

MÉTODOS ELÉCTRICOS NO ESTUDO DA INTERFACE ÁGUA DOCE/ÁGUA SALGADA — UM EXEMPLO TORREIRA/AVEIRO*

The investigation of the sea water/fresh water interface
by electrical methods — An example Torreira/Aveiro

por

FERNANDO E. R. ALMEIDA**

MANUEL A. MARQUES DA SILVA***

MANUEL J. SENOS MATIAS**

RESUMO — A exploração de água doce em zonas costeiras é por vezes problemática, devido ao desconhecimento da posição da interface água doce/água salgada. Na península da Torreira este problema agudiza-se pelo facto de haver duas margens de água salgada: a oceânica a oeste e a da "Ria de Aveiro" a este.

Com o objectivo de localizar mais correctamente as captações de água, foi executada uma campanha de prospecção geofísica por sondagens eléctricas. Desta campanha resultou o planeamento de vários furos de sondagem.

O modelo geofísico obtido a partir da metodologia de interpretação aqui proposta é comparado com o modelo físico obtido a partir das sondagens mecânicas e, como é demonstrado, os dois modelos são muito semelhantes.

Finalmente com base no trabalho aqui apresentado, presentemente explora-se água doce na área em questão.

SYNOPSIS — The lack of information about the position of the sea water/fresh water interface rises problems when exploiting fresh water in coastal regions. In the Torreira peninsula (north of Aveiro) this problem is more difficult because of the existence of two sea water margins: the Atlantic one to the west and the "Ria de Aveiro" one to east.

In order to study the position of the sea water/fresh water interface and to propose the location for some drill holes to exploit fresh water, several electrical soundings were carried out.

The geophysical model obtained from a proposed interpretation methodology is compared with the physical model obtained from drill-holes and, as it is shown, there is a close agreement between the proposed geophysical model and the obtained physical model.

At the present, and as a final result of the work discussed herein, fresh water is being successfully exploited in the area of the studies.

* Trabalho recebido em Abril de 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de 3 meses.

** Engenheiro de Minas, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro.

*** Geólogo, Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro.

1 — ANTECEDENTES

As instalações da Colónia de Férias da Torreira, Murtosa, pertencentes ao Centro Regional de Segurança Social de Aveiro, estão situadas no cordão litoral que a poente bordeja a Ria de Aveiro.

Durante aproximadamente seis meses por ano, serve uma população de cerca de 800 pessoas, sendo a maioria crianças de idades compreendidas entre os 6 e os 12 anos.

O abastecimento de água à Colónia foi conseguido, desde 1973, pela exploração de um furo de 209 metros de profundidade que captava entre as cotas -153,0 e -192,5.

Em Setembro de 1984 verificou-se o salgamento desta captação, o primeiro e único caso até agora conhecido neste aquífero profundo. Consequentemente a captação ficou fora de serviço, restando como solução ao problema do abastecimento de água o recurso às formações quaternárias superficiais.

Dado o facto, porém, da particular situação geográfica destas formações, ladeadas a poente pelo Atlântico e a nascente pela Ria de Aveiro, a localização de novas captações nestas circunstâncias reveste aspectos de delicada decisão.

A informação hidrogeológica disponível, fundamentalmente obtida a partir de duas sondagens executadas nos terrenos da Colónia, indicava a presença de níveis de alta salinidade na base das formações quaternárias. Na parte superior, contudo, estas formações continham água de qualidade aceitável. Tornava-se necessário definir o melhor possível a interface água doce/água salgada.

Em conformidade decidiu-se proceder às sondagens mecânicas por uma campanha de prospecção geofísica. O método mais referenciado, e que nos pareceu adequado, foi o método da resistividade eléctrica, Keller e Frischknecht (1979), tendo sido executadas dez sondagens eléctricas.

2 — ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

A notícia explicativa da carta geológica de Ovar, Teixeira e Assunção (1963), fornece dados para se poder enquadrar geologicamente a área em estudo.

Resumidamente, o cordão de dunas litorais que limita a oeste a chamada Ria de Aveiro desenvolve-se desde Furadouro, Ovar, até S. Jacinto, onde é interrompido pela barra do porto de Aveiro. Na área da Torreira apresenta uma largura média da ordem de 1 km.

Trata-se de uma formação muito recente, constituída superficialmente por areias eólicas acumuladas sobre um nível de lodos deltaicos argilo-arenosos.

As areias de duna, de natureza siliciosa, apresentam uma granulometria muito homogénea, típica do respectivo ambiente de sedimentação.

Por baixo do nível de lodos existe uma outra formação arenosa que, para a base, passa a uma cascalheira grosseira, ocorrendo alguns níveis coníferos.

Estas formações quaternárias repousam sobre uma espessa camada essencialmente areno-argilosa de idade Pliocénica, Lauverjat (1982).

3 — TRABALHOS DE GEOFÍSICA

Sendo o nosso objectivo localizar a interface água doce/água salgada, isto é, determinar a variação da resistividade em profundidade, decidimos executar sondagens eléctricas; método este já testado por outros autores, p.e. Afonso (1983). A implantação das sondagens eléctricas no terreno (Fig. 1) foi feita de modo a permitir uma informação contínua ao longo de um perfil entre o mar e a ria. Devido à vegetação e à presença de construções, não foi possível manter uma direcção constante em todas as sondagens eléctricas, nem realizá-las no mesmo alinhamento recto, como seria aconselhável.

Foi usado o sistema tetraelectródico de medida Wenner e as curvas das sondagens de campo foram obtidas com uma amostragem de seis pontos por década.

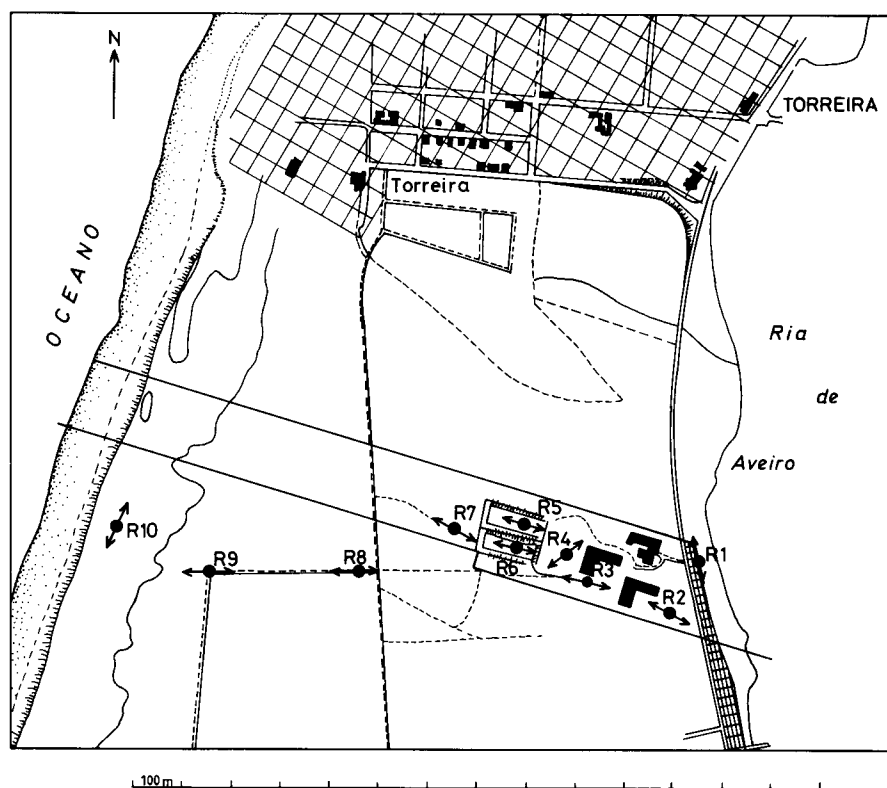


Fig. 1 — Localização das sondagens eléctricas na faixa da Torreira. A direcção das sondagens representa-se pelas setas

Executaram-se dez sondagens eléctricas cujos dados de campo se apresentam na Tabela I, em que "a" é a distância em metros, entre dois eléctrodos consecutivos e R1, R2,... R10 são as sondagens da Fig. 1. As resistividades aparentes são dadas em ohms.m.

Tabela I
Dados de campo

a	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
0,5	442	2349	2841	3249	328	534	4513	2890	9590	4817
1,0	164	917	2496	2792	137	173	2229	2021	4189	3393
1,5	94	320	1588	1910	81	89	1379	1297	2631	2999
2,0	76	153	984	1472	67	73	730	836	1346	2630
3,0	68	59	475	655	57	62	238	395	536	1949
4,0	65	34	249	352	60	63	99	219	218	1606
6,0	60	30	115	124	60	62	62	95	59	965
8,0	57	32	86	74	66	71	62	76	33	596
12,0	47	35	71	64	70	70	66	73	26	164
16,0	35	34	63	59	66	72	68	69	25	52
24,0	17	26	51	51	51	54	54	56	25	28
32,0	11	21	36	36	35	39	39	42	21	21
40,0	9	16	24	24			26	28	19	16

Interpretação dos resultados

Cada curva de campo foi comparada inicialmente com curvas padrão, Orellana *et al.* (1972), para obter um primeiro modelo preliminar.

Esta fase permitiu determinar espessuras e resistividades aproximadas para cada curva.

Procedeu-se, seguidamente, a uma fase de cálculo automático em que as curvas de campo foram comparadas interactivamente com modelos teóricos correspondentes a valores de resistividades e espessuras estabelecidos com base nos valores obtidos na fase anterior.

Numa terceira fase as soluções individuais de cada sondagem são comparadas e, se necessário, ajustadas de forma a obter-se um modelo geofísico global da área (Fig. 2).

O modelo conjuga toda a informação geológica prévia e tem de ser coerente com os elementos geofísicos obtidos, como se pode verificar nas Figs. 3, 4 e 5. Nestas figuras representam-se as curvas teóricas a cheio e os dados de campo com círculos.

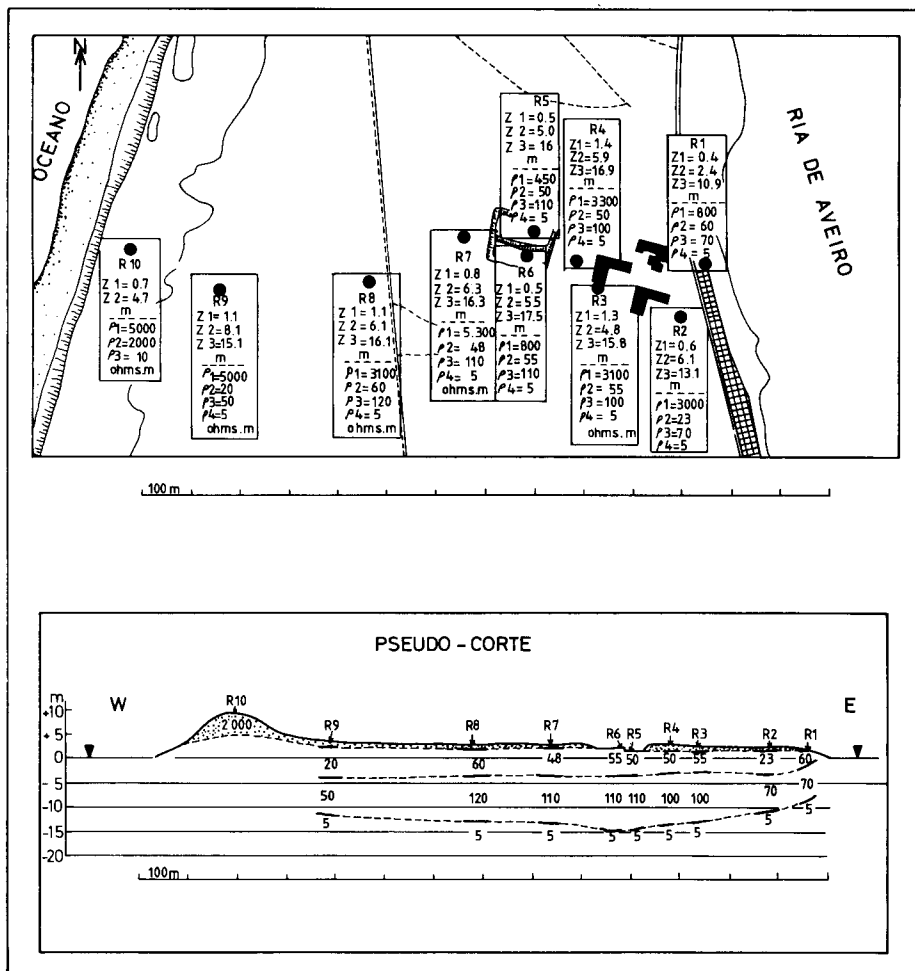


Fig. 2 — Modelo geofísico proposto. (Os valores numéricos inseridos no modelo são resistividades em ohms.m.)

As curvas teóricas foram obtidas com um programa em BASIC usando o conhecido método de Ghosh, Ghosh (1971).

A análise conjunta das curvas de sondagem eléctrica evidencia uma baixa resistividade de cerca de 5 ohms.m, que se desenvolve na parte inferior do modelo geofísico da Fig. 2. Esta unidade corresponderá às cunhas de intrusão respectivamente a oeste, do mar, e a leste, da ria. A cota do topo desta unidade varia entre -10 e -15 metros, situando-se a parte mais profunda deslocada para o lado da ria. É de salientar a forma lenticular da interface proposta como seria de esperar e se pode verificar na Fig. 2.

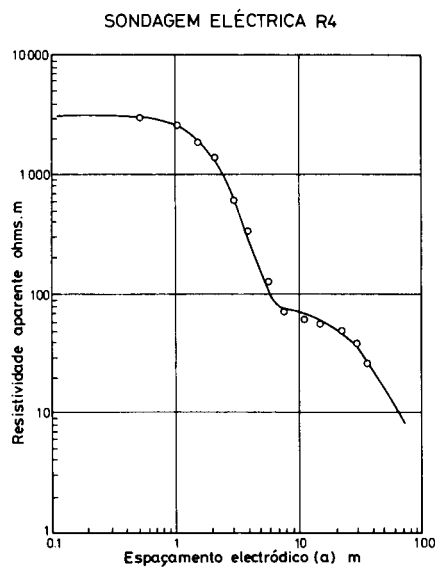
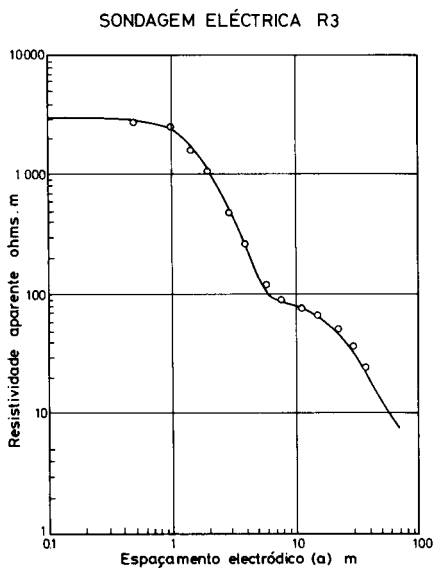
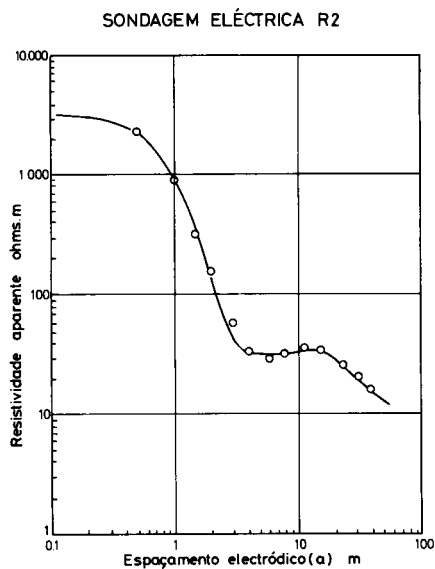
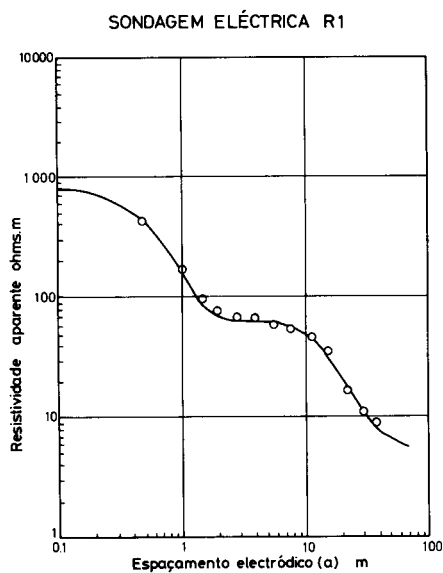
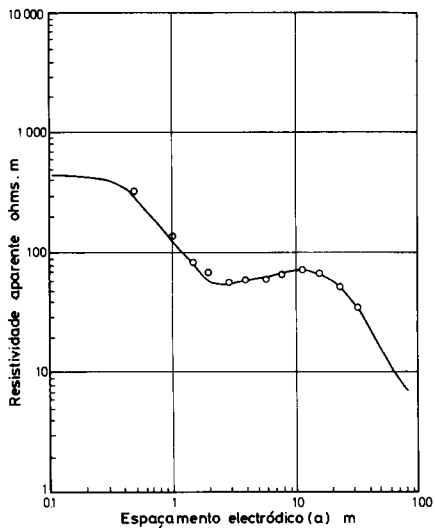
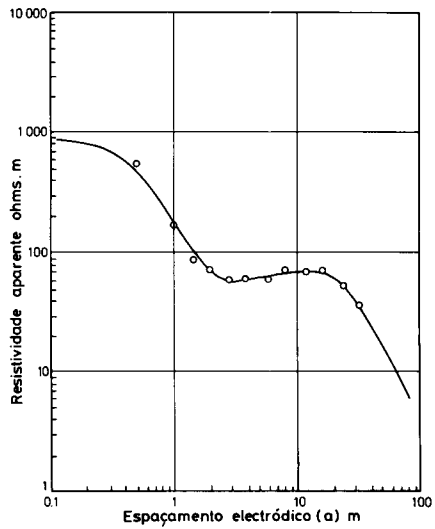


Fig. 3 — Comparação do modelo teórico de resistividades com os dados de campo (o) das sondagens eléctricas R1, R2, R3 e R4

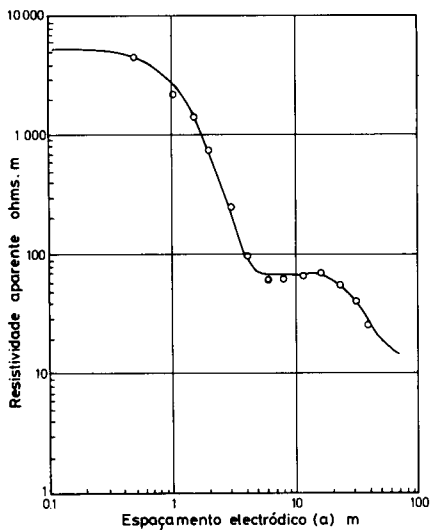
SONDAGEM ELÉCTRICA R5



SONDAGEM ELÉCTRICA R6



SONDAGEM ELÉCTRICA R7



SONDAGEM ELÉCTRICA R8

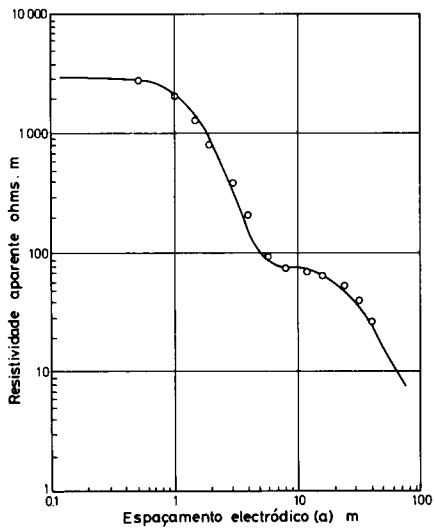


Fig. 4 — Comparação do modelo teórico de resistividades com os dados de campo (o) das sondagens eléctricas R5, R6, R7 e R8

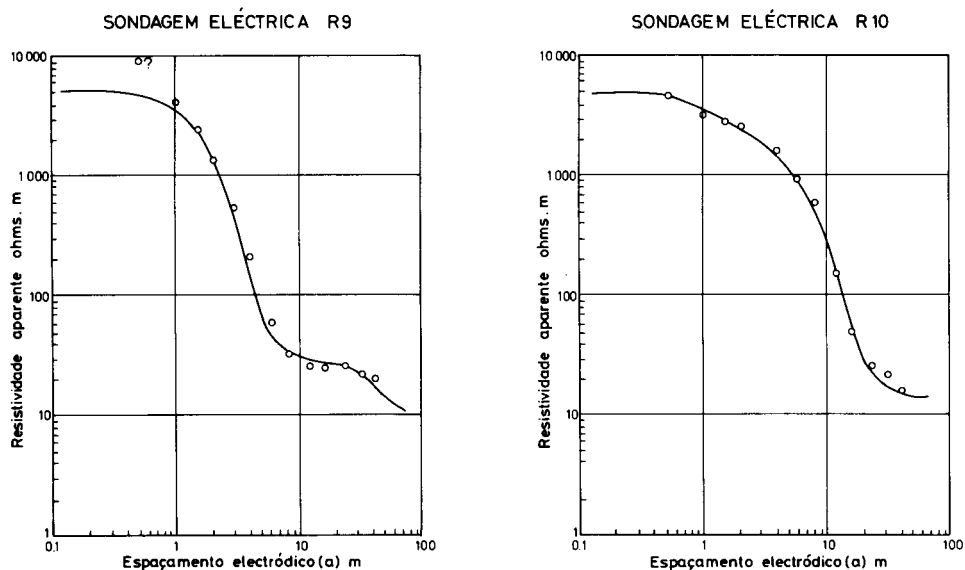


Fig. 5 — Comparação do modelo teórico de resistividades com os dados de campo (o) das sondagens eléctricas R9 e R10

Sobre esta unidade de baixa resistividade, individualizaram-se duas outras menos condutoras. Uma com resistividade da ordem de 100 ohms.m limitada inferiormente pela unidade mais condutora e superiormente pela cota média -3 metros; a outra, suprajacente à anterior e atingindo cotas ligeiramente positivas, é caracterizada por valores de resistividade da ordem dos 50 ohms.m.

A distinção entre estas duas unidades pode explicar-se por duas hipóteses:

- i) Existência de dois aquíferos, sendo o superior de água mais mineralizada;
- ii) Presença de um aquífero constituído por formações litológicas sobrepostas de diferentes porosidades.

A conjugação das duas hipóteses é, naturalmente, viável.

Na nossa interpretação entendemos que o nível freático coincide com o topo da unidade geofísica com resistividade da ordem dos 50 ohms.m.

Deve realçar-se que, no modelo geofísico proposto, as sondagens próximas ao mar (R10 e R9) e à ria (R1 e R2) apresentam resistividades mais baixas, o que é compatível com uma maior dispersão da interface água doce/água salgada.

Metodologias de interpretação do tipo da aqui proposta podem ser encontradas na bibliografia, Chyba (1986).

4 — SONDAGENS MECÂNICAS E MODELO HIDROGEOOLÓGICO

Foram executadas 3 sondagens mecânicas pelo método da percussão, designadas por HDN1, HDN2 e HDN3 e localizadas perto das sondagens eléctricas R4, R6 e R7, respectivamente. Tal como o modelo geofísico proposto indicava, era nesta área que a interface água doce/água salgada se situava a maior profundidade.

Os dados obtidos durante a perfuração permitiram elaborar os perfis litológicos que se apresentam na Fig. 6.

Cotas aprox.

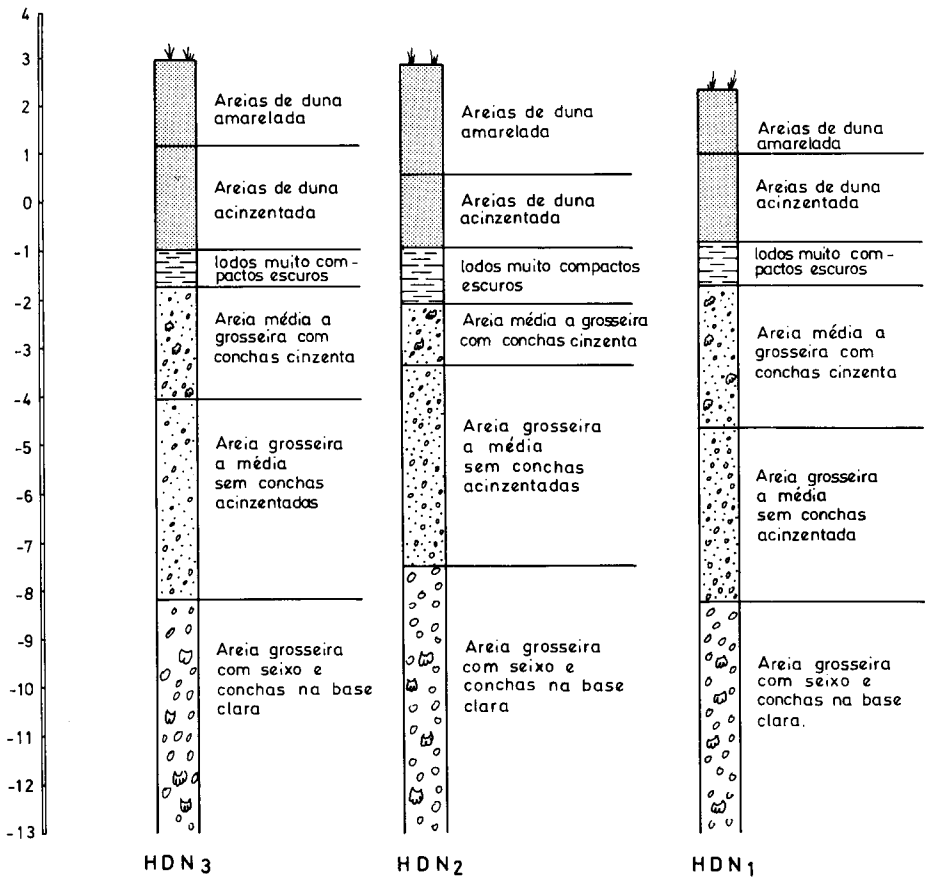


Fig. 6 — Perfis litológicos elaborados com base nas sondagens mecânicas HDN1, HDN2 e HDN3

Duma forma sintética, pode considerar-se a seguinte sequência esquemática:

- i) Uma camada de areias de duna cuja base assenta numa formação de lodos pela cota 0 (zero) a -1 metros. São areias de granulometria muito homogénea, de porosidade elevada;
- ii) Uma formação de lodos muito compactos, escuros, com espessura inferior a 1 metro;
- iii) Um complexo de areias médias a grosseiras, cinzentas, com conchas na parte superior, cuja base se situa a cotas de -8 metros;
- iv) Outro complexo mais grosseiro, com muito seixo bem rolado, mas de cores muito mais claras que o anterior e contendo conchas na parte inferior.

Os dois complexos inferiores apresentam uma granulometria muito heterogénea, pelo que terão menor porosidade que as areias de duna.

As sondagens terminaram quando se notava um aumento da condutividade da água, controlando-se essa característica a cada metro de perfuração.

O nível freático situava-se a cerca de 1 metro de profundidade, nas areias de duna. Não era influenciado pelas marés.

Sempre que as perfurações atingiram a formação de lodos, verificava-se não só dificuldade no avanço mas também falta de água no interior da tubagem de revestimento. Para um melhor funcionamento da limpadeira foi mesmo necessário adicionar água nesta fase das sondagens.

No entanto, ao atravessarem-se completamente os lodos, detectava-se uma subida violenta de água das formações inferiores aos lodos, estabilizando os respectivos níveis a profundidades da ordem dos 2 metros. Foi possível verificar que estes níveis piezométricos eram fortemente influenciados pelas marés, com amplitudes próximas de 1 metro.

Pode, pois, concluir-se que existem dois aquíferos sobrepostos, separados pela formação de lodos: superior, freático, instalado nas areias de duna, cuja espessura saturada é pouco maior que 2 metros; o inferior, com características de aquífero cativo, localiza-se nas areias grosseiras, sendo confinado pelo tecto de lodos. Na parte inferior, pela cota -13, apresenta um aumento de condutividade da água.

As captações foram projectadas com colunas de revestimento definitivas com 5 metros de tubo ralo, situado entre as cotas -4 e -9 metros, explorando a formação artesiana.

Os ensaios de bombagem, realizados após as operações de limpeza, revelaram:

- i) influência das marés superior aos efeitos de bombagem para os caudais usados ($18 \text{ m}^3/\text{hora}$);
- ii) pequena variação de cloretos (teores da ordem dos 100 p.p.m. em Cl^-) para níveis hidrodinâmicos ainda superiores à cota 0 (zero);
- iii) maiores teores de cloretos (200 p.p.m em Cl^-) para caudais maiores ($26 \text{ m}^3/\text{hora}$) e níveis hidrodinâmicos algo inferiores à cota 0 (zero).

Na Fig. 7 apresentam-se os limnigramas da evolução dos níveis piezométricos com o tempo nas captações HDN2 (em bombagem) e HDN3 (em repouso). A exploração deste aquífero para o abastecimento da Colónia de Férias da Torreira foi equacionado dividindo o caudal total necessário pelas 3 captações, minimizando a possível subida da interface água doce/água salgada. Os níveis hidrodinâmicos, para o caudal nominal de cada captação ($5 \text{ m}^3/\text{hora}$) têm-se situado sempre a cotas positivas.

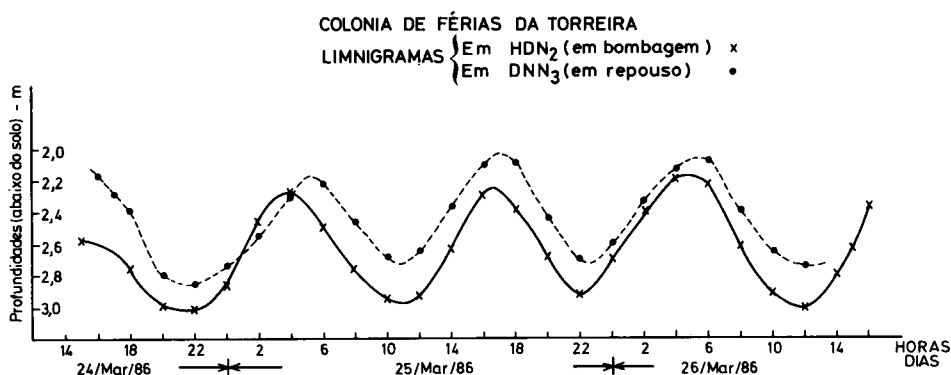


Fig. 7 — Limnigramas dos níveis piezométricos ao longo do tempo nas captações HDN2 e HDN3

5 — CONCLUSÕES

O modelo geofísico derivado da interpretação das sondagens eléctricas é semelhante aos dados recolhidos nas sondagens mecânicas como se pode inferir das Figs. 2 e 6 e do texto. Assim, comparando as interpretações das sondagens eléctricas R4, R6 e R7 com os dados das sondagens mecânicas HDN1, HDN2 e HDN3, pode-se concluir que:

- i) A unidade menos resistiva (5 ohms.m) nas sondagens R4, R6 e R7 foi localizada a cotas de -13 , $-15,5$ e -13 m respectivamente, ver Fig. 2. Estas cotas correspondem ao aparecimento de água mineralizada nas sondagens mecânicas efectuadas.
- ii) Acima desta unidade o modelo geofísico definiu uma outra com valores de resistividade da ordem dos 100 ohms.m, estendendo-se até à cota média -3 (ver Fig. 2). Em particular nas sondagens R4, R6 e R7 esta unidade é limitada

superiormente pelas cotas -2 , $-3,5$ e -3 respectivamente. As sondagens mecânicas mostram que esta unidade corresponde a um aquífero cativo limitado superiormente pela formação de lodos cuja base corresponde a cotas da ordem dos -2 metros. De novo existe um consenso entre a interpretação geofísica e os dados das sondagens mecânicas, apesar de haver uma diferença de cerca de 1 metro nas cotas estimadas. No entanto, conhecendo-se as questões ligadas à interpretação de sondagens eléctricas e a ambiguidade da mesma, não nos pareceu significativo um "erro" de 1 metro.

- iii) Quanto ao aquífero superior a resistividade da ordem dos 50 ohms.m, a interpretação geofísica definiu o nível freático a uma cota da ordem de 1 metro que coincide com os dados das sondagens mecânicas.

Parece-nos pois que a metodologia usada na interpretação das sondagens eléctricas forneceu resultados bastante próximos dos mais tarde encontrados pelas sondagens mecânicas. Portanto, esta metodologia de interpretação deve ser aplicável noutras situações semelhantes.

A inspecção do pseudocorte da Fig. 2 permitiu-nos pois localizar a interface água doce/água salgada na linha de separação entra as unidades de resistividades 100 ohms.m e 5 ohms.m. É de salientar que tanto na proximidade da ria como na proximidade do mar a resistividade do aquífero cativo, 100 ohms.m, diminui da ordem de 50%, o que deverá corresponder a uma contaminação deste aquífero pelas águas do mar e da ria.

A inspecção global do pseudocorte da Fig. 2 permite-nos também inferir a forma lenticular assimétrica, isto é, deslocada para o lado da ria, da interface água doce/água salgada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, A. A. R. (1983) — *Pesquisa de águas subterrâneas. Prospecção geofísica, comportamento e modelação matemática de um aquífero costeiro*. Tese de Doutoramento, Lisboa.
- CHYBA, J. (1986) — *Some improvements in the interpretation of Vertical Electric Sounding curves*. "Geoph. Prosp.," vol. 34, 913-922.
- GHOSH, D. P. (1971) — *Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally layered earth*. "Geoph. Prosp.," vol. 19, 769-775.
- LAUVERJAT, J. (1982) — *Le Cretacé Superior dans le Nord du Bassin Portugaise*. Tese de Doutoramento, Univ. P. et M. Curie, Paris.
- KELLER, G. V. e FRISCHKNECHT (1979) — *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press.
- ORELLANA, E. e MONEY, H. D. (1972) — *Two and three-layer master curves for Wenner arrangement*. "Interciencia", Madrid.
- TEIXEIRA, C. e ASSUNÇÃO, C. T. (1963) — *Carta Geológica 13-C (Ovar)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.