

TÉCNICAS TRIPOTENCIAIS DE RESISTIVIDADE NA DETECÇÃO DE CAVIDADES

Tripotential resistivity techniques in the detection of cavities

por
MANUEL J. SENOS MATIAS*
FERNANDO E. R. ALMEIDA*

RESUMO — No presente artigo ilustra-se a aplicação dos métodos de resistividade eléctrica à detecção de cavidades. Devido à natureza do problema, é proposta a técnica tripotencial de resistividade com o dispositivo Wenner. Os resultados de dois perfis paralelos de sondagens eléctricas realizados sobre a gruta da nascente do Almonda são discutidos e interpretados sob a forma de secções de resistividade aparente α e do quociente $\rho_{\beta}/\rho_{\gamma}$, com a ajuda de material de interpretação obtido por simulação física num tanque de resistividades.

Do exemplo no presente artigo, sobressai a importância do uso da relação $\rho_{\beta}/\rho_{\gamma}$ na interpretação das medidas de campo de resistividade aparente numa zona onde existem estruturas bidimensionais não aflorantes.

SYNOPSIS — The present paper illustrates the application of resistivity methods to the detection of cavities. Owing to the nature of the problem, it is proposed the use of tri-potential techniques with Wenner arrays. Two parallel sounding profiles over the «Nascente do Almonda» Cave are discussed and interpreted in terms of resistivity pseudo sections and $\rho_{\beta}/\rho_{\gamma}$ ratio sections. These field measurements are interpreted with the aid of tank analogue results.

From the example herein discussed, the use of $\rho_{\beta}/\rho_{\gamma}$ ratios stands out in the final interpretation of the resistivity measurements carried out in a zone where non outcropping two-dimensional structures are present.

1 — INTRODUÇÃO

O conhecimento e localização de cavidades subterrâneas, naturais ou não, é muito importante em domínios como a engenharia civil e geotecnia, trabalhos mineiros, trabalhos de prospecção e de arqueologia. De facto, as cavidades subterrâneas concorrem para o grande risco de trabalhos de engenharia, como por exemplo fugas de água em barragens e reservatórios, colapso de fundações, subsidências em vias de comunicação, centrais de energia, etc.

Para ultrapassar os problemas inerentes à correcta localização destas cavidades têm sido desenvolvidas técnicas que envolvem observações e medidas efectuadas a partir da superfície.

* Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro.

O recurso a sondagens mecânicas pode ser uma solução para a localização das cavidades. No entanto, como estas são normalmente sinuosas e irregulares, apresentando dimensões, tipo e modo de preenchimento variáveis, uma adequada campanha de sondagens mecânicas pode ser bastante morosa e cara.

Como alternativa às sondagens mecânicas surge a prospecção geofísica. De entre os métodos geofísicos utilizáveis na localização de cavidades subterrâneas sobressaem os de resistividade eléctrica, pois uma cavidade proporciona contraste de resistividade com o meio onde se encaixa.

Todavia, como as cavidades subterrâneas assumem, dum modo geral, carácter direccional e bidimensional devem-se utilizar técnicas de resistividade adequadas à satisfatória resolução deste tipo de questões, pois a abordagem clássica de aplicação de sondagens eléctricas a um terreno constituído por camadas horizontais e paralelas não é satisfatória.

Foi proposto o método dipolo-dipolo (Afonso, 1987), polo-dipolo (Bristow, 1966; Bates, 1973; Pereira, 1986). Neste último trabalho também foi aplicado o método tripotencial de resistividade, introduzido por Carpenter e Habberjam (1956) e Habberjam (1969).

No presente artigo pretende-se discutir e exemplificar estas técnicas tripotenciais de resistividade sob a forma de secções de resistividade aparente e outros parâmetros que possam ajudar ao diagnóstico de cavidades subterrâneas.

Além disso, a interpretação das medidas de campo é feita por comparação destas com dados obtidos por simulação física sobre modelos bidimensionais simples.

2 — MÉTODOS TRIPOTENCIAIS DE RESISTIVIDADE

A abordagem clássica dos métodos de resistividade eléctrica consiste no uso de sistemas tetraelectródicos de medida colineares — Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo e polo-dipolo — e não colineares — quadrado.

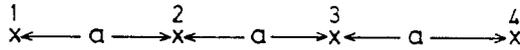
O simples uso destas técnicas fornece medidas de resistividade eléctrica do terreno dependentes da orientação do sistema electródico de medida.

O estudo de zonas de geologia complexa onde possam existir estruturas de carácter direccional e bidimensional levou ao desenvolvimento das chamadas técnicas tripotenciais de resistividade (Carpenter e Habberjam, 1956; Acworth e Griffiths, 1965; Habberjam, 1979).

Estas técnicas baseiam-se na leitura de três medidas da resistência do terreno R_α , R_β e R_γ atribuídas ao mesmo ponto, o que para o dispositivo Wenner dá as configurações da Fig. 1.

Pelos princípios da reciprocidade e sobreposição aquelas três medidas de resistência estão relacionadas por:

$$R_\alpha = R_\beta + R_\gamma \quad (1)$$



Configuração	Posição dos electrodos			
	1	2	3	4
α	A	M	N	B
β	A	B	N	M
γ	A	M	B	N

A, B electrodos de corrente
M, N electrodos de potencial

Fig. 1 — Configurações α , β e γ do dispositivo Wenner

No entanto na prática a relação (1) não se verifica devido a erros de medida e a erros do operador, pelo que se deve escrever:

$$R_{\alpha} = R_{\beta} + R_{\gamma} + \varepsilon \quad (2)$$

(em que ε é o erro de medida)

Assim, uma das virtudes destas técnicas tripotenciais é o controlo de qualidade dos dados, o que não é possível na metodologia clássica.

Desde que este erro ε esteja dentro dos limites experimentais impostos pelo operador ele pode ser distribuído pelas resistências medidas (Habberjam, 1979):

$$\begin{aligned} (R_{\alpha})_c &= R_{\alpha} - \frac{\varepsilon}{|R_{\alpha}| + |R_{\beta}| + |R_{\gamma}|} |R_{\alpha}| \\ (R_{\beta})_c &= R_{\beta} - \frac{\varepsilon}{|R_{\alpha}| + |R_{\beta}| + |R_{\gamma}|} |R_{\beta}| \\ (R_{\gamma})_c &= R_{\gamma} - \frac{\varepsilon}{|R_{\alpha}| + |R_{\beta}| + |R_{\gamma}|} |R_{\gamma}| \end{aligned} \quad (3)$$

(em que $(R_{\alpha})_c$, $(R_{\beta})_c$ e $(R_{\gamma})_c$ correspondem aos valores corrigidos das resistências do terreno, enquanto $|R_{\alpha}|$, $|R_{\beta}|$ e $|R_{\gamma}|$ são os valores absolutos das resistências medida no campo)

O quociente

$$E = \frac{\varepsilon}{|R_{\alpha}| + |R_{\beta}| + |R_{\gamma}|} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

é conhecido por erro tripotencial (Habberjam, 1979). Este erro permite controlar a qualidade das medidas de campo, se só se aceitarem medidas R_α , R_β e R_γ afectadas dum erro E inferior a um valor pré-definido.

A partir dos valores das resistências α , β e γ corrigidos conforme as equações (3) é possível calcular as resistividades aparentes α , β e γ do terreno tal que:

$$\begin{aligned} \rho_\alpha &= 2 \pi a (R_\alpha)_c \\ \rho_\beta &= 6 \pi a (R_\beta)_c \\ \rho_\gamma &= 3 \pi a (R_\gamma)_c \end{aligned} \quad (5)$$

sendo α a distância interelectródica da Fig. 1.

Em terrenos homogéneos e isotrópicos estas três resistividades têm o mesmo valor. Logo, eventuais heterogeneidades do terreno originam discrepâncias entre as três resistividades. Por isso têm sido propostos quocientes entre os valores das três resistividades para diagnosticar as heterogeneidades do terreno. São possíveis três razões, ou seja: os quocientes entre as resistividades α e β , α/β , entre as resistividades α e γ , α/γ e entre as resistividades β e γ , β/γ , (Acworth e Griffiths, 1985).

Claro que estes quocientes têm o valor 1 quando as observações correspondem a terrenos homogéneos e isotrópicos.

3 — TRABALHO DE CAMPO

Para aplicação das técnicas tripotenciais de resistividade à localização de cavidades escolheu-se uma zona cársica — calcários Jurássicos (Moutinho, 1987) — a cerca de 500 m para norte da nascente do Almonda (lat 39° 30'N long. 8° 36'W Green.). No terreno marcaram-se dois perfis paralelos, Perfil 1 e Perfil 2, que se pretendem aproximadamente perpendiculares à direcção da gruta, Fig. 2.

Sobre cada perfil realizaram-se medidas com o dispositivo Wenner tripotencial da Fig. 1. Estas medidas foram efectuadas deslocando sucessivamente o centro geométrico do dispositivo de 20 em 20 metros de 100W a 100E ao longo de cada perfil. Em cada ponto foram efectuadas leituras com várias «dimensões» do dispositivo. Assim foram usados valores de 5, 10, 15, 20, 30, e 40 metros para a distância a da Fig. 1, o que corresponde a profundidades de investigação sucessivamente maiores.

Todas as medidas de campo, foram sujeitas *in situ* ao cálculo do erro tripotencial de modo a permitir a sua aceitação ou rejeição.

O histograma dos erros tripotenciais das medidas de campo mostra-se na Fig. 3. Do referido histograma conclui-se que todas as leituras de campo pertencem ao intervalo [- 1%, + 1%].

Autores há (Habberjam, 1969) que estabelecem o valor de $\pm 1,5\%$ como o limite aceitável do erro tripotencial, pelo que se pode concluir que os dados de campo discutidos neste artigo são de boa qualidade.

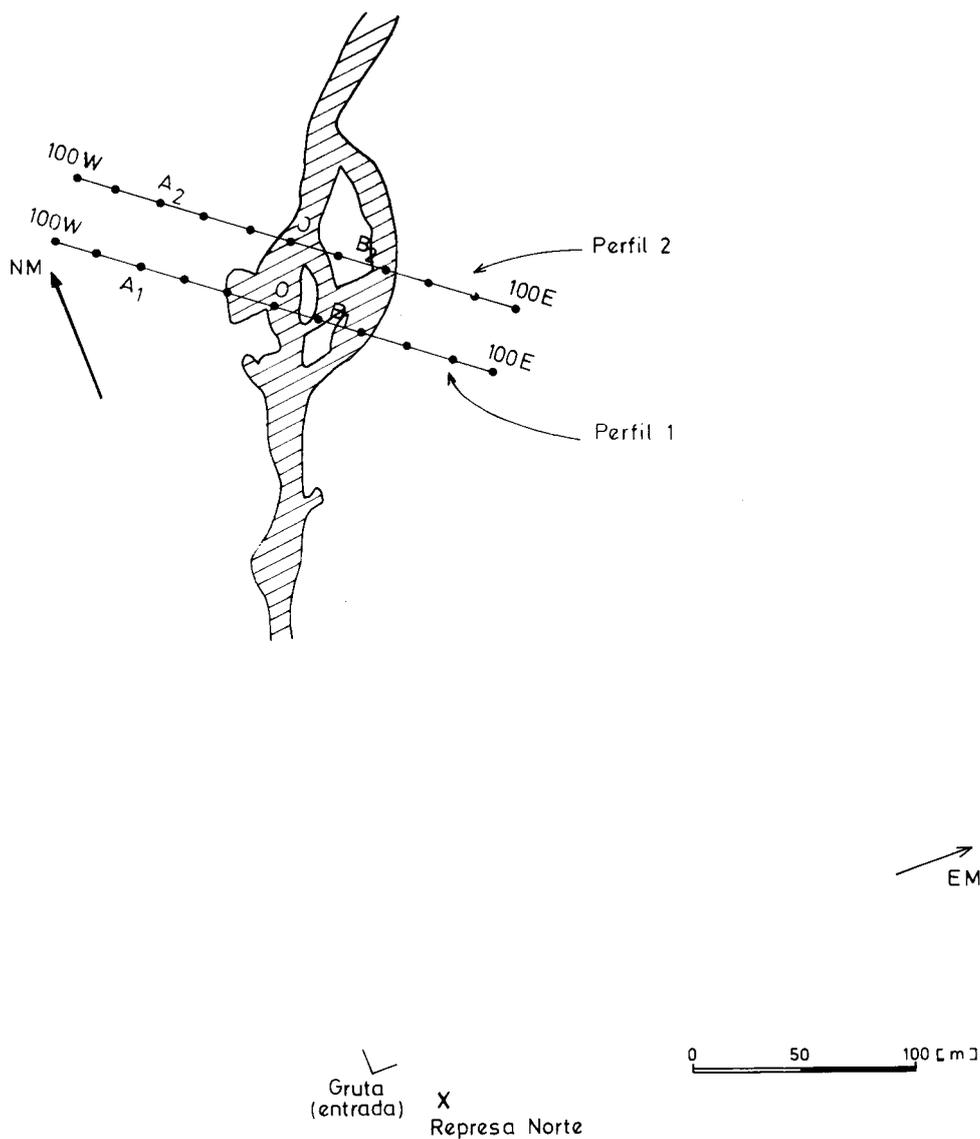


Fig. 2 — Localização dos perfis 1 e 2 e das anomalias A_1 , B_1 , A_2 , e B_2 em relação à gruta da nascente do Almonda

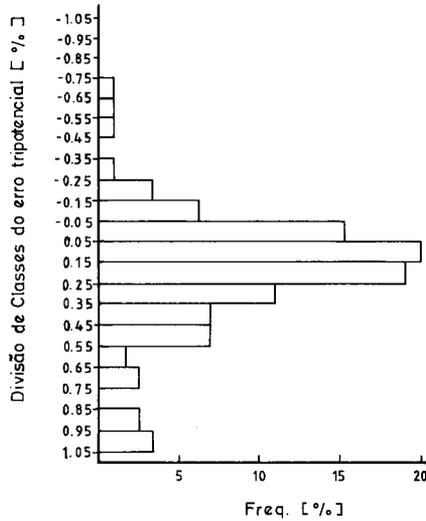


Fig. 3 — Histograma de erros tripotenciais das medidas de campo (131 ocorrências)

3.1 — Secções de resistividade aparente α

Uma vez efectuadas as leituras das resistências α , β e γ aplicou-se a correcção tripotencial, previamente apresentada, e calcularam-se as resistividades aparentes α , β e γ .

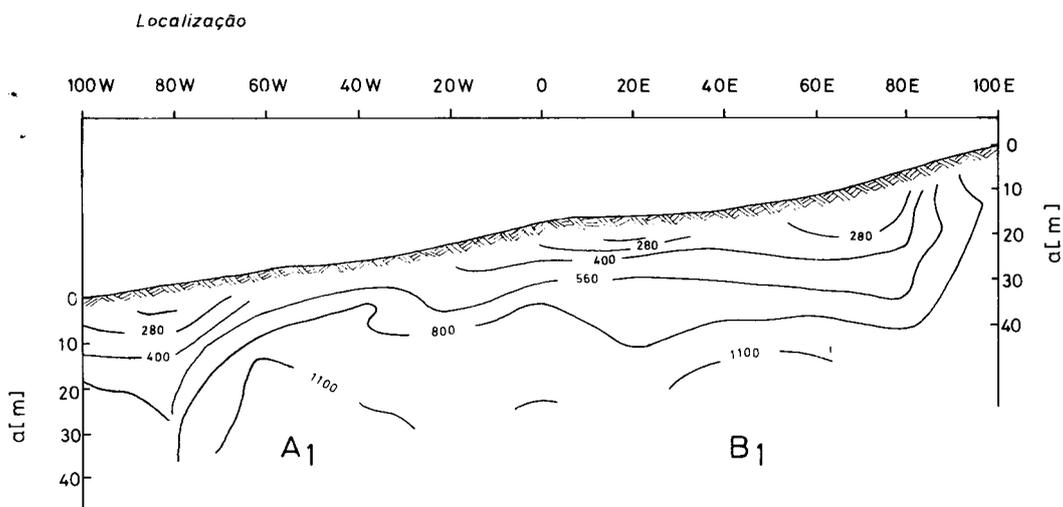
As resistividades aparentes α foram projectadas de acordo com a localização em cota e planimetria no terreno e o valor de a do dispositivo Wenner. Uma vez projectados todos os pontos foram traçadas as curvas de isorresistividades, correspondentes aos valores 140, 200, 280, 400, 560, 800 e 1100 ohms.m, obtendo-se as secções de resistividade aparente da Fig. 4.

É óbvio que o planeamento e execução de dois perfis paralelos permite investigar a continuação, ou não, em direcção das anomalias registadas.

A secção na parte superior da Fig. 4, Secção 1, corresponde ao perfil 1 de campo da Fig. 2; por outro lado, a secção inferior da Fig. 4, Secção 2, corresponde ao perfil 2 de campo da Fig. 2.

Da simples análise das secções 1 e 2 da Fig. 4 conclui-se que as linhas de isorresistividade não são paralelas como seria de esperar caso o terreno fosse composto por camadas horizontais, paralelas e homogéneas. De facto, são facilmente identificáveis máximos de resistividade A_1 e B_1 na Secção 1 e A_2 e B_2 na secção 2. Os máximos B_1 e B_2 situam-se aproximadamente entre os pontos 20E e 60E da secção 1 e os pontos 20E e 60E da secção 2, respectivamente. Ora, estas localizações quando transportas para a Fig. 2 correspondem, em planta, à localização conhecida das grutas.

SECÇÃO 1



SECÇÃO 2

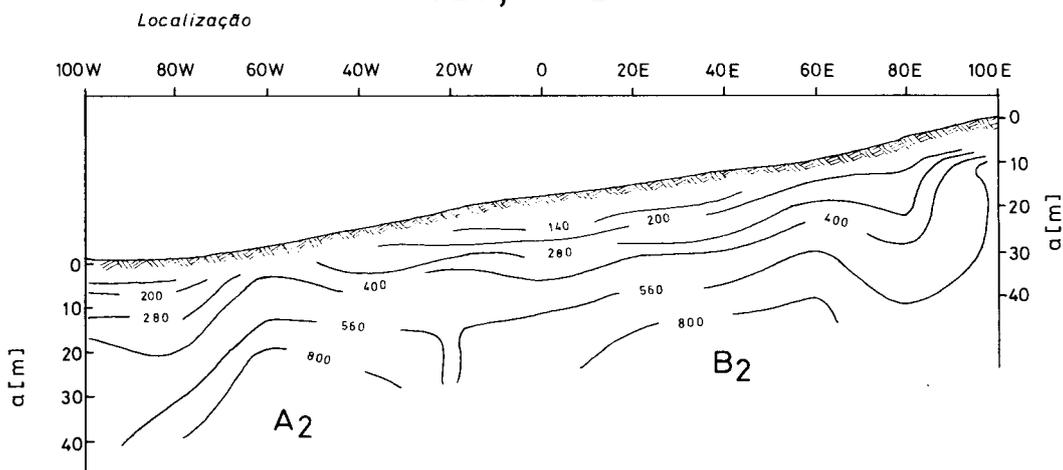


Fig. 4 — Secções de resistividade aparente referentes aos perfis 1 e 2 (contornos em ohms. m)

No entanto, restam os máximos A₁ e A₂ situados aproximadamente entre os pontos 80W e 40W em ambas as secções. Ao transpor esta localização para a Fig. 2, constata-se imediatamente que elas não têm correspondência à planta da gruta.

Finalmente, é de salientar que as anomalias A₁ e A₂ e as anomalias B₁ e B₂ definem dois alinhamentos paralelos entre si e também paralelos à direcção da gruta, como se pode ver na Fig. 2.

3.2 — Secções do quociente ρ_B/ρ_γ

Vários autores têm proposto diagnosticar estruturas de carácter direccional a partir de quocientes entre as diferentes resistividades do terreno, medidas aquando do uso de técnicas tripotenciais. No caso do dispositivo Wenner tripotencial tem-se revelado particularmente eficaz o estudo do quociente ρ_B/ρ_γ (Acworth e Griffiths, 1985).

Formando os quocientes entre as resistividades de campo ρ_B e ρ_γ referentes ao exemplo em discussão, obtêm-se as secções de valores ρ_B/ρ_γ da Fig. 5. Os pontos de implantação destes valores são os mesmos dos das secções de resistividade aparente α da Fig. 4.

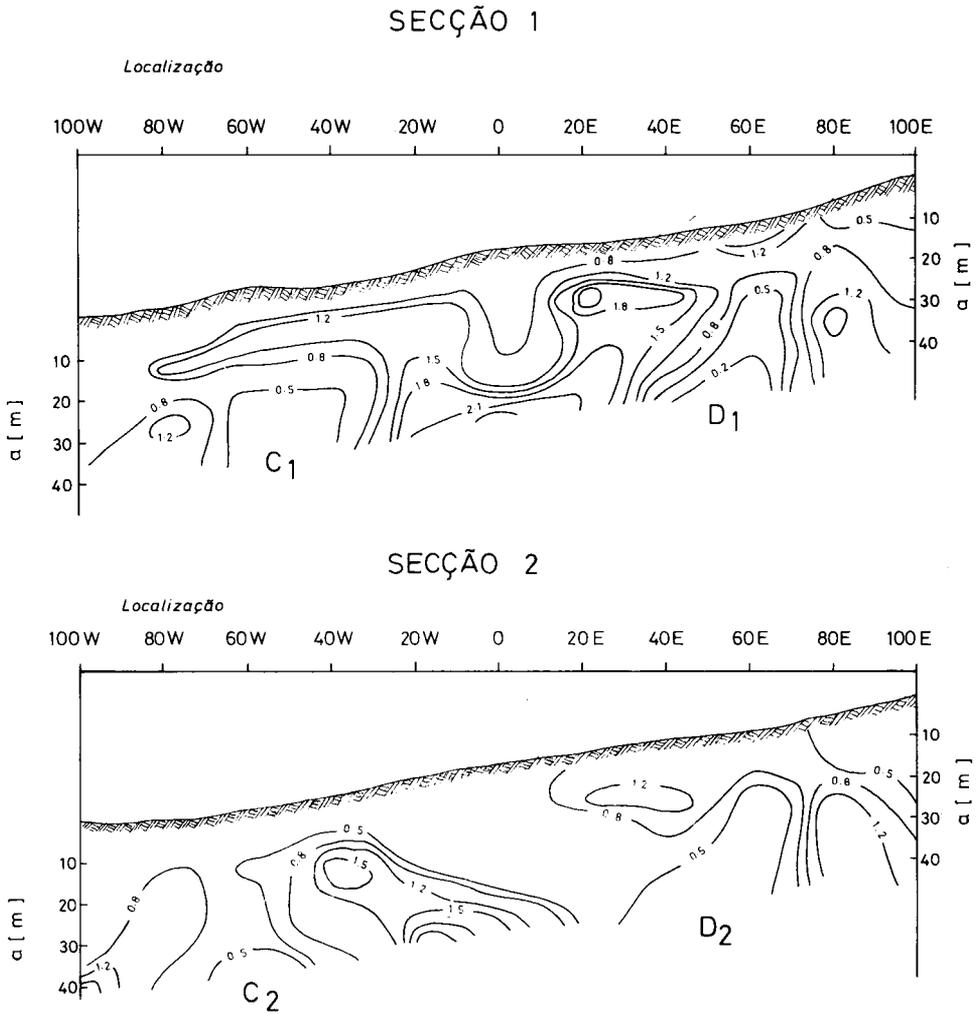


Fig. 5 — Secções do quociente ρ_B/ρ_γ referentes aos perfis 1 e 2

Nas secções da Fig. 5, traçaram-se as curvas de isovalores 0,2, 0,5, 0,8, 1,2, 1,5, 1,8 e 2,1, que no presente caso são adimensionais.

Na Fig. 5, a secção superior, secção 1, corresponde ao perfil 1 de campo da Fig. 2 e à secção 1 da Fig. 4; por outro lado, a secção inferior da Fig. 5, secção 2, corresponde ao perfil 2 de campo da Fig. 2 e à secção 2 da Fig. 4.

A análise das secções da Fig. 5 mostra zonas de valores ρ_β/ρ_γ inferiores à unidade nos locais das secções da Fig. 4 onde se registaram máximos de resistividade.

Assim, da secção 1 da Fig. 5 surgem as zonas de mínimos ρ_β/ρ_γ : C_1 , situada entre os pontos 70W e 40W, e D_1 , entre os pontos 40E e 80E. A localização das zonas C_1 e D_1 corresponde com grande aproximação aos máximos de resistividade aparente α , A_1 e B_1 , Secção 1 da Fig. 4.

Dum modo semelhante, a secção 2 da Fig. 5 revela duas zonas de mínimos ρ_β/ρ_γ , uma C_2 situada entre os pontos 70W e 40W, outra D_2 entre os pontos 30E e 70E. É também notável a estreita correspondência entre a localização de C_2 e D_2 da Fig. 5 e a localização de A_2 e B_2 da Fig. 4.

Uma análise mais cuidada da Fig. 5 revela que as zonas de mínimos ρ_β/ρ_γ , C_1 , C_2 , D_1 e D_2 , estão rodeadas por quocientes ρ_β/ρ_γ superiores à unidade.

Pretende-se agora consubstanciar a análise e interpretação dos dados de campo a partir da sua comparação com resultados obtidos por simulação física de modelos de geometria simples.

4 — SIMULAÇÃO EM MODELOS REDUZIDOS

A simulação física fornece material de interpretação referente a modelos bidimensionais que pode ser confrontado vantajosamente com dados de campo. Esta via de interpretação de medidas de resistividade tem sido seguida por vários autores: Apparao (1979), Karwatowski e Habberjam (1981), Militzer *et al.* (1979). Assim desenvolveu-se, na Universidade de Aveiro, um tanque de simulação física e associado sistema de controlo e automação que permite obter rapidamente informação valiosa para a interpretação de observações de campo.

Uma vez cheio o tanque de água salgada, imergiu-se nela um cilindro isolador de PVC, com 5,5 cm de raio. Sobre este modelo bidimensional simples realizaram-se sondagens eléctricas Wenner, com valores de a (Fig. 1) de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16 e 24 cm. Estas sondagens foram efectuadas sobre um perfil com direcção perpendicular ao eixo do cilindro, sendo esta também a direcção do dispositivo Wenner tripotencial usado. É óbvio que a escolha desta direcção se deve à orientação dos perfis de sondagens de campo em relação ao traçado conhecido da gruta, como se pode ver na Fig. 2.

A recolha de medidas restringiu-se a uma zona em que os efeitos das paredes e do fundo do tanque são constantes.

As secções de tanque de resistividade aparente α estão na Fig. 6. A secção superior da Fig. 6 refere-se a uma profundidade do topo do modelo de 1,5 cm, enquanto que a secção central corresponde a uma profundidade de 3 cm e, finalmente, a secção inferior a uma profundidade de 6 cm.

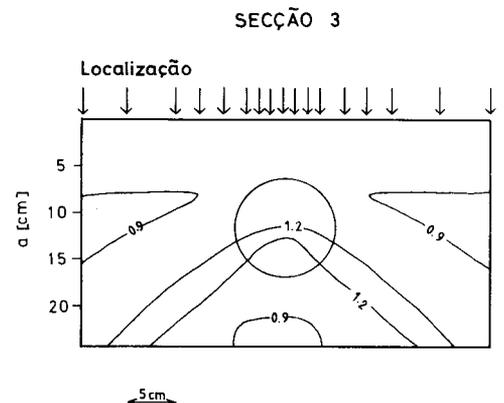
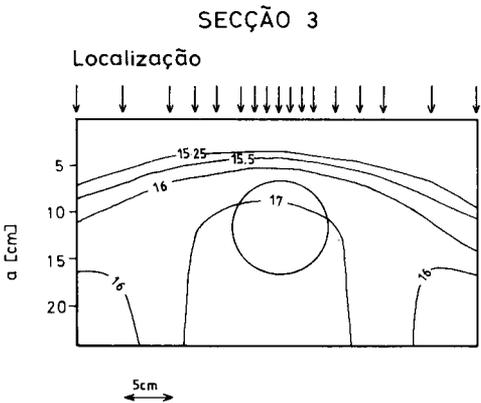
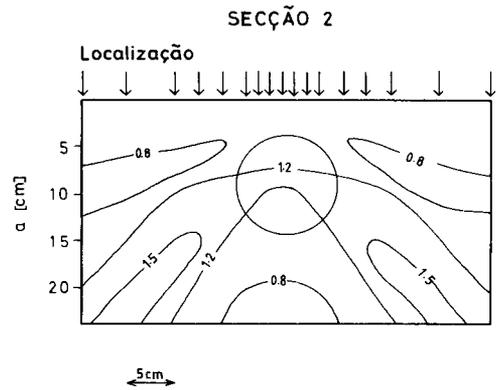
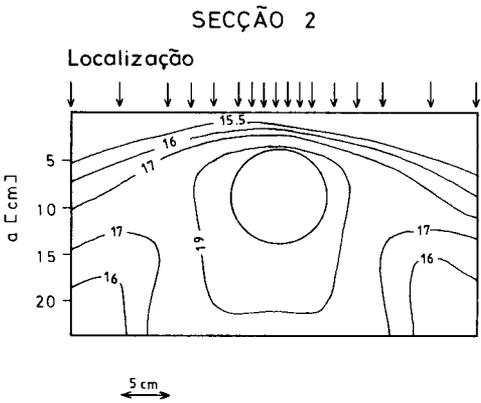
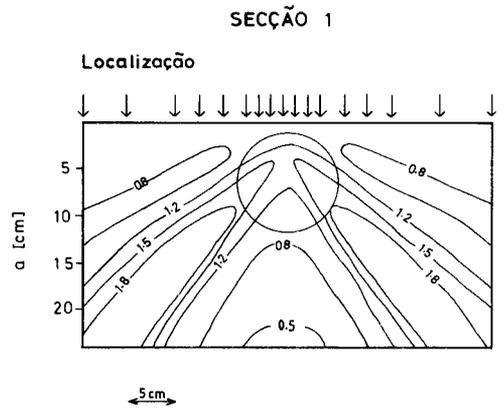
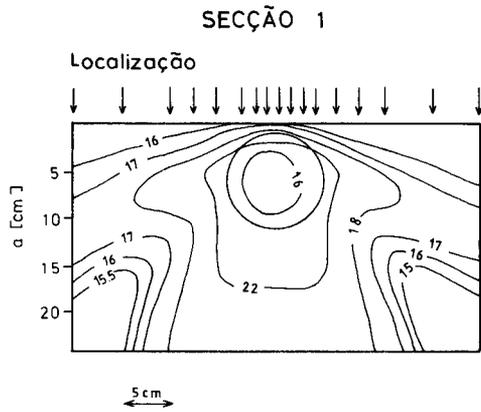


Fig. 6 — Secções de resistividade aparente α referentes a um cilindro de 5,5 cm de raio. A secção 1 corresponde a uma profundidade ao topo do cilindro de 1,5 cm; a secção 2 corresponde a uma profundidade de 3 cm; a secção 3 corresponde a uma profundidade de 6 cm. Nota: as setas indicam a localização das sondagens eléctricas

Fig. 7 — Secções do quociente ρ_β/ρ_γ referentes a um cilindro de 5,5 cm de raio. A secção 1 corresponde a uma profundidade ao topo do cilindro de 1,5 cm; a secção 2 corresponde a uma profundidade de 3 cm; a secção 3 corresponde a uma profundidade de 6 cm. Nota: as setas indicam a localização das sondagens eléctricas

Estas secções foram construídas dum modo análogo às de campo, sendo a localização das sondagens dada pelas setas no eixo das abcissas. As linhas de isorresistividades consideradas foram: 15,5, 16, 17, 19, 22 e 26 ohms.m.

A análise das secções da Fig. 6 mostra que as curvas de isorresistividade por um lado não são paralelas entre si, e por outro lado assumem valores máximos sobre a posição do cilindro, denunciando a sua presença. Este comportamento é semelhante ao observado nas secções de resistividade aparente de campo da Fig. 4.

Na Fig. 7 mostram-se as secções do quociente ρ_b/ρ_γ referente ao modelo em estudo. Esta figura foi organizada dum modo idêntico ao da Fig. 6. No entanto, no caso do quociente ρ_b/ρ_γ foram traçadas as isolinhas correspondentes aos valores de 0,2, 0,5, 0,8, 1,2, 1,5, 1,8 e 2,1. Todavia, no caso da secção inferior da Fig. 7, isto é, para uma profundidade ao topo do cilindro de 6 cm, foi introduzido o contorno 0,9, pois não se observam valores inferiores a 0,8.

A análise das secções da Fig. 7 mostra que, para qualquer delas, se desenvolve uma zona de valores ρ_b/ρ_γ menores que 1 situada imediatamente abaixo do modelo. Todavia estas zonas estão rodeadas por outras em que os valores daquele quociente são superiores à unidade.

Este comportamento tem semelhança notável com o das medidas de campo da Fig. 5.

Se se considerar que o terreno que envolve as cavidades no campo é homogêneo e que estas têm uma secção aproximadamente circular, isto é, aproximando as condições de campo ao modelo simples testado laboratorialmente, podem-se propor profundidades para os corpos responsáveis pelas anomalias registadas.

Nas secções da Fig. 7, os valores de ρ_b/ρ_γ superiores à unidade têm um comportamento semelhante em qualquer delas, isto é, estes valores passam pelo centro do modelo enquanto que os valores de $\rho_b/\rho_\gamma < 1$ se desenvolvem abaixo do modelo cilíndrico usado. Por isso, comparando com a Fig. 5, propõe-se que o centro do corpo anómalo C_1 se situa no ponto 50W a uma profundidade entre 10 a 15 m; o centro de D_1 se situa no ponto 60E a uma profundidade inferior a 10 m; o centro de C_2 se situa no ponto 60W a uma profundidade compreendida entre 15 a 20 m e o centro de D_2 situa-se no ponto 60E a uma profundidade inferior a 10 m.

É no entanto de notar nas secções referentes ao modelo, o aparecimento de áreas laterais de valores ρ_b/ρ_γ menores que a unidade, áreas estas situadas acima da faixa de valores ρ_b/ρ_γ maiores que a unidade. Pontualmente, as medidas de campo mostram zonas que seriam equivalentes àquelas áreas, nomeadamente a zona de valores ρ_b/ρ_γ na extremidade superior direita das secções de campo e a parte superior central das mesmas.

5 — CONCLUSÕES

Do presente artigo parece-nos importante extrair que o uso de técnicas tripotenciais de resistividade pode ser uma valiosa ferramenta na detecção de cavidades subterrâneas. De facto, se as secções de resistividade aparente α fornecem informação de natureza qualitativa bastante

importante, as secções do quociente ρ_B/ρ_γ ampliam sobremaneira aquela informação. Uma vez conhecido o comportamento de ρ_B/ρ_γ na presença de cavidades é não só possível interpretar qualitativamente os dados de campo mas, também, avançar numa interpretação de carácter semiquantitativo, como foi demonstrado no presente artigo.

A interpretação aqui apresentada aponta para a existência de uma cavidade localizada sobre a parte conhecida da gruta da nascente do Almonda, anomalias B_1 e B_2 da Fig. 4 e D_1 e D_2 da Fig. 5, tendo estas anomalias o mesmo alinhamento que o das grutas. No entanto a interpretação também sugere a existência de outro alinhamento de anomalias, A_1 A_2 na Fig. 4 e C_1 C_2 na Fig. 5, que poderão corresponder a uma cavidade não conhecida. De referir que este segundo alinhamento é paralelo ao primeiro e ao das grutas já conhecidas.

Claro que o procedimento tripotencial pode ser mais moroso no campo. No entanto o uso de comutadores apropriados abrevia este problema. Assim, no presente trabalho um grupo de quatro pessoas realizou cinco a seis sondagens eléctricas por dia. Parece-nos, contudo, que o uso de multicabos em trabalho de campo vai não só aumentar o número de sondagens/dia mas também diminuir a mão-de-obra necessária.

AGRADECIMENTOS

Cumpre-nos desde já agradecer o apoio prestado pelo Núcleo de Espeleologia da Associação de Estudantes da Universidade de Aveiro e à Eng.^a Isabel Moutinho que, no âmbito do seu programa de Estágio em Engenharia Geológica no ano de 1987, colaborou neste trabalho. Finalmente, agradece-se à Maria da Graça Marques a execução dos desenhos.

BIBLIOGRAFIA

- ACWORTH e GRIFFITHS (1985) — *Simple data processing of tripotential apparent resistivity measurements as an aid to the interpretation of subsurface structure*. «Geophysical Prospecting», vol. 33, 861-887.
- AFONSO, A. R. A. (1987) — *Prospecção geoelectrica em meios cárnicos*. «Geolis», vol. 1, 124-133.
- APPARAO, A. (1979) — *Model tank experiments on resolution of resistivity anomalies overburied conducting dykes — inline and broadside profiling*. «Geophysical Prospecting», vol. 27, 835-837.
- BATES, E. F. (1973) — *Detection of subsurface cavities*. Miscellaneous paper 5-73-40, U. S. Army Engineers Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss.
- BRISTOW, C. M. (1966) — *A new graphical resistivity technique for detection of air-filled cavities*. «Studies in Speleology», vol. 7, part. 4, 204-227.
- CARPENTER e HABBERJAM, G. M. (1956) — *A tripotential method of resistivity prospecting*. «Geophysics», vol. 21, 455-469.
- HABBERJAM, G. M. (1969) — *The location of spherical cavities using a tripotential resistivity technique*. «Geophysics», vol. 34, 780-784.
- HABBERJAM, G. M. (1979) — *Apparent resistivity observations and the use of square array techniques*. Gebruder Borntraeger, Berlin.

- KARWATOWSKY e HABBERJAM, G. M. (1981) — *A tunnel resolution investigation using an automated resistivity tank analog*. «Geophysical Prospecting», vol. 29, 891-905.
- MILITZER, RÖSTER e LÖSCH (1979) — *Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods*. «Geophysical Prospecting», vol. 27, 640-652.
- MOUTINHO, I. (1987) — *Relatório de Estágio em Engenharia Geológica*. Univ. Aveiro (relatório interno).
- PEREIRA, M. M. (1986) — *Avaliação de métodos de resistividade eléctrica na detecção de cavidades*. LNEC.