DETECÇÃO E DISCRIMINAÇÃO DE CAVIDADES SUBTERRÂNEAS POR MÉTODOS TRIPOTENCIAIS ELÉCTRICOS — ESTUDO EXPERIMENTAL

Detection and resolution of subsurface cavities using electric tripotential methods — experimental study

MANUEL JOÃO SENOS MATIAS*

RESUMO — A localização e determinação das dimensões de cavidades subterrâneas é muito importante no planeamento de trabalhos mineiros, geologia de engenharia e estudos de impacto ambiental.

Este problema pode ser resolvido recorrendo a dispendiosas campanhas de sondagens mecânicas ou utilizando métodos de prospecção geofísica apropriados.

O presente trabalho investiga o uso de métodos tripotenciais eléctricos — Wenner tripotencial — na detecção e discriminação de cavidades subterrâneas, recorrendo a dados obtidos a partir do uso de modelos bidimensionais e isolantes imersos em água.

Por fim, apresenta-se um exemplo de campo.

SYNOPSIS — The location and the determination of subsurface cavities dimensions are very important when planning mining, geothecnical activities and environmental studies.

The problem can be investigated by using appropriate geophysical techniques which are a good alternative to an expensive and dense grid of boreholes.

This paper investigates the use of Wenner tripotential measurements in the detection and resolution of subsurface cavities. Thus data provided by insulating bidimensional models immersed in water are shown and discussed.

Finnaly a field example is given.

1 — INTRODUÇÃO

A detecção de cavidades subterrâneas é um problema importante em Engenharia de Minas, Geologia de Engenharia e estudos de Impacto Ambiental.

A Prospecção Geofísica, envolvendo medições realizadas quer à superfície quer subterrâneas, tem constituído um poderoso instrumento na detecção de cavidades, como demonstram trabalhos de Andrade Afonso, 1987, Karwatowski et al., 1981, Militzer et al., 1979, Frappa et al., 1980, Smith, 1986, entre outros.

Dos métodos de Prospecção Geofísica aplicados à detecção de cavidades sobressaem os da resistividade eléctrica. De facto uma cavidade subterrânea, cheia de água ou de ar, é um excelente alvo para a prospecção eléctrica devido ao elevado contraste de resistividade entre a cavidade e a rocha encaixante. Contudo a detecção destas estruturas por estas técnicas é obviamente limitada pelas dimensões e profundidade a que elas se encontram.

* Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro

No presente artigo aplicam-se as técnicas tripotenciais Wenner, configurações AMNB, ABNM e AMBN (α , β , γ , respectivamente), Acworth et al., 1985, Senos Matias et al., 1989.

Os dados teóricos foram obtidos a partir da imersão de dois cilindros de PVC, paralelos entre si e com diâmetro 5 cm, num tanque de dimensões $180 \times 90 \times 90$ cm^3 com água salgada até uma altura de 75 cm.

Os cilindros foram sucessivamente mergulhados a profundidades, *P* na Fig. 1, de 5, 7,5 e 10 cm — ou seja profundidades iguais a uma vez, uma vez e meio e duas vezes o diâmetro — e utilizando distâncias, *S* na Fig. 1, entre os cilindros de 2,5, 5 e 7,5 cm — ou seja meio, um e um e meio diâmetros.

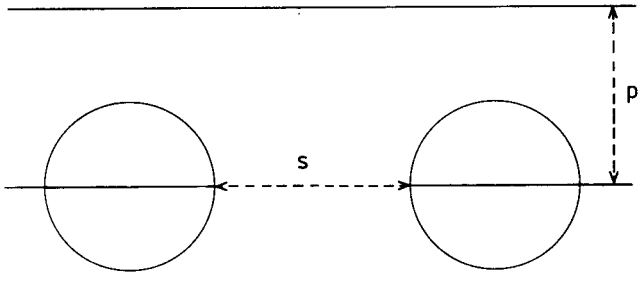

Fig. 1 — Secção recta dos modelos usados
(P-profundidade; S-separação)

Usaram-se pois contrastes de resistividade infinita, esperando-se recolher informação sobre as capacidades de detecção e discriminação do método. Embora a literatura existente seja rica em exemplos do uso de simulação física, estudos de resolução restringem-se a Aparao et al., 1969, e Karwatowski et al., 1981.

O uso de cilindros a simular cavidades é vulgar, pois trata-se de um modelo que se aproxima bem de galerias, túneis, grutas, etc.. Outros autores, Militzer et al., 1979, e Karwatowski et al., 1981, demonstraram ainda que a aproximação por uma secção circular é adequada, pois o comportamento da resistividade depende principalmente da área da secção recta e não da forma dessa mesma secção.

Sobre os cilindros paralelos realizaram-se sondagens Wenner, com valores para a distância interelectródica de 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 e 16 cm. O dispositivo foi orientado paralela e perpendicularmente aos eixos dos cilindros de modo a ser possível analisar os efeitos da orientação do dispositivo nas medidas de resistividade. Estas foram restringidas a uma área em que os efeitos das paredes e do fundo do tanque são constantes.

2 — PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados de tanque foram processados de modo a verificarem-se os erros tripotenciais e a correcção tripotencial foi efectuada, Habberjam, 1979. Foram então calculados os valores da resistividade α e o quociente *Q* entre as resistividades β e γ, Acworth et al., 1985, e Senos Matias et al., 1989.

Contudo, erros de forma e tamanho do dispositivo, que são particularmente severos nos espaçamentos menores, e efeitos de fronteira devidos aos limites do tanque têm de ser

extraídos dos dados. Para tal calibraram-se, ou melhor normalizaram-se, os dados em relação aos obtidos numa região do tanque onde não se fazem sentir os efeitos do modelo, ou seja em relação aos dados obtidos, para cada ensaio, na sondagem mais afastada do modelo.

A normalização das resistividades processou-se dividindo as resistividades observadas para a sondagem *m*, ρ_m , pelas resistividades, obtidas para o mesmo espaçamento, da sondagem padrão, ρ_{st} . Obtiveram-se assim as resistividades normalizadas ρ_{norm} para a sondagem *m*:

$$(\rho_{norm})_m = \frac{\rho_m}{\rho_{st}}$$

Por outro lado a normalização dos quocientes β/γ , *Q*, fez-se tendo em conta que ele toma o valor 1 na ausência de efeitos laterais. Por isso, a normalização também consiste na divisão dos valores observados para a sondagem, pelos da sondagem padrão, considerando o mesmo espaçamento. Isto é:

$$(Q_{norm})_m = (\beta/\gamma_{norm})_m = \frac{(\beta/\gamma)_m}{(\beta/\gamma)_{st}}$$

3 — RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma vez que os dados experimentais foram colhidos usando perfis de sondagens eléctricas, podem-se construir secções de resistividade aparente, Figs. 2 a 4, e secções β/γ, Figs. 5 a 7. Estas secções foram obtidas traçando as linhas de contorno dos valores de resistividade aparente e do quociente β/γ, após a localização das leituras de acordo com a posição da sondagem e espaçamento usados.

As linhas de contorno utilizadas para a resistividade são definidas por $1 + 0.2 \times 2^k$, com k = 0,1, 2, etc., e as para as secções β/γ são definidas por $1 +/- /.0.2 \times 2^k$, k = 0,1, 2, etc.

Cada figura corresponde a uma profundidade e às três separações utilizadas (2./5, 5 e 7./5 cm). Do lado esquerdo das Figs. mostram-se as secções obtidas para uma orientação do dispositivo Wenner perpendicular ($\theta = 90^o$) ao eixo dos cilindros, enquanto à direita se encontram as secções para uma orientação do dispositivo Wenner paralela ($\theta = 0^o$) ao mesmo eixo.

3.1— Secções de resistividade aparente

As secções de resistividade aparente estão nas Figs. 2 a 4.

Como foram colhidos dados referentes aos extremos de orientação do dispositivo Wenner em relação à direcção dos alvos bidimensionais, as secções de resistividade aparente diferem apreciavelmente com a orientação utilizada.

Considerando o contorno 1.02 como o limite de detecção da anomalia, Karwatowski et al., 1981, a área ocupada pela anomalia em qualquer das secções é considerável. A extensão lateral desta área é oito vezes o diâmetro dos cilindros e a sua extensão em profundidade não é possível de limitar, mas é superior a três vezes o diâmetro dos cilindros.

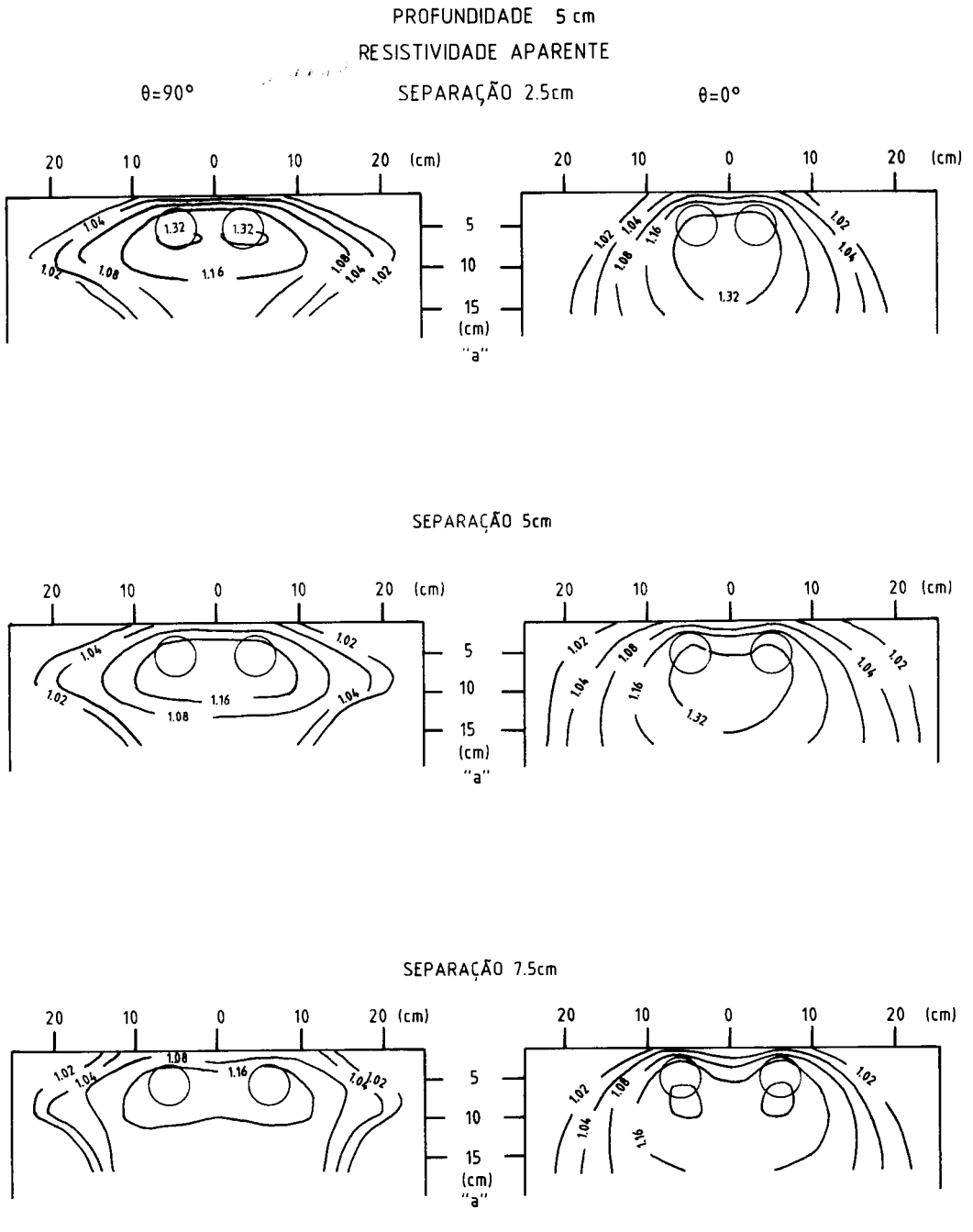

Fig. 2 — Secções de resistividade aparente. Profundidade 5 cm

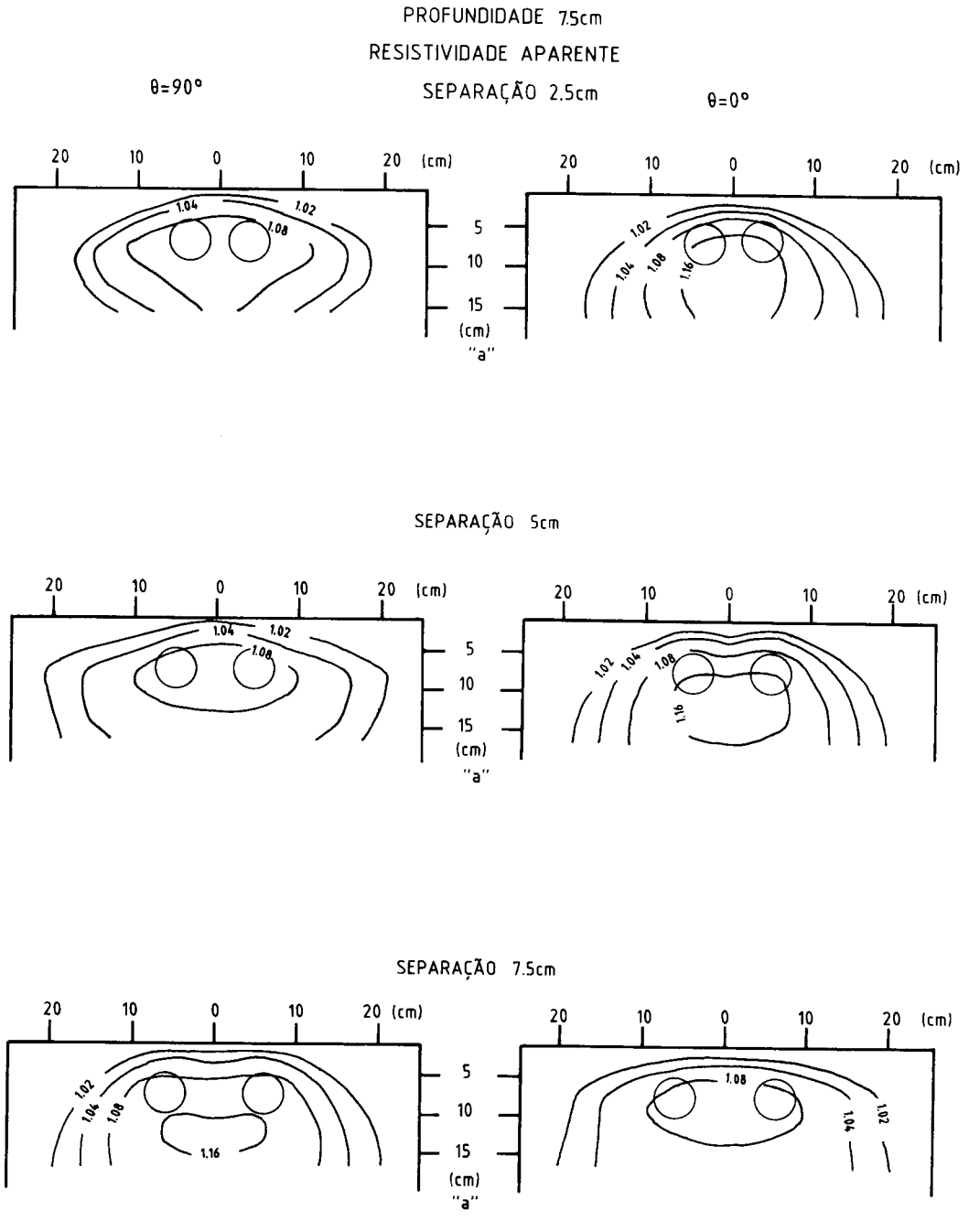

Fig. 3 — Secções de resistividade aparente. Profundidade 7,5 cm

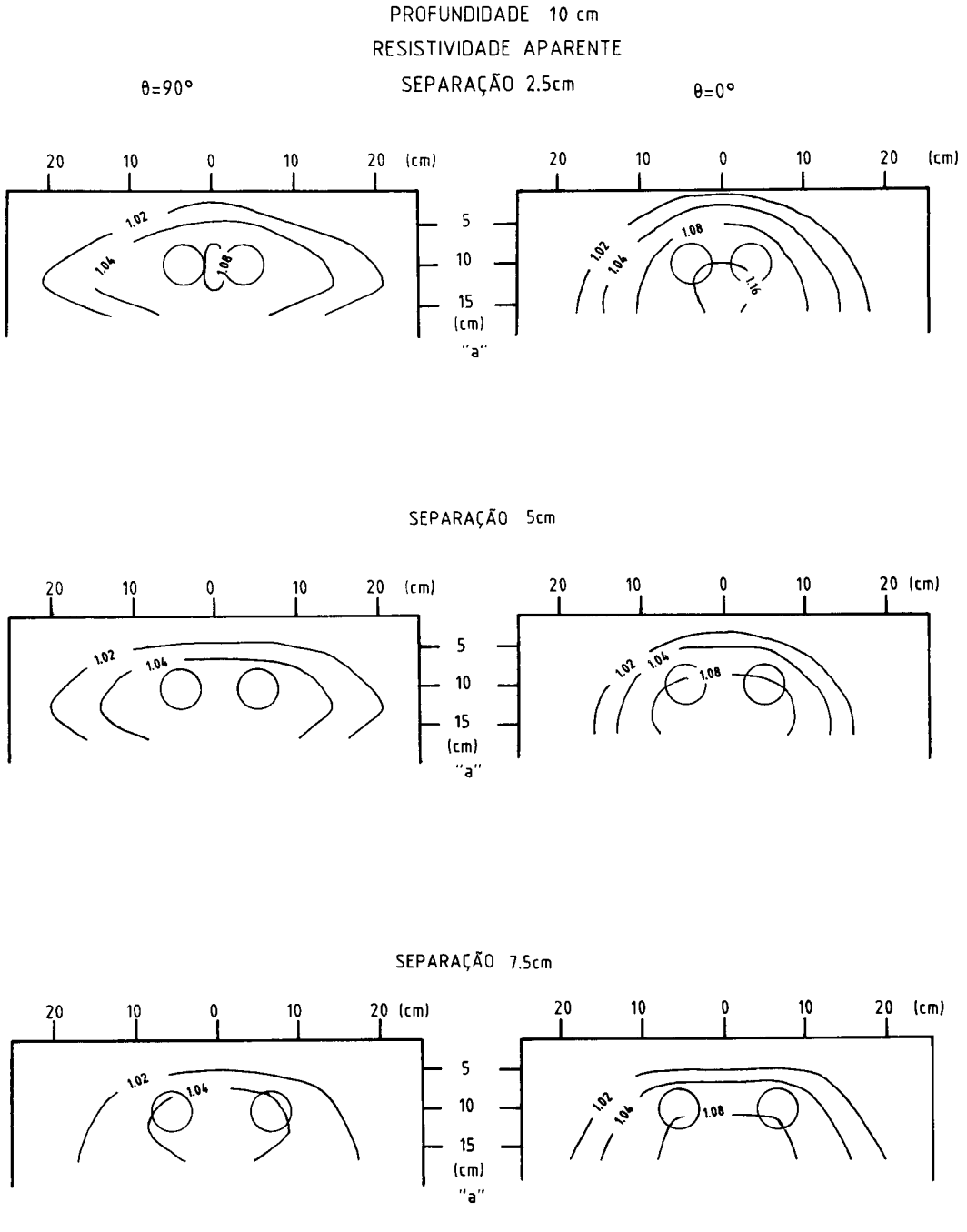

Fig. 4 — Secções de resistividade aparente. Profundidade 10 cm

A magnitude da anomalia diminui com a profundidade do modelo, embora a sua forma genérica se mantenha. A análise das Figs. 2 a 4 revela que a orientação $\theta = 0^o$, dispositivo Wenner paralelo ao eixo dos cilindros, é a que proporciona anomalias de maior magnitude.

A capacidade de discriminação aumenta com a separação, e é evidente a menores profundidades. Assim, para a profundidade de 5 cm, profundidade igual ao diâmetro dos cilindros, é notória a discriminação para uma separação de 7,5 cm, uma vez e meio o diâmetro dos modelos.

A orientação $\theta = 0^o$ é a que discrimina melhor as anomalias.

Para profundidades superiores ao diâmetro dos cilindros, são necessárias separações superiores a 7,5 cm (uma vez e meio o diâmetro), que não foram possíveis utilizar devido ao limitado tamanho do tanque. Todavia observação das secções correspondentes a uma separação de 7,5 cm e profundidade 7,5 cm, Fig. 3, sugere que se está no limiar da discriminação.

Nos casos em que não foi possível discriminar, a anomalia registada é semelhante às observadas para um só cilindro, Senos Matias et al., 1989. Assim, confirma-se que o comportamento da resistividade depende da área da secção recta do modelo e não da sua forma, Militzer et al., 1979.

3.2 — Secções β/γ

As secções β/γ estão nas Figs. 5 a 7.

Analogamente ao que se passou com a resistividade, aparente as secções do quociente β/γ diferem substancialmente com a orientação usada. Saliente-se que o contorno referente ao valor 1 (não representado) no caso de $\theta = 90^o$ passa aproximadamente pelo topo dos modelos, enquanto para a orientação $\theta = 0^o$ passa sensivelmente pelo centro dos cilindros.

No entanto, em todas estas Figs. desenvolve-se uma área de valores de β/γ menores que 1 acima do modelo e outra área de valores superiores a 1 abaixo de modelo. A anomalia apresenta uma grande extensão lateral, oito a nove vezes o diâmetro para $\theta = 90^o$ e cerca de seis vezes o diâmetro para $\theta = 0^o$. A extensão em profundidade também é apreciável embora não seja possível de limitar completamente.

De um modo semelhante à resistividade, a magnitude da anomalia também diminui com a profundidade. Mas no caso do quociente β/γ, é a orientação $\theta = 90^o$ que revela as anomalias de maior magnitude.

A discriminação é tanto maior quanto maior é a separação e menor a profundidade. A orientação que se revela mais favorável para efeitos de discriminação é agora a de $\theta = 90^o$.

No caso da profundidade igual ao diâmetro dos cilindros, Fig. 5, é claro o desenvolvimento de duas anomalias para separações superiores a 5 cm, isto é, o diâmetro do modelo. Assim, entre os cilindros desenvolve-se uma área de valores de β/γ menores que 1; imediatamente abaixo desta área surgem os valores mais elevados para o quociente β/γ. Considerando agora uma profundidade de uma vez e meio o diâmetro, o mesmo efeito é revelado a partir de uma separação de 5 cm (diâmetro do modelo), Fig. 6.

Para profundidades maiores, superiores a duas vezes o diâmetro, a discriminação já não parece ser possível, Fig. 7. Contudo, se se compararem estas secções β/γ com as referentes a um só cilindro, Matias et al., 1989, elas revelam-se bastante semelhantes. Por isso, o quociente β/γ também parece depender mais da área da secção recta dos alvos do que da forma deles, como aliás também fazem supor as outras secções das Figs. 5 e 6 onde a discriminação não é possível.

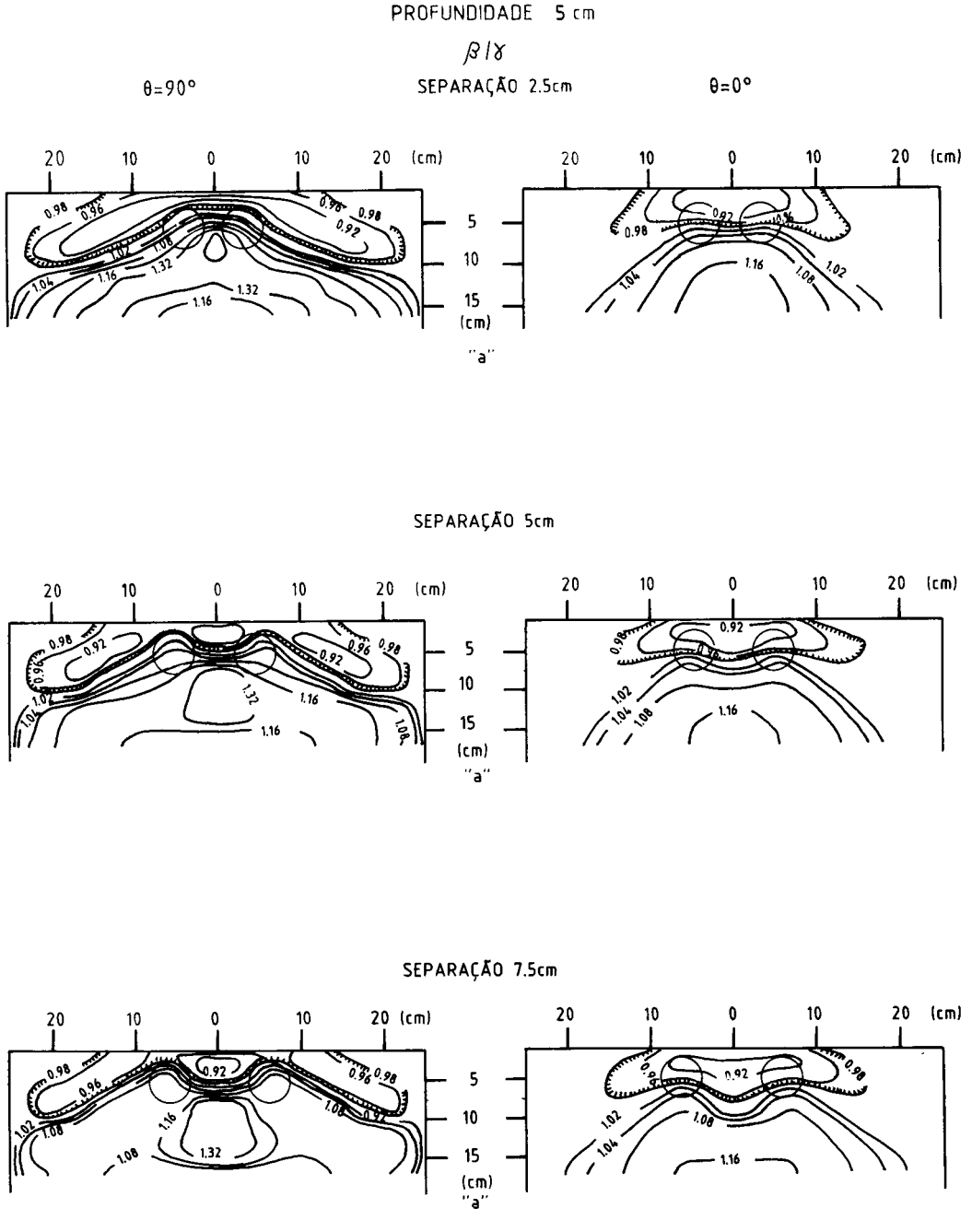

Fig. 5 — Secções β/γ. Profundidade 5 cm

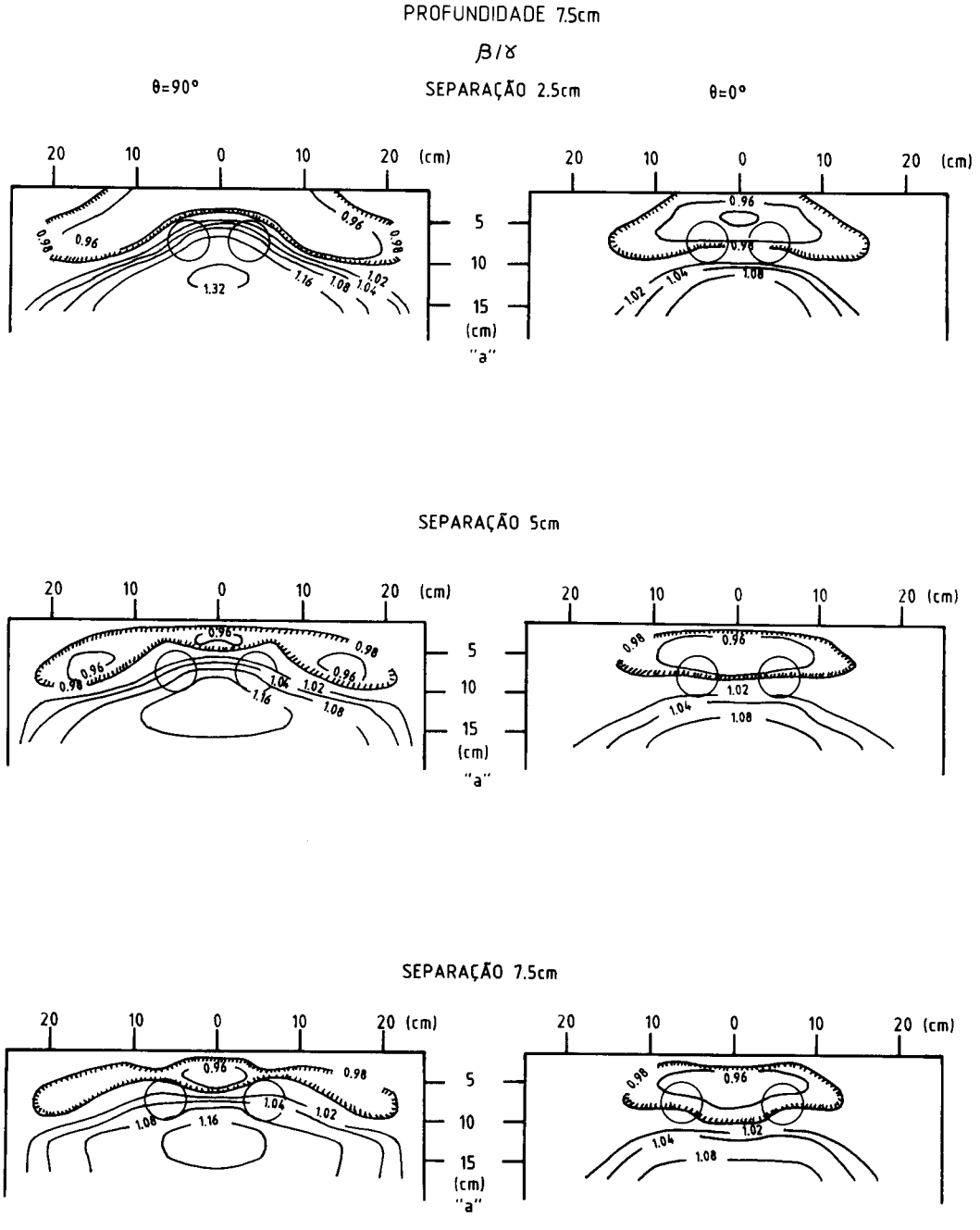

Fig. 6 — Secções β/γ. Profundidade 7,5 cm

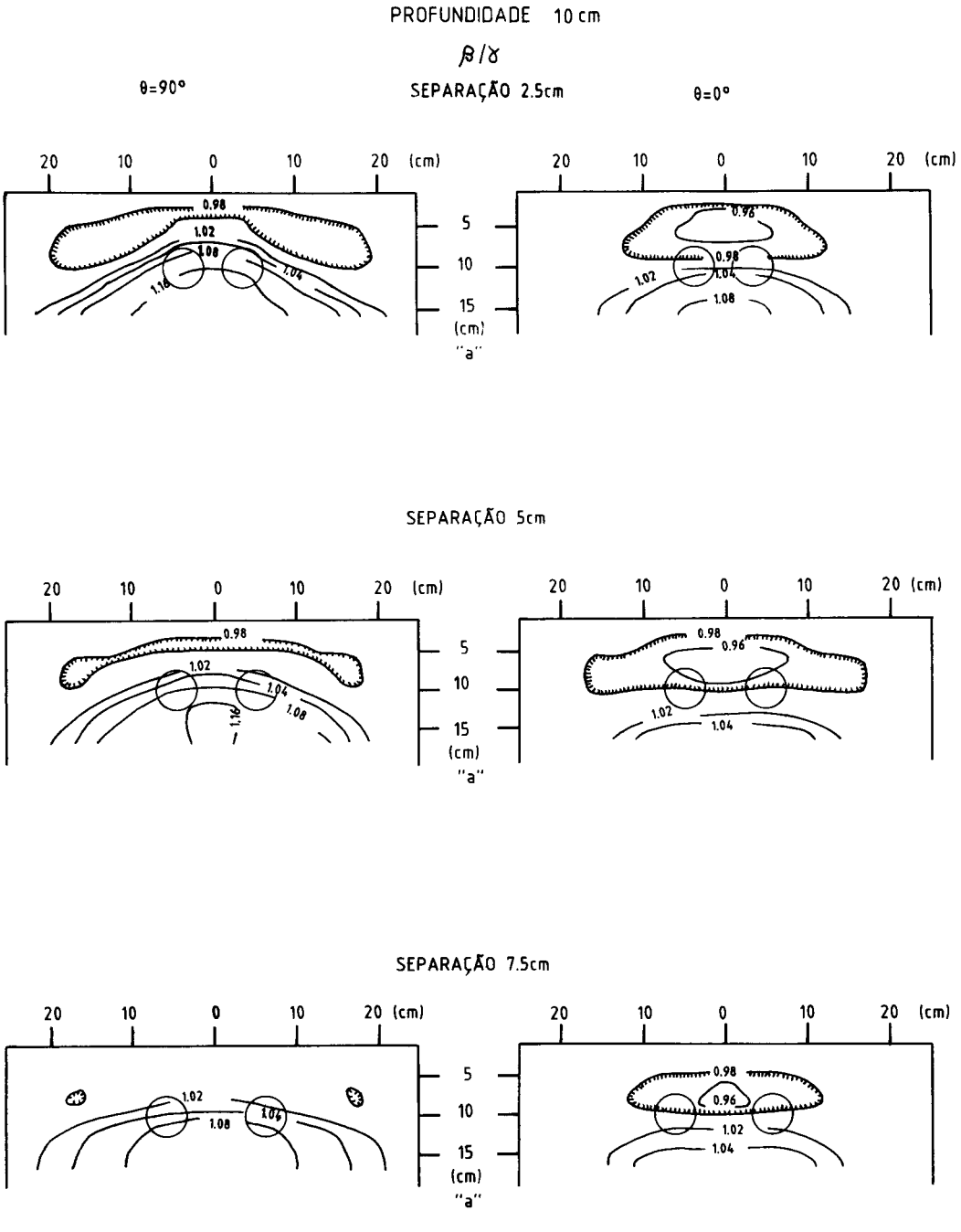

Fig. 7 — Secções β/γ. Profundidade 10 cm

4 — RESULTADOS DE CAMPO

Anteriormente, Senos Matias et al., 1989, interpretaram dados de campo colhidos na nascente do Almonda recorrendo a dados experimentais correspondentes a anomalias provocadas por um único cilindro. Na Fig. 8 mostram-se as secções de resistividade aparente e do quociente β/γ referente a um dos perfis em Senos Matias et al., 1989. Este perfil foi realizado com uma direcção aproximada de $\theta = 90^{o}$, em relação à direcção conhecida das cavidades e foram propostos dois alvos localizados em A_1 e B_1, Fig. 8.

As secções da campo da Fig. 8 devem ser comparadas com as secções das Figs. 2 a 7, correspondentes a uma orientação $\theta = 90^{o}$.

As secções de resistividade aparente referentes a dois cilindros, ao revelarem máximos de resistividade sobre os cilindros, confirmam a interpretação anterior.

Interessante é o comportamento dos valores de campo de β/γ. Considerando a proposta da localização das cavidades em A_1 e B_1, entre elas desenvolve-se uma área de valores daquele quociente menores que 1, e imediatamente abaixo desta zona surgem os valores de β/γ mais elevados, tal como nas secções obtidas por simulação física.

Finalmente o posicionamento relativo das áreas onde o quociente é menor que 1, e das áreas onde ele é maior, é bastante semelhante às secções das Figs. 2 a 7 onde é possível fazer a discriminação das anomalias.

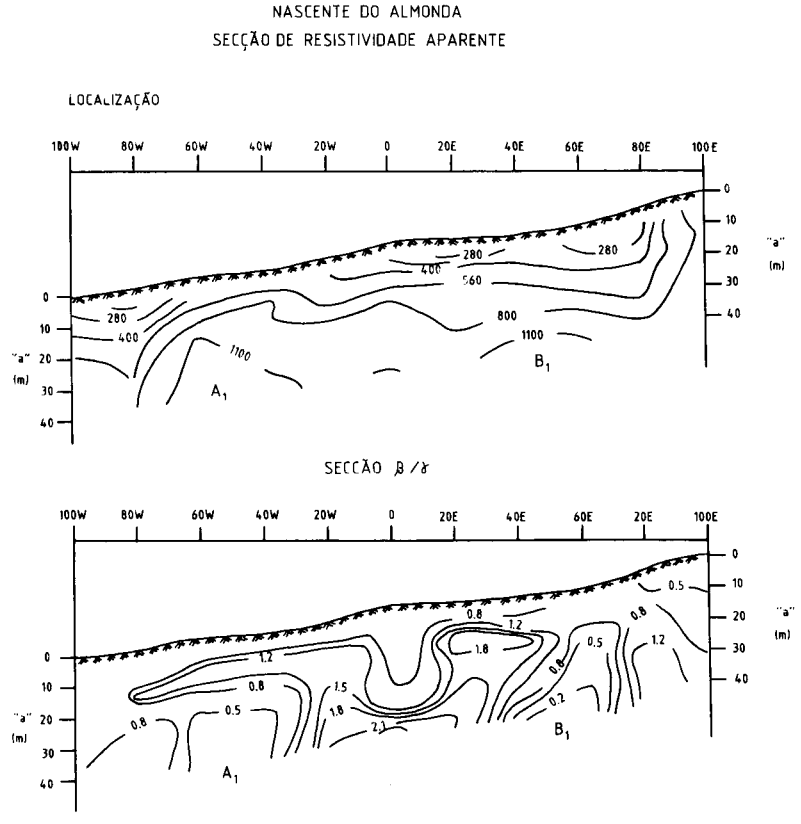

Fig. 8 — Secções de campo — Nascente do Almonda

5 — CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstra que o uso de técnicas tripotenciais apresenta vantagens em relação ao uso simples da resistividade na detecção e discriminação de cavidades.

Para profundidades inferiores a 7,5 cm — ou seja uma vez e meio o diâmetro dos alvos — não é possível realizar a discriminação e, nestes casos, o diagnóstico da forma da cavidade, ou cavidades, não é realizável.

No entanto, o uso das secções β/γ permite a discriminação a profundidades e separações inferiores às permitidas pelo uso simples da resistividade.

Finalmente, os dados aqui discutidos apontam para que a orientação $\theta = 90^{o}$ seja a mais favorável para a detecção e discriminação dos alvos.

6 — AGRADECIMENTOS

O autor deseja agradecer aos Eng.^{os} Rui Baptista, José Passos, Júlio Tavares, Georgina Pimparel e Isabel Moutinho, pela sua colaboração no trabalho experimental e de campo enquanto alunos finalistas do curso de Engenharia Geológica da Universidade de Aveiro, ao Eng.º Fernando Almeida, Assistente do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e à D. Graça Marques pela colaboração nos desenhos.

7 — BIBLIOGRAFIA

ACWORTH AND GRIFFITHS — *Simple data processing of tripotential apparent resistivity measurements as an aid to the interpretation of subsurface structure*, Geophysical Prospecting, 33, 861-887. 1985.

ANDRADE AFONSO, A.R. — *Prospecção Geoeléctrica em meios cársicos*, Geolis, I, 124-133. 1987.

APPARAO, A., ROY, A. AND MALLICK, K. — *Resistivity model experiments*, Geoexploration, 7, 45-54. 1969.

BAPTISTA, R. — *Simulação analógica com o método de resistividade eléctrica na detecção de cavidades*, Relatório de Estágio, Universidade de Aveiro. 1989.

FRAPPA, M. AND MURAOUR, P. — *A seismic method for the detection of subsurface cavities*, Geoexploration, 18, 177-185. 1980.

HABBERJAM, G. — *Apparent resistivity observations and the use of square array techniques*, Gebruder Borntraeger, Berlin. 1979.

KARWATOWSKI, J. AND HABBERJAM, G. — *A tunnel resolution investigation using an automated tank analog*, Geophysical Prospecting, 29, 891-905. 1981.

MILITZER, H., ROSTER, R. AND LOSH, W. — *Theoretical and experimental investigations for cavity research with geoelectrical resistivity methods*, Geophysical Prospecting, 27, 640-652. 1979.

PASSOS, J. J. — *Experiência dos cilindros*, Relatório de Estágio, Universidade de Aveiro. 1989.

PIMPAREL, G. — *Estudo de detecção de cavidades utilizando um tanque analógico*, Relatório de Estágio, Universidade de Aveiro. 1990.

SENOS MATIAS, M. J. E ALMEIDA, F. — *Técnicas tripotenciais de resistividade na detecção de cavidades*, Geotecnia, 56, 19-31. 1989.

SMITH, D. — *Application of the pole-dipole resistivity technique to the detection of solution cavities beneath highways*, Geophysics, 51, 833-837. 1986.

TAVARES, J. — *Aplicação de modelos físicos para avaliação do método de resistividade eléctrica Wenner tripotencial na detecção de cavidades subterrâneas*, Relatório de Estágio, Universidade de Aveiro. 1989.