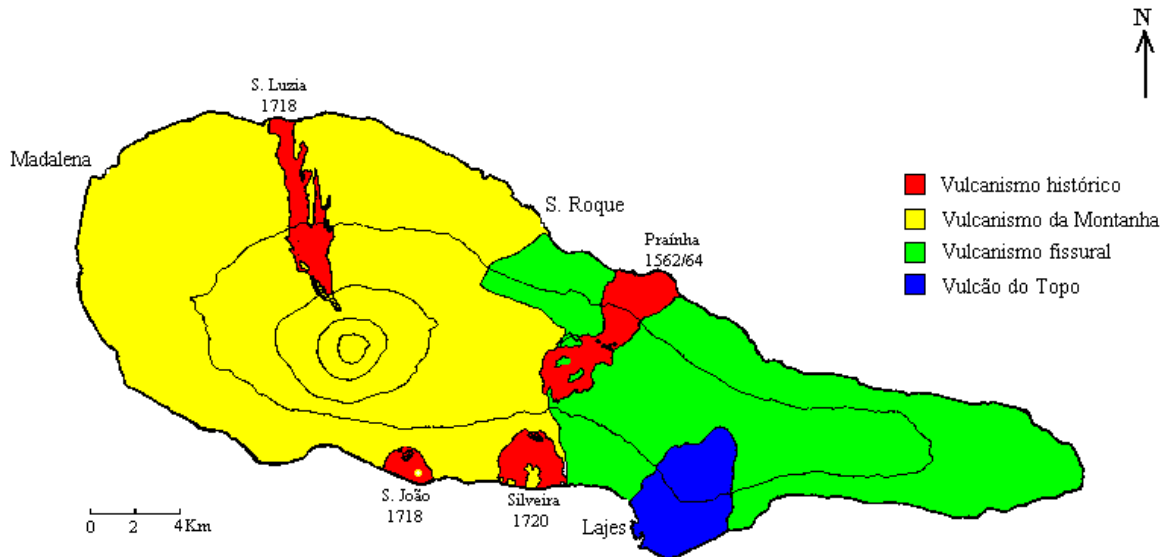


Figura 2 - Esquema vulcanológico simplificado da ilha do Pico

A história vulcânica foi essencialmente marcada por erupções efusivas, observando-se um grande volume de escoadas lávicas basálticas *s.l.* afíricas e porfíricas, sendo comuns os termos ankaramíticos, e uma significativamente menor proporção de piroclastos. O predomínio do vulcanismo efusivo originou extensos campos de lavas *pahoehoe*, que afloram em grandes áreas das vertentes da Montanha.

O Complexo Vulcânico do Topo, localizado na costa S da ilha, na região das Lajes e do Topo, corresponde ao mais antigo aparelho vulcânico da ilha (WOODHALL, 1974; CHOVELON, 1980). A sequência subaérea tem cerca de 600 m de espessura e é constituída por uma alternância de escoadas lávicas e níveis piroclásticos pouco espessos. O sector colapsado do vulcão do Topo está parcialmente preenchido por materiais lávicos emitidos pelo sistema fissural, desenvolvido no sector oriental da ilha.

O Sistema Vulcânico Fissural é materializado por alinhamentos de numerosos cones de escórias, de *spatter* e fissuras eruptivas, com a orientação WNW-ESE e W-E, que se desenvolvem numa extensão aproximada de cerca de 27 Km definindo uma aplanação com a altitude média de 800 m e que desce em patamares para a extremidade oriental da ilha (CHOVELON, 1980).

A Montanha do Pico corresponde a um estratovulcão que domina a metade ocidental da ilha. O imponente cone deste vulcão composto, com 2351 m de altitude e 16 Km de largura máxima ao nível do mar, teve uma edificação faseada, por intermédio de erupções no troço terminal da Montanha e em cones estrombolianos adventícios e fissuras radiais, disseminados

nas suas vertentes (MACHADO, 1956; ZBYSZEWSKI *et al.*, 1962; FORJAZ, 1977, CRUZ *et al.*, 1995; NUNES *et al.*, 1977).

A determinação do volume de lavas emitido nas quatro erupções históricas da ilha do Pico permitiu estimar uma taxa de produção aproximada de 0.0004 Km³/ano. Considerando o volume subaéreo da Montanha pode ser extrapolado um período máximo de 75000 a 240000 anos para a edificação do troço emerso deste estratovulcão (CRUZ *et al.*, 1995). Estes valores são compatíveis com o facto do Pico ser a ilha mais recente do arquipélago, como pode ser inferido pelas datações isotópicas efectuadas, e que indicam idades de 1000 a 2000 anos e 300000 anos.

A escorrência superficial é no geral pouco desenvolvida, o que se reflecte na baixa densidade de drenagem e hierarquização da rede, o que é particularmente notório nos locais onde afloram as escoadas lávicas mais recentes onde a drenagem é nula.

Estas características indicam que a permeabilidade superficial é extremamente elevada, salientando a importância da recarga dos aquíferos. Numa área da aplanagem oriental foi, aliás, possível estimar pelo balanço de cloretos, uma taxa de infiltração de 50.7% do total da precipitação, valor que sobe para 82% quando as rochas aflorantes são escoadas lávicas, o que permite supor que na Montanha as taxas apresentem valores semelhantes (CRUZ, 1997).

Uma das principais características do comportamento hidrodinâmico das formações aquíferas da ilha é a heterogeneidade, expressa pela grande variabilidade dos parâmetros hidrodinâmicos. Um exemplo deste carácter corresponde à transmissividade dos aquíferos, cujos valores variam entre 816 e 26352. A transmissividade média é igual a , com um desvio padrão de .

O modelo conceptual de fluxo na área da Montanha pressupõe a existência duma diferença na permeabilidade das formações vulcânicas, que justifique a consideração de duas camadas distintas, a superior relacionada com as formações mais recentes do estratovulcão e, subjacente, as formações mais antigas, de menor permeabilidade, recarregadas por uma importante componente de fluxo vertical e cuja descarga será feita em exurgências submarinas.

Os cones estrombolianos disseminados nas vertentes da Montanha, e frequentemente dispostos ao longo de fissuras radiais, funcionam como elementos drenantes do sistema, favorecendo localmente a homogeneização do comportamento hidráulico dos aquíferos e a drenagem profunda. A importância destas linhas de fluxo preferenciais é especialmente significativa na metade E da ilha, onde as fracturas primárias e secundárias associadas ao eixo fissural.

Na franja litoral define-se um aquíferos basal, constituído por formações vulcânicas muito recentes e permeáveis, em que a elevação do nível de água em relação ao nível médio do mar é extremamente baixa. É nos pontos de água instalados neste aquífero que se observam os efeitos da influência das marés oceânicas, que é o objecto de estudo do presente trabalho.

3 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A determinação da difusividade hidráulica dos aquíferos pode ser realizada mediante o estudo das variações sinusoidais dos níveis freático ou piezométrico resultantes da influência das marés oceânicas.

Este fenómeno afecta um maior volume do aquífero do que o interessado por outras técnicas, o que permite atenuar as heterogeneidades dos aquíferos (ALMEIDA, 1985; SILVA, 1988). Desta forma, a caracterização hidráulica mediante a análise do efeito de maré possibilita uma abordagem homogénea ao nível do aquífero (JOIN *et al.*, 1988), o que é particularmente

relevante em aquíferos fracturados, como as formações basálticas do Pico, pois permite obviar ao acréscimo de heterogeneidade do meio que acompanha o aumento da escala de observação.

O menor custo inerente à realização de ensaios de maré, quando comparado com os intrínsecos aos ensaios de maré é outra vantagem a salientar (SILVA, 1988; JOIN *et al.*, 1988), fornecendo dados úteis á interpretação dos segundos.

Por outro lado, e em contrapartida, a identificação de fenómenos localizados é dificultada, pelo que eventuais valores de difusividade com significado circunscrito podem ficar camuflados (SILVA, 1988).

Outra especificidade do estudo do efeito de maré deriva de meras questões operacionais, mas bastante relevantes em ilhas vulcânicas. Com efeito, a uma escala necessariamente global, a localização dos furos de captação no litoral dessas ilhas, m resultado das suas características morfológicas, acentua a importância desta abordagem (JOIN *et al.*, 1988).

A distribuição mais densa dos pontos de água na zona litoral da ilha do Pico, bem como o facto da maioria dos furos de captação apresentarem efeito de maré permitem paralelizar as condições locais com as de outras ilhas vulcânicas.

Deve-se a BOUSSINESQ (1877, *in* SILVA, 1984) o primeiro estudo sobre a propagação de ondas piezométricas sinusoidais em resposta ao estímulo proporcionado por uma variação harmónica do nível do mar, embora este autor não tenha proposto qualquer aplicação prática.

Posteriormente variados autores derivaram equações que permitem determinar parâmetros hidrodinâmicos a partir da análise do efeito de maré (JACOB, 1950; FERRIS, 1951 *in* TODD, 1980; WERNER e NOREN, 1951; GREGG, 1966 *in* TODD, 1980; DE CAZENOVE, 1971 *in* SILVA, 1984; VAN DER KAMP, 1973 *in* ALMEIDA, 1985).

A equação que nos permite calcular a difusividade hidráulica a partir da amplitude do sinal é dada por:

$$D = \frac{x^2 \cdot \pi}{t_0 \cdot \ln^2(h / h_0)}$$

em que:

D - difusividade hidráulica

x - distância ao litoral

π - constante

t_0 - período da maré

h - semi-amplitude da oscilação no piezómetro

h_0 - semi-amplitude da maré

A partir do atraso, que é o intervalo de tempo entre a ocorrência de um máximo ou mínimo de maré oceânica e o sinal homólogo do nível piezométrico, também pode ser calculada a difusividade hidráulica pela expressão

$$D = \frac{x^2 \cdot t_0}{4 \cdot \pi \cdot t_L^2}$$

em que:

t_L - atraso

Estas expressões formuladas para aquíferos confinados são válidas para estudar o efeito de maré em aquíferos livres, quando as flutuações do nível freático são pequenas quando comparadas com a espessura saturada (TODD, 1980; ERSKINE, 1991 *in* FETTER, 1994).

Em aquíferos semi-confinados as expressões matemáticas que permitem calcular a difusividade e o parâmetro ρ são as seguintes:

$$D = \frac{x^2}{2 \cdot t_L \cdot |\ln(h/h_0)|}$$

$$\rho = \sqrt{t_0 |\ln(h/h_0)| / 2\pi t_L}$$

em que:

ρ - parâmetro caracterizando a intensidade da drenância.

As referências bibliográficas portuguesas sobre o tema são escassas e reportam-se quase exclusivamente ao estudo de aquíferos costeiros do Algarve, quer porosos (SILVA, 1984), quer aquíferos carbonatados semi-confinados (RAZACK et al., 1980; ALMEIDA E SILVA, 1983; ALMEIDA, 1985; SILVA, 1988).

As primeiras referências ao efeito de maré nas captações tubulares do Pico foram efectuadas por PARADELA (1974; 1980), mas o autor não procedeu à quantificação da difusividade, limitando-se a indicar as amplitudes de variação observadas no mar e nos furos.

4 - APLICAÇÕES

Aproveitando as condicionantes locais efectuaram-se 17 ensaios para analisar o efeito de maré nos aquíferos costeiros da ilha do Pico, em furos e poços de maré instalados a distâncias variáveis da linha de costa. Os referidos ensaios de maré foram manuais, com leituras de nível espaçadas de 15 minutos, ou de registo contínuo, o que implicou a utilização de limnígrafos quando os pontos de observação o permitiam (Fig. 3). Um exemplo dos registos obtidos pode ser observados na figura 4.

A reinterpretção das amplitudes de maré oceânicas e das oscilações correspondentes nos aquíferos indicadas por PARADELA (1974; 1980), bem como a análise de dados de ensaios de bombeamento em alguns furos, permitiram igualmente calcular a difusividade hidráulica. Neste último caso assume-se que a oscilação do nível no furo após o estabelecimento do equilíbrio é independente do mesmo estar em bombeamento, tal como foi observado nas ilhas Canárias (CUSTÓDIO, 1978).

Os resultados obtidos considerando a formulação aplicável a aquíferos confinados, bem como a aquíferos livres nas condições já explanadas (TODD, 1980), estão patentes no Quadro 1.

Da observação da referida tabela imediatamente se constata a grande variação dos valores da difusividade hidráulica, embora este último pareça sobreavaliado, o que se depreende da baixa salinidade da água extraída nesse furo, incompatível com aquele resultado. Ignorando este último valor determinou-se um valor médio de 6875.10 m²/min, para um desvio padrão de 8012.95 m²/min. Considerando, unicamente, os pontos de observação do sector W da ilha, que captam nas formações da Montanha do Pico, verifica-se que o valor médio e o desvio padrão são ligeiramente mais elevados, sendo iguais, respectivamente, a 7189.55 m²/min e 8388.35 m²/min.

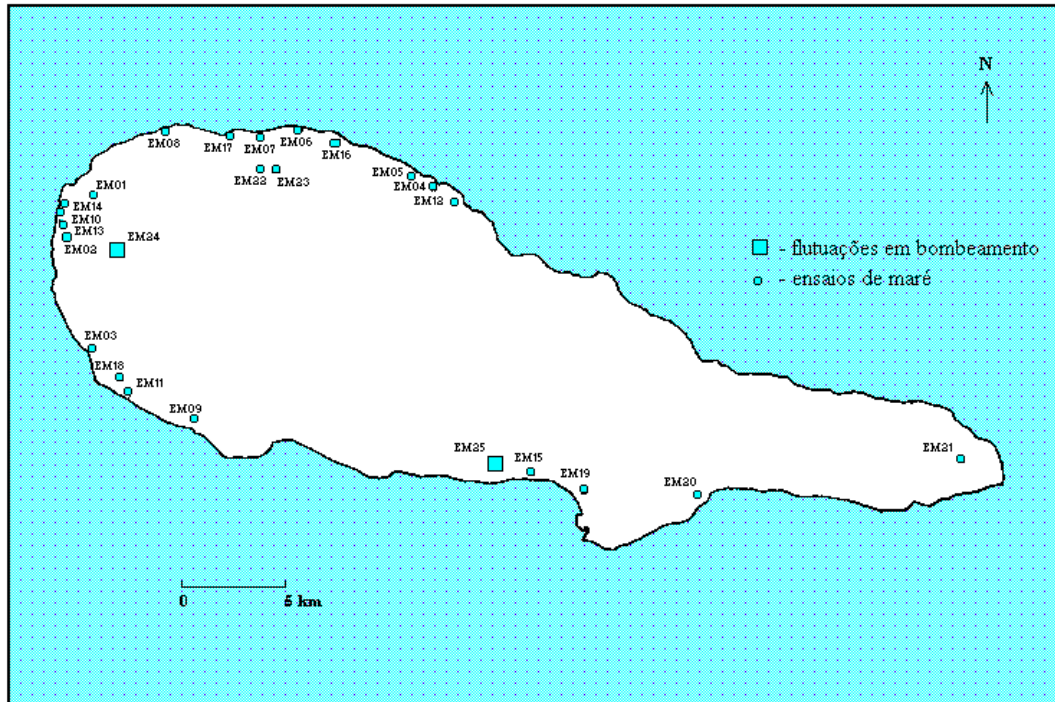


Figura 3 - Localização dos ensaios de maré efectuados.

P.M. Arcos

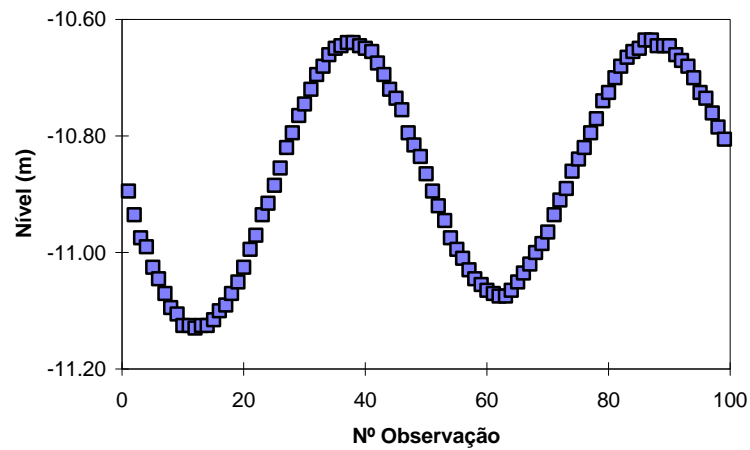


Figura 4 - Ensaio de maré no poço de maré dos Arcos (Pico)

Os resultados obtidos a partir da amplitude das flutuações são em geral superiores aos obtidos a partir do atraso do sinal, embora geralmente dentro da mesma ordem de grandeza. Em muitos dos ensaios as diferenças não ultrapassam o dobro e unicamente nos casos dos registos EM14, EM16 e EM05 esta margem de erro é ultrapassada.

Quadro 1

Resultados do cálculo da difusividade hidráulica usando o modelo de aquífero confinado.

Ref ^a	h (m)	h0 (m)	D (amplitude) (m ² /min)	D (atraso) (m ² /min)
EM01	0.240	0.400	19540.80	8475.32
EM02	0.390	0.600	15466.23	6465.47
EM03	0.260	0.550	10.85	12.73
EM04	0.472	0.600	735.00	182.47
EM05	0.415	0.450	255.76	17.32
EM06	0.245	0.350	119.33	75.98
EM07	0.146	0.200	272.49	87.10
EM08	0.181	0.200	3667.13	415.41
EM09	0.268	0.350	9947.50	4921.4
EM10	0.290	0.450	1651.98	914.99
EM11	0.180	0.350	34.33	47.64
EM12	0.320	0.400	846.89	149.37
EM13	0.240	0.400	2585.64	756.19
EM14	0.430	0.480	5445.29	176.21
EM15	0.015	0.275	1.25	4.11
EM16	0.256	0.275	12854.78	714.76
EM17	0.213	0.350	42.72	36.18
EM18	0.265	0.350	16841.00	-----
EM19	0.425	0.575	4153.50	-----
EM20	0.075	0.505	122.47	-----
EM21	0.170	0.420	9745.94	-----
EM22	0.200	0.250	259358.82	-----
EM23	0.100	0.205	28770.08	-----
EM24	0.240	0.350	14515.41	-----
EM25	0.050	0.500	17376.14	-----

A distribuição de frequências absolutas dos valores da difusividade calculados mostra um padrão assimétrico, com uma classe modal correspondente aos resultados entre 0 e 5000 m²/min. A aplicação do teste de Kolgomorov-Smirnov permite demonstrar que os dados experimentais se ajustam a uma lei de distribuição log-normal a um nível de significância α igual a 0.05.

A observação do gráfico que projecta a semi-amplitude de onda do nível de água no aquífero, em função da semi-amplitude de oscilação da maré oceânica, sugere a existência duma relação linear positiva entre ambas as variáveis, embora o valor do coeficiente de correlação linear seja mediano ($r=0.56$).

O aumento da difusividade hidráulica verificado nos pontos de água mais distantes da linha de costa é demonstrado pela relação linear entre o logaritmo daquele parâmetro hidrodinâmico e a distância dos pontos de água ao mar (Fig. 5). O coeficiente de correlação entre as variáveis projectadas na referida figura é igual a 0.77.

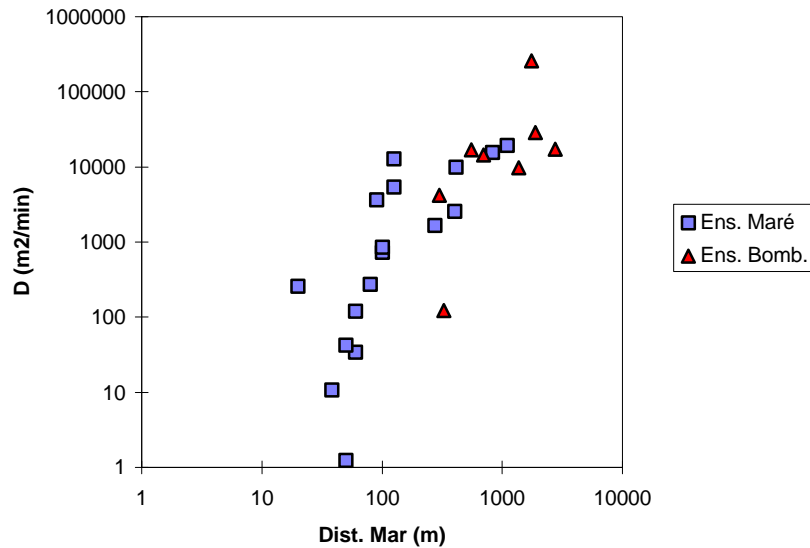


Figura 5 - Relação entre a difusividade hidráulica e a distância dos pontos de observação ao mar.

Os resultados obtidos com o modelo de aquífero semi-confinado são significativamente menores que os calculados anteriormente, embora se continue a observar a grande variabilidade nos resultados (Quadro 2). O valor médio é igual a 2284.69 m²/min, com um desvio padrão de 3767.46 m²/min.

A correlação linear positiva entre o logaritmo da distância ao mar e o logaritmo da difusividade hidráulica é ainda mais acentuada quando se analisam os resultados obtidos com esta formulação, sendo igual a 0.95 (Fig. 6).

5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A explicação para a relação entre o valor da difusividade e a distância ao litoral pode residir num aumento da permeabilidade para o interior, em resultado da crescente influência da rede de fracturas sobre a propagação das ondas sinusoidais. Outra explicação que se pode invocar prende-se com a inadequabilidade do modelo utilizado. Contudo, a semelhança de resultados obtidos com o 1º modelo, testado a partir da amplitude e do atraso, nos ensaios EM03, EM06, EM11, EM15 e EM17 permite concluir, pelo menos nestes casos, pela validade da aproximação empregue.

As difusividades obtidas na ilha do Pico são geralmente mais elevadas que as determinadas em basaltos modernos da ilha Tenerife (arquipélago das Canárias, Espanha) que variam entre 0.90 a 34.72 m²/min, com um valor médio de 6.94 m²/min (CUSTÓDIO, 1978). Os resultados indicados por JOIN *et al.* (1988), em formações vulcânicas similares da ilha da Reunião (França), iguais a 2040 m²/min e 2460 m²/min, são mais elevados e enquadram-se melhor no valor médio do Pico.

Quadro 2

Resultados do cálculo da difusividade hidráulica usando o modelo de aquífero semiconfinado.

Ref ^a	D (m ² /min)	ρ
EM01	12873.45	0.812
EM02	9999.82	0.647
EM03	11.75	1.083
EM04	365.57	0.499
EM05	66.76	0.260
EM06	95.22	0.798
EM07	154.06	0.565
EM08	1193.32	0.348
EM09	6996.83	0.839
EM10	1229.45	0.744
EM11	40.40	1.177
EM12	355.67	0.420
EM13	1398.30	0.541
EM14	986.42	0.181
EM15	2.26	1.35
EM16	3031.19	0.49
EM17	39.33	0.96

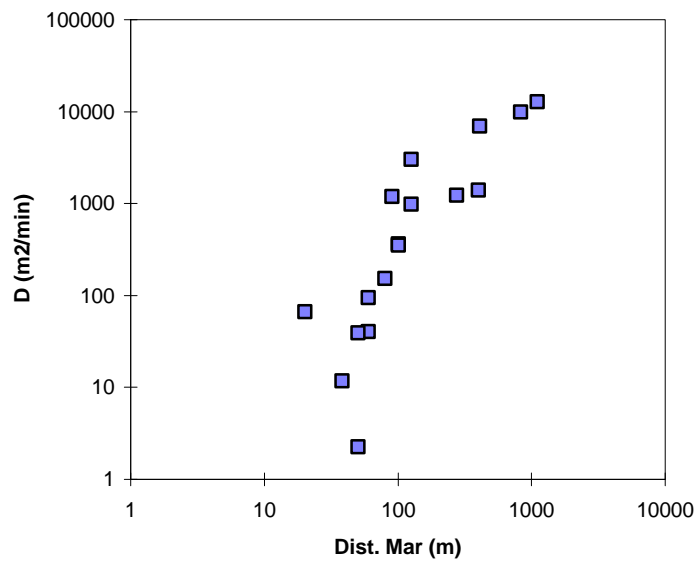


Figura 6 - Relação entre a difusividade hidráulica calculada com o modelo de aquífero semiconfinado e a distância dos pontos de observação ao mar.

Os resultados mais baixos estimados no decorrer do presente trabalho relacionam-se com escoadas lávicas *aa* maciças, possantes e pouco fracturadas, o que explicará a reduzida permeabilidade aquífera. Deste grupo fazem parte os ensaios EM03, EM15, EM11 e EM17.

Desta forma, a variabilidade dos resultados obtidos reside na própria definição da difusividade, pois este parâmetro é directamente proporcional à transmissividade, e inerentemente à permeabilidade. Assim, é realçado o carácter heterogéneo do meio aquífero vulcânico, factor que resulta primariamente da variedade dos produtos e formas resultantes dos fenómenos eruptivos.

Quando para um mesmo ponto de água se dispunha dos valores de difusividade hidráulica e de transmissividade procurou-se estimar o coeficiente de armazenamento do aquífero, para pelo menos aferir a sua ordem de grandeza. Utilizando os dados obtidos em seis pontos de água pelo 1º modelo testado neste trabalho, verifica-se que apenas um valor (0.103) aponta para valores característicos dos aquíferos livres (Quadro 3), funcionamento sugerido pela evolução dos rebaixamentos no decurso dos ensaios de bombeamento.

Quadro 3

Coeficientes de armazenamento estimados a partir da difusividade hidráulica e da transmissividade.

Ref ^o E.Maré	Ref ^o P.Água	D (amplitude) (m ² /min)	T (m ² /min)	S
EM19	F16	4153.50	12.37	2.98E-03
EM20	F17	122.47	12.59	0.103
EM21	F18	9745.94	6.66	6.83E-04
EM22	F02	259358.82	7.61	2.94E-05
EM24	F19	14515.41	18.30	1.26E-03
EM25	F11	17376.14	1.31	7.54E-05

Não obstante, alguns dos valores referidos são compatíveis com os resultados característicos de meios fissurados, em que os coeficientes de armazenamento dos blocos e fracturas são muito baixos, como por exemplo os dados apresentados por LIMA (1995) para granitóides da região do Minho e que têm ordens de grandeza de 10⁻⁵ e 10⁻⁶ respectivamente. Atendendo às condicionantes geológicas dos aquíferos basálticos em estudo, a consideração de meios fracturados parece ser, aliás, a melhor aproximação ao funcionamento daquelas formações.

SIMBOLOGIA

π - constante

ρ - parâmetro caracterizando a intensidade da drenância

D - difusividade hidráulica

h - semi-amplitude da oscilação no piezómetro

h_0 - semi-amplitude da maré

t_0 - período da maré

t_L - atraso

x - distância ao litoral

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, C.A.C. - *Hidrogeologia do Algarve Central*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Lisboa (Portugal), F.C.U.L., 1985.
- ALMEIDA, C. e SILVA, M.J.L. - “Novas Observações Sobre o Efeito de Maré em Aquíferos Costeiros do Algarve”. *Bol. Soc. Geol. Portugal*, 24, 1983, pp. 289-293.
- CHOVELON, P. - *Évolution Volcanotectonique des Iles de Faial et de Pico, Archipel des Açores - Atlantique Nord*. Thèse de Docteur 3^{ème} Cycle, Paris (França), Université Paris-Sud, Paris, 1982.
- CRUZ, J.V., NUNES, J.C., FRANÇA, Z., CARVALHO, M.R. e FORJAZ, V.H. - “Estudo Vulcanológico das Erupções Históricas da Ilha do Pico - Açores”. *Mem. Mus. Lab. Min. Geol. Fac. Ciências Porto*, 4, Dezembro 1995, pp. 985-987.
- CRUZ, J.V. - *Hidrogeologia da Ilha do Pico*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Ponta Delgada (Portugal), Univ. Açores, 1997.
- CUSTÓDIO, E. - *Geohidrologia de Terrenos e Islas Volcánicas*. Madrid (Espanha), Publ. 128, Inst. Hidrologia - Centro Estudios Hidrograficos, 1978.
- FETTER, C.W. - *Applied Hydrogeology*. New Jersey (E.U.A.), Prentice-Hall, Inc., 3^a ed., 1994.
- FORJAZ, V.H. - Carta Vulcanológica da Ilha do Pico à Escala 1:50,000. Instituto de Geociências dos Açores, Ponta Delgada (Portugal), 1977.
- JACOB, C.E. - *Flow of Groundwater. Enginnering Hidraulics*. New York (E.U.A.), John Wiley e Sons, Inc., 1950.
- JOIN, J.-L., POMMÉ, J.-B., COUDRAY, J. e DAESSLÉ, M. - “Caractérisation des Aquifères Basaltiques en Domaine Littoral. Impact d’un Récif Coralien”. *Hydrogéologie*, 2, 1988, pp. 107-115.
- LIMA, A.S - *Hidrogeologia de Regiões Graníticas (Braga - NW de Portugal)*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre, Braga (Portugal), Univ. Minho, 1995.
- MACHADO, F. - “O Vulcão da Ilha do Pico”. *Bol. Núcleo Cultural da Horta*, 1, 1, 1956, pp. 37-45.
- NUNES, J.C., CRUZ, J.V., FRANÇA, Z., CARVALHO, M.R., SERRALHEIRO, A. e FORJAZ, V.H. (1997) - Carta Vulcanológica da Ilha do Pico - Açores à escala 1:30000. *Em preparação*.
- PARADELA, P.L. - “Sondeos de Pesquisa y de Captacion en los Azores”, in *Anais do Simpósio Internacional Sobre Hidrologia de Terrenos Volcânicos*, Canarias (Espanha), 1974, 11 pp..
- PARADELA, P.L. - “Hidrogeologia Geral das Ilhas Adjacentes”. *Comun. Serv. Geol. Portugal*, 66, 1980, pp. 241-256.
- RAZACK, M., DROGUE, C., ROMARIZ, C. e ALMEIDA, C.A.C. - “Étude de l’Effect de Marée Océanique sur un Aquifere Carbonaté Cotier (Miocène de l’Algarve - Portugal)”. *J. Hydrology*, 45, 1980, pp. 57-69.
- SILVA, M.O. - *Hidrogeologia do Algarve Oriental*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Lisboa (Portugal), F.C.U.L., 1984.
- SILVA, M.J.B.L. - *Hidrogeologia do Miocénico do Algarve*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia. Lisboa (Portugal), F.C.U.L., 1988.
- TODD, D.K. - *Groundwater Hydrology*. New York (E.U.A.), John Wiley e Sons, Inc., 2^a Ed., 1980.

WERNER, P.W. e NORÉN, D. - "Progressive Waves in Non-Artesians Aquifers". *Trans. Am. Geoph. Union*, **32**, 2, 1951, pp. 238-244.

WOODHALL, D. - "Geology and Volcanic History of Pico Island Volcano, Azores". *Nature*, **248**, 1974, pp. 663-665.

ZBYSZEWSKI, G., FERREIRA, C.R. e FERREIRA, O.V. - "Étude Géologique de l'Île de Pico (Açores)". *Comun. Serv. Geol. Port.*, **44**, 1962, pp. 5-34.