

*Geociências, Aveiro, 1987, vol. 2, fasc. 1-2, p.*

## SONDAGENS ELÉCTRICAS VERTICAIS, SERÃO MESMO VERTICAIS?

M. J. Senos Matias,

Departamento de Geociências, Universidade de Aveiro  
3800 Aveiro

### RESUMO

Sondagens eléctricas, por vezes chamadas sondagens eléctricas verticais (SEV), têm sido usadas em áreas de geologia complexa, onde a resistividade do terreno pode variar acentuadamente com a direcção do dispositivo electródico de medida. No entanto, mesmo nestes casos, é costume usar técnicas, quer de campo quer de interpretação, desenvolvidas para situações em que a resistividade dos terrenos só varia com a profundidade. No presente artigo as dificuldades inerentes a tal prática são analisadas e ilustradas usando quer dados de campo quer dados provenientes de simulação sobre modelos reduzidos. Em seguida são apresentadas e discutidas técnicas alternativas aplicáveis a áreas em que a resistividade varia com a orientação. Finalmente tecem-se algumas considerações económicas sobre o uso destas técnicas alternativas.

Palavras chave: eléctrica, anisotropia, sondagem, quadrado, vertical, Wenner, offset.

### ABSTRACT:

Electrical soundings, sometimes called vertical electrical soundings (VES), can be used in areas of complex geology, where pronounced orientational variation of resistivity measurements can be encountered. However, even in these circumstances, it is usual to use both field and interpretation techniques developed for models in which resistivity measurements vary with depth only. The present paper discusses and illustrates with field and model data the difficulties inherent to such approach when carrying out and interpreting resistivity soundings in areas of complex geology. Then, alternative techniques more suitable to use in these areas are reviewed and discussed. Finally, economical aspects on the use of these alternative techniques are discussed.

Key words: electrical, anisotropy, sounding, square, vertical, Wenner offset.

### I. INTRODUÇÃO

De entre os métodos eléctricos usados conta-se a técnica vulgarmente conhecida por sondagem eléctrica.

Esta técnica consiste, normalmente, no uso de quatro electrodos, dois de corrente e dois de potencial, dispostos linear e simetricamente em relação a um ponto central. O método consiste em fazer passar corrente eléctrica no terreno a partir dos electrodos de corrente e medir a diferença de potencial produzida entre os dois electrodos de potencial. Ao efectuar uma sondagem eléctrica afastam-se, sucessivamente, os electrodos de corrente do ponto central mantendo, no entanto, a simetria do sistema. Obtém-se pois sucessivos valores de resistividade do terreno, função das distâncias entre os electrodos de corrente, aceitando-se que quanto mais afastados se encontram os electrodos de corrente mais profundo penetra a corrente eléctrica no terreno.

Assim, a aplicação de sondagens eléctricas em terrenos constituídos por camadas homogêneas, isotrópicas e paralelas entre si e, por sua vez, paralelas à superfície topográfica, fornece uma curva de resistividade aparente (Kunetz, 1966) que varia simplesmente com a profundidade.

Daí o atribuir-se às sondagens eléctricas o nome de sondagens eléctricas verticais (VES), nome que se tem vulgarizado na bibliografia (p.e. Orellana, 1982).

O presente artigo tem como finalidade, por um lado, mostrar que a vulgarização do uso do termo "sondagens eléctricas verticais" e dos pressupostos quer de campo quer de interpretação inerentes a esta designação não é correcta e, por outro lado, apresentar e discutir técnicas alternativas que possam ser usadas em áreas de geologia complexa.

## 2. O PROBLEMA

Uma vez obtida, a partir de observações de campo, uma curva de resistividade aparente esta é vulgarmente interpretada em termos de variações verticais da resistividade do terreno. Para tal, é costume comparar a curva de campo com curvas teóricas, calculadas a partir de formulações matemáticas correspondentes a terrenos constituídos por camadas homogêneas, isotrópicas e paralelas (Van Dam e Meulekamp, 1969).

No entanto, é por vezes difícil ajustar a curva de campo às curvas teóricas o que se pode dever à insuficiência de curvas teóricas disponíveis. Todavia, o uso generalizado de computadores na interpretação de sondagens eléctricas permite ultrapassar este problema. Assim, as divergências entre as curvas de campo e as teóricas devem ser atribuídas a outros factores: (i) erros de observação, (ii) erros experimentais ou, então, (iii) o terreno sobre o qual se estão a efectuar as medidas não corresponde às expectativas teóricas do interpretador.

As sondagens eléctricas têm sido usadas em variados ambientes geológicos. Em particular, se as áreas em questão forem de geologia complexa, apresentando camadas incluídas, falhas, contactos ou outros acidentes estruturais é de esperar variações laterais de resistividade que contribuem para a forma das curvas de sondagem eléctrica. Mesmo em ambientes sedimentares, variações laterais de granulometria e de porosidade podem levar a acentuadas variações laterais de resistividade.

Nestas circunstâncias é vulgar as medidas de resistividade aparente apresentarem substanciais variações com a orientação do dispositivo eléctrico de medida e, por isso, a interpretação baseada simplesmente na comparação com curvas padrão conduzirá a erros grosseiros.

## 3. SONDAGENS ELÉCTRICAS EM TERRENOS QUE APRESENTAM VARIAÇÕES LATERAIS DE RESISTIVIDADE

Pretende-se agora discutir e exemplificar os efeitos das variações laterais da resistividade em curvas de sondagens eléctricas. As curvas representadas nas Figs. 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem a sondagens eléctricas realizadas com o dispositivo quadrado (Habberjam e Watkins, 1967b), Fig. 8. Nas referidas Figs. marcou-se em abcissas o lado do quadrado, em metros (Fig. 1, 2 e 4) ou em centímetros (Figs. 3 e 5), e em ordenadas a respectiva resistividade aparente, em ohms.m (Figs. 1, 2 e 4) ou em Ohms.cm (Figs. 3 e 5).

O facto de se ter usado o dispositivo quadrado deve-se a que, para a maior parte da gama dos valores de anisotropia normalmente encontrados no campo, o dispositivo quadrado é o que oferece medidas de resistividade com maior estabilidade orientacional (Habberjam, 1979).

Na Fig. 1 encontram-se as curvas de resistividade aparente obtidas para as duas orientações extremas do dispositivo quadrado A e B, isto é quadrados orientados a 45° um do outro (Habberjam, 1979).

As duas sondagens foram efectuadas exactamente no mesmo local sobre um terreno que se pode considerar constituído por duas camadas. Uma primeira tomada como terreno

de cobertura e, uma segunda constituída por bancadas calcáreas inclinando menos de  $30^\circ$ . Como se pode ver na Fig. 1 as duas curvas são praticamente coincidentes e, podem-se comparar usando o chamado coeficiente de semelhança -- CS -- (Habberjam, 1970). O CS entre elas é de  $10^{-4}$  o que corresponde a uma diferença entre elas inferior a 5%.

Como seria de esperar sobre este tipo de terreno, com inclinações suaves, não se fazem sentir variações orientacionais da resistividade pronunciadas.

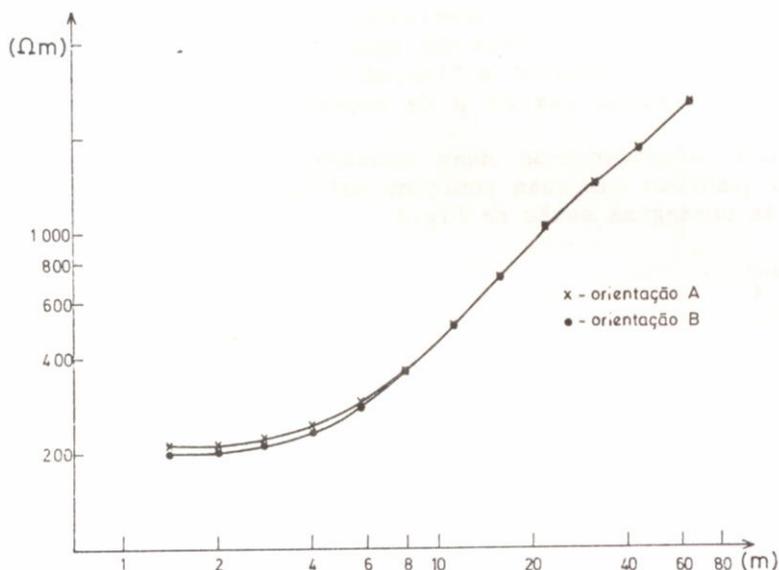


Fig. 1 - Sondagem eléctrica sobre um terreno com um bedrock constituído por bancadas calcáreas.

Na Fig. 2 mostram-se as curvas de resistividade aparente para as duas orientações extremas do dispositivo quadrado, referente a duas sondagens eléctricas efectuadas no mesmo local e sobre um terreno em que a primeira camada é terreno de cobertura enquanto que, a segunda camada é constituída por xistos com inclinação superior a  $70^\circ$ .

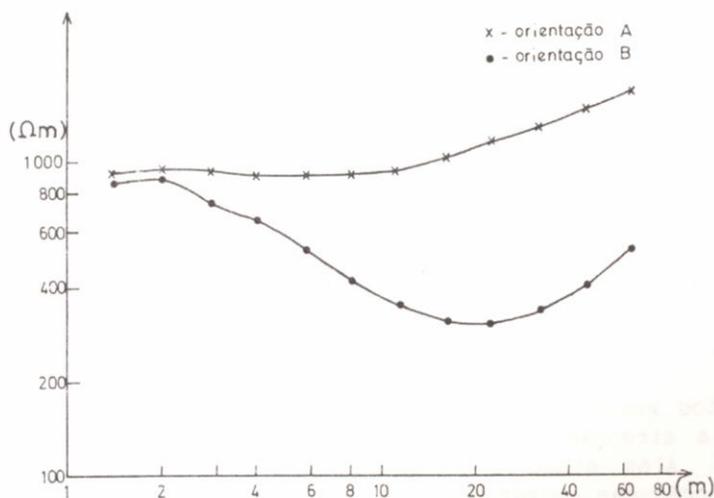


Fig. 2 - Sondagem eléctrica sobre um terreno com bedrock constituído por xisto.

Simple análise da Fig. 2 mostra quão diferente são as duas curvas. O CS neste caso é  $1.5 \times 10^{-1}$  o que corresponde a uma diferença entre as curvas superior 75%! Claro que qualquer interpretação baseada nos pressupostos teóricos previamente enunciados irá conduzir a resultados incorrectos.

Laboratorialmente planeou-se um modelo à escala reduzida que proporcionasse efeitos orientacionais sobre as medidas de resistividade aparente anormalmente elevados. Com base nas discussões de Schlumberger e Leonardon, 1933, construiu-se um modelo consistindo na alternância sucessiva de isoladores e condutores com a mesma espessura. Assim, usaram-se placas verticais de PVC com 6mm de espessura alternando com "placas" também verticais de água salgada de igual espessura. Para aumentar o contraste entre "condutores" e "isoladores" revestiram-se as placas de PVC com folhas de papel de alumínio com  $20 \mu$  de espessura e com uma resistividade de  $3.9 \times 10^{-8}$  ohms.m.

Sobre este modelo efectuaram-se duas sondagens eléctricas, no mesmo local, usando o dispositivo quadrado nas suas posições extremas. As curvas de resistividade aparente referentes às sondagens estão na Fig.3.

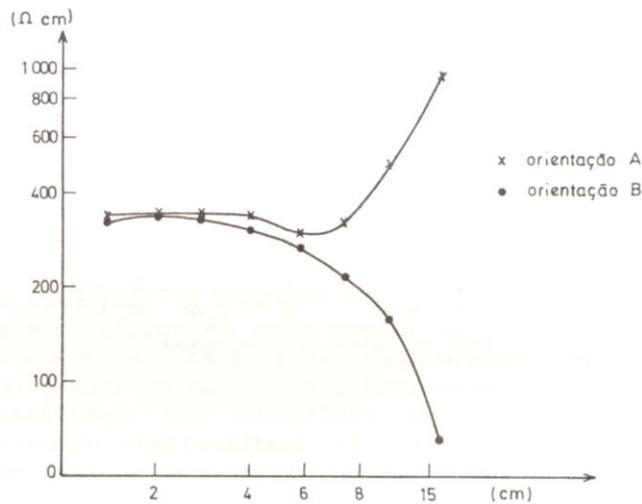


Fig.3 Sondagem eléctrica sobre um modelo reduzido muito anisotrópico

Como se vê, estas curvas são claramente diferentes e, inclusivamente, apontam para interpretações diferentes. De facto, enquanto que a curva referente à orientação A leva a admitir uma segunda camada bem mais resistiva que a primeira, a curva correspondente à orientação B leva a assumir uma segunda camada bem mais condutora que a primeira. O CS para estas duas sondagens é 1.6431 o que corresponde a uma diferença entre as sondagens superior a 100%.

É claro que nos casos discutidos nas Fig. 2 e 3 a resistividade aparente varia substancialmente com a orientação do dispositivo de medida. É, pois, óbvio que o uso geral do termo sondagem eléctrica vertical é claramente posto em causa bem como todos os pressupostos a ele associados.

#### 4. MÉTODOS ALTERNATIVOS USADOS EM "TERRENOS COMPLEXOS"

Várias têm sido as técnicas propostas para resolver os problemas levantados anteriormente.

Como apontamentos gerais, quando do planeamento de sondagens eléctricas, é de boa prática manter a direcção do dispositivo de medida constante durante todos os trabalhos de campo. Além disso é conveniente usar uma direcção do dispositivo perpendicular à direcção das estruturas geológicas. Isto só é possível se se conhecer previamente esta direcção. Este pressuposto nem sempre é válido pois se, por um lado, podem não existir afloramentos, por outro lado, a direcção das estruturas

pode variar na área em estudo.

Para ultrapassar este problema podem-se realizar no mesmo local observações com diferentes direcções, do dispositivo de medida. Normalmente usam-se direcções perpendiculares (Kunetz, 1966). técnica vulgarmente conhecida por sondagens cruzadas. Então, toma-se para valor da resistividade um valor médio das resistividades observadas nas diferentes direcções. No entanto se, por um lado, esta técnica é lenta, por outro lado, a escolha dum valor médio da resistividade pode conduzir a soluções pouco plausíveis. Este procedimento, para as curvas das Figs. 2 e 3, origina as curvas a cheio das Figs. 4 e 5 que, como se pode ver, enfermam dos mesmos problemas que as curvas das Figs. 2 e 3.

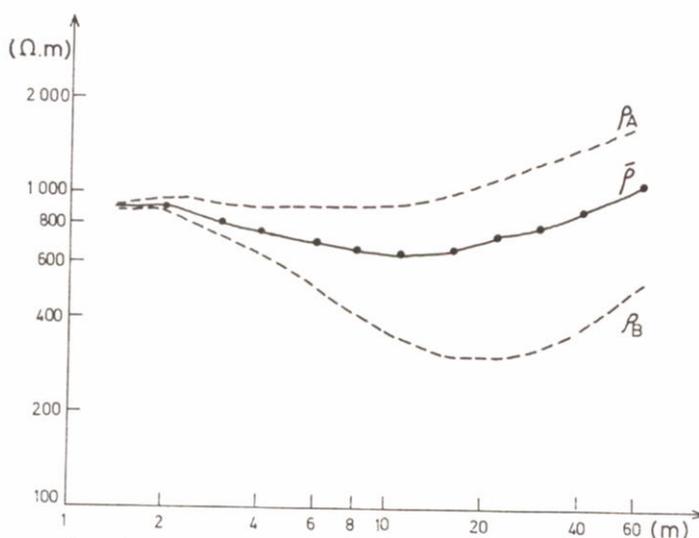


Fig. 4 - Curvas de Resistividade média,  $\bar{\rho}$ , da sondagem eléctrica sobre um terreno com bedrock constituído por xisto.

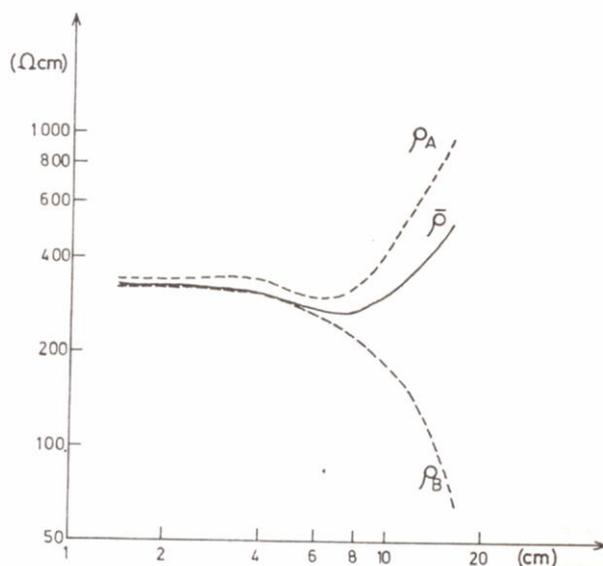
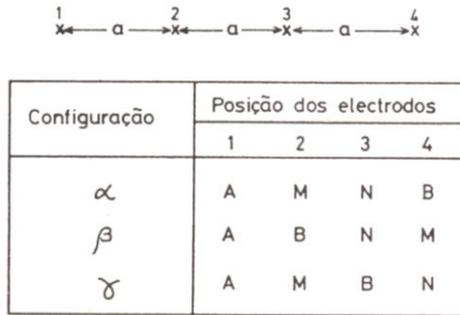


Fig. 5 - Curva de Resistividade média,  $\bar{\rho}$ , da sondagem eléctrica sobre um modelo reduzido muito anisotrópico.

Outras técnicas alternativas têm sido propostas. Assim, Carpenter, 1955, e Carpenter e Habberjam, 1956, propuseram o uso de técnicas tripotenciais em sondagens

eléctricas. Este método consiste no uso de três configurações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  do dispositivo Wenner, Fig. 6, tais que as resistências medidas,  $R_\alpha$ ,  $R_\beta$  e  $R_\gamma$ , estão ligadas por uma relação aditiva:

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

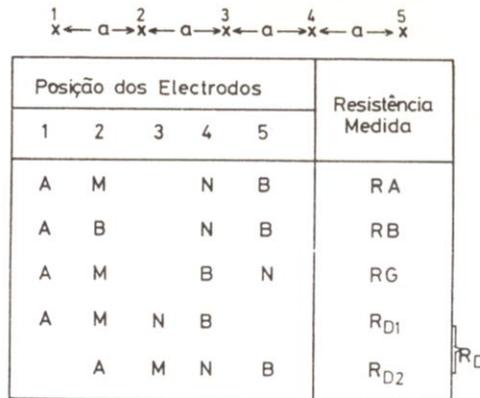


A,B electrodos de corrente  
M,N electrodos de potencial

Fig. 6 - Configurações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  do dispositivo Wenner.

Esta relação permite verificar erros de observação e instrumentais. Além disso, as curvas de resistividade aparente para as três diferentes configurações respondem de modo diferente a variações laterais e variações verticais da resistividade do terreno.

Posteriormente, foi proposto o sistema "Wenner Offset", Barker, 1981, Fig. 7. Este sistema consiste num dispositivo de cinco electrodos, obtendo-se cinco medidas de resistência do terreno, Fig. 7.



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

Fig. 7 - O Dispositivo Wenner offset e as suas diferentes configurações.

Das medidas  $R_{D1}$  e  $R_{D2}$  calcula-se uma média,  $R_D$ , e define-se o "erro do offset" -- e -- do seguinte modo:

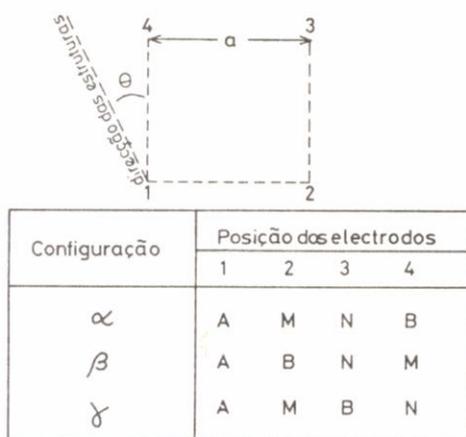
$$e = 100 \times (R_{D1} - R_{D2}) / 2 \quad (\%) \quad (2)$$

Se este "erro" é sistematicamente superior a 10% a interpretação em termos de terrenos constituídos por camadas homogêneas, isotrópicas e paralelas não é aconselhável.

Outra aplicação do método tripotencial é sugerida por Acworth e Griffiths, 1985. Neste caso, também é proposto o uso do dispositivo Wenner tripotencial, Fig. 6, e faz-se uso do quociente entre os valores das resistividades medidas com as configurações  $\beta$  e  $\gamma$  para diagnosticar a presença de efeitos laterais no terreno.

Contudo, todos estes sistemas são colineares e, por isso, é necessário orientá-los favoravelmente em relação à direcção das estruturas, o que pode originar os problemas já discutidos.

Foi, entretanto, proposto o dispositivo quadrado, Habberjam e Watkins, 1967b. Neste dispositivo, Fig. 8, os electrodos encontram-se nos vertices dum quadrado e, do mesmo modo que no dispositivo Wenner, também se fazem três medidas de resistência do terreno,  $R_\alpha$ ,  $R_\beta$ ,  $R_\gamma$ , Fig. 8, que também estão relacionadas pela equação (1).



A,B electrodos de corrente

M,N electrodos de potencial

Fig. 8 - Dispositivo quadrado e configurações  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ .

Neste dispositivo define-se o " coeficiente de heterogeneidade azimutal" (Habberjam e Watkins, 1967b), Q, tal que:

$$Q = 2 \times R_\gamma / (R_\alpha + R_\beta) \quad (3)$$

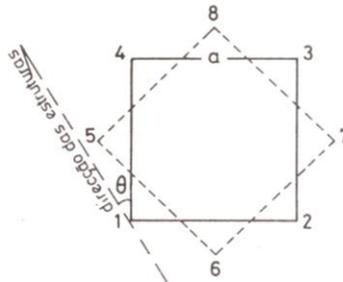
É de notar que, de acordo com a geometria do dispositivo, num terreno constituído por camadas paralelas, homogêneas e isotrópicas o valor de  $R_\gamma$  é zero e, por isso, Q também se anula. Portanto este coeficiente é usado para diagnosticar o tipo de terreno onde se efectuam as observações, embora Q também varie com a orientação (Habberjam, 1979).

Normalmente, os valores de anisotropia dos terrenos variam entre 1 e 2 (Kunetz, 1966) e, para grande parte destes valores, o dispositivo quadrado fornece valores mais estáveis que os dos seus concorrentes colineares (Habberjam, 1979).

No entanto, para áreas onde se suspeitem pronunciados efeitos orientacionais e, onde a direcção das estruturas geológicas seja desconhecida, foi proposto o dispositivo quadrado cruzado (Habberjam, 1975), Fig. 9. O quadrado cruzado obtém-se a partir do quadrado normal por uma rotação de  $45^\circ$  no sentido dos ponteiros do relógio. Com este dispositivo efectuam-se seis medidas de resistência do terreno, como se mostra na Fig. 9.

As duas medidas  $R_\gamma$  e  $R'_\gamma$  só servem para verificar eventuais erros de medida. No entanto, as outras medidas contêm informação a partir da qual se pode obter: (i) a resistividade do terreno, (ii) a estimativa do valor da anisotropia do terreno e

(iii) a estimativa da direcção das estruturas geológicas (Habberjam, 1975). Estes três parâmetros, mesmo em casos de anisotropia elevada (superior a 2), apresentam variações com a orientação inferiores a 5% (Matias, 1983). Exemplos do uso deste dispositivo podem ser encontrados em Matias e Habberjam, 1984 e 1986.



Configuração	Posição dos electrodos								Resistências medidas
	1	2	3	4	5	6	7	8	
$\alpha$	A	M	N	B					$R_\alpha$
$\beta$	A	B	N	M					$R_\beta$
$\gamma$	A	M	B	N					$R_\gamma$
$\alpha'$					A	M	N	B	$R'_\alpha$
$\beta'$					A	B	N	M	$R'_\beta$
$\gamma'$					A	M	B	N	$R'_\gamma$

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

Fig. 9 - Dispositivo quadrado cruzado

Na Fig. 10, mostram-se os parâmetros que podem ser obtidos a partir do uso do quadrado cruzado. Estes dados referem-se a uma sondagem sobre um terreno em que xistos subverticais estão cobertos por formações aluvionares relativamente espessas.

Na parte superior da Fig. 10 pode-se ver a curva de resistividade aparente que é uma curva tipo H. Na parte inferior da Fig. 10 estão outras duas curvas, correspondentes à mesma sondagem eléctrica. A curva a cheio representa a anisotropia calculada e mostra que a partir dum espaçamento (lado do quadrado) de onze metros os valores da anisotropia do terreno são sempre crescentes e superiores a 1.08, demonstrando pois a natureza do terreno em questão. Por outro lado, a curva a tracejado, que corresponde à direcção calculada, mostra que para pequenos espaçamentos ela não revela tendência particular. Contudo, à medida que o espaçamento cresce, e é superior a onze metros, os valores calculados para a direcção das estruturas geológicas tendem claramente para um valor próximo de 25°, o que está de acordo com os dados da geologia da região.

É de salientar que as direcções calculadas se tornam coerentes para valores da anisotropia superiores a 1.08, confirmando experiência anterior (Matias e Habberjam, 1984 e 1986).

Além destas técnicas de campo, métodos de natureza analítica têm sido propostos (Habberjam e Watkins, 1967a, e Tang Muoi, 1986) no intuito de separar os efeitos laterais nos dados duma sondagem eléctrica. Estas técnicas baseiam-se, contudo, em dispositivos colineares cujo uso vai encontrar os problemas já discutidos.

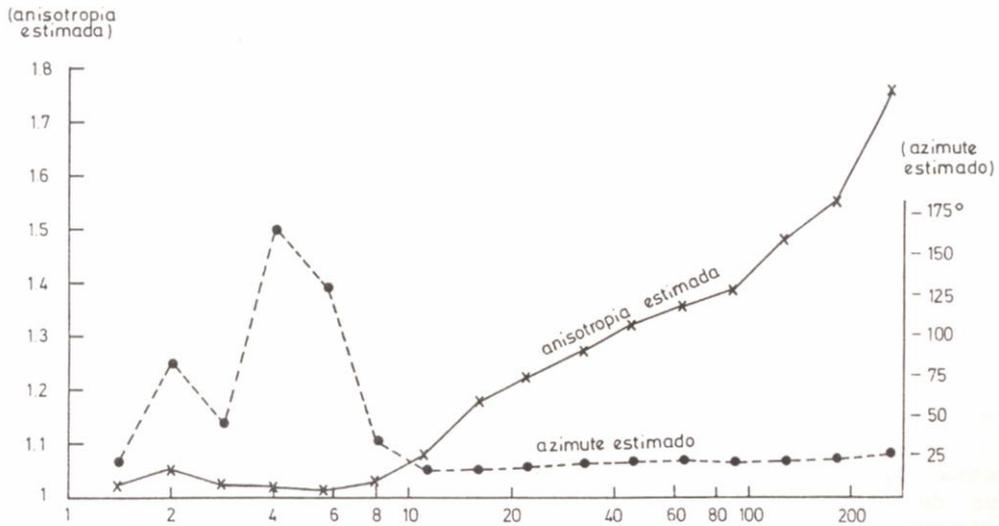
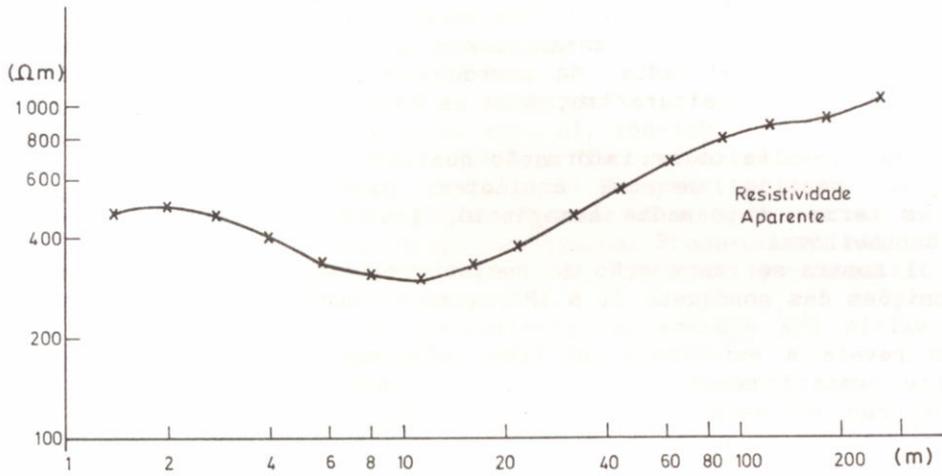


Fig. 10 Dados duma sondagem eléctrica, sobre um terreno com bedrock constituído por xisto, usando o quadrado cruzado.

#### 4.1. Secções de resistividade aparente

Em áreas em que se suspeitem de substanciais efeitos laterais, podem-se efectuar as chamadas secções de resistividade aparente.

Para obter estas secções é usual definir uma linha, segundo uma direcção que intersecte as estruturas bidimensionais esperadas. Sobre esta linha fazem-se sondagens eléctricas, obedecendo a uma orientação previamente definida. As sondagens podem ser equiespaçadas ou não, de acordo com os objectivos e o conhecimento da área.

Então traça-se a secção de resistividade aparente marcando num gráfico os valores de resistividade registados, de acordo com a localização das medidas e o espaçamento utilizado. Nesta altura traçam-se as linhas que unem os pontos de igual resistividade.

Esta técnica permite obter informação qualitativa do terreno e orientar a interpretação no sentido de se aquilatar onde é aconselhável realizar interpretação em termos de camadas homogêneas, isotópicas e paralelas e onde tal prática não é aconselhável.

Na Fig. 11 mostra-se uma secção de resistividade aparente. Em abcissas, estão marcadas as posições das sondagens (1 a 13) e, em ordenadas, os espaçamentos usados, em metros.

A secção revela a existência de três unidades: uma para a esquerda mais resistiva, outra central menos resistiva e, finalmente, outra para a direita que apresenta os valores de resistividade mais elevados da secção. De acordo com a Fig. 11 podem admitir contactos entre as sondagens 1 e 2 e entre as sondagens 8 e 9. Por isso, nas vizinhanças destas sondagens não é aconselhável efectuar interpretação em termos de "sondagens eléctricas verticais". Claro que a secção de resistividade por si só não permite derivar a natureza das formações como seria possível obter no caso de se ter usado o quadrado cruzado.

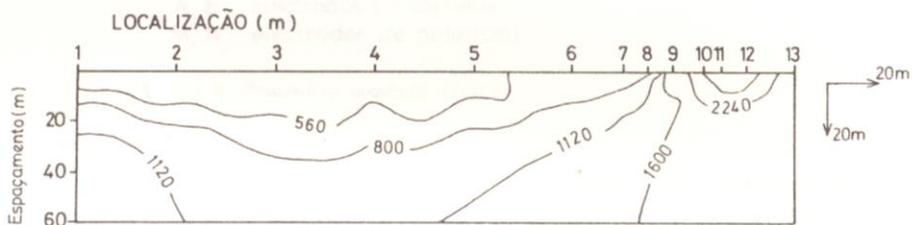


Fig.11 Secção de resistividade aparente

#### 5. Aspectos económicos sobre as técnicas alternativas

Claro que as técnicas alternativas apresentadas são mais lentas que os dispositivos Wenner ou Schlumberger simples. No entanto, as vantagens oferecidas podem compensar largamente o investimento adicional.

O uso de multicabos, do tipo usado em prospecção sísmica, veio acelerar consideravelmente a execução de sondagens eléctricas. Um dispositivo colinear necessita sensivelmente o mesmo comprimento de cabo que o dispositivo quadrado. Usando medidas tripotenciais, o tempo requerido por um dispositivo colinear é semelhante ao requerido pelo quadrado. Todavia, o dispositivo quadrado cruzado leva cerca de 70% mais tempo a executar que o quadrado simples. Contudo, a alternativa ao quadrado cruzado consiste em quatro dispositivos colineares orientados segundo quatro diferentes direcções. Claro que este procedimento é bem mais lento que a técnica do quadrado cruzado.

Finalmente, o dispositivo quadrado é um dispositivo bastante compacto pelo que necessita de menos espaço que os dispositivos colineares equivalentes. No entanto, a necessidade de usar um quadrado, logo quatro direcções, pode levantar restrições ao seu uso devido a topografia acidentada, a vegetação e a construções existentes.

## BIBLIOGRAFIA

- Acworth, R.I. e Griffiths, 1985, Simple data processing of tripotential resistivity measurements as an aid to the interpretation of subsurface structure, *Geophysical Prospecting*, vol. 33, 861-887
- Barker, R. G. 1981, The offset system of electrical resistivity sounding and its use with a multicore cable, *Geophysical Prospecting*, vol. 29, 128-143.
- Carpenter, E. W., 1955, Some notes concerning the Wenner configuration, *Geophysical Prospecting*, vol. 3. 388-402.
- Carpenter, E. W. e Habberjam, G.M., 1956, A tripotential method of resistivity prospecting, *Geophysics*, vol. 21, 455-469.
- Habberjam, G. M. e Watkins, G.E., 1967a, The reduction of lateral effects in resistivity probing, *Geophysical Prospecting*, vol. 15, 221-235.
- Habberjam, G. M. e Watkins, G.E., 1967b, The use of a square array configuration in resistivity prospecting, *Geophysical Prospecting*, vol. 15, 445-467.
- Habberjam, G. M., 1970, The association of resistivity soundings, *Geophysical Prospecting*, vol. 18, 199-214.
- Habberjam, G. M., 1975, Apparent resistivity, anisotropy and strike measurements, *Geophysical Prospecting*, vol. 23, 211-247.
- Habberjam, G. M., 1979, Apparent resistivity investigations and the use of square array techniques, *Geoexploration Monographs*, series 1, nº 9, Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- Matias, M.J.S.e Habberjam, G.M., 1984, A field example of the use of anisotropy parameters derived from resistivity measurements, *Geophysical Prospecting*, vol. 32-725-739.
- Matias, M.J.S.e Habberjam, G.M., 1986, The effect of structure and anisotropy on resistivity measurements, *Geophysics*, vol. 51, 964-971.
- Matias, M.J.S. 1983, The use of field anisotropy measurements on resistivity investigations, PhD thesis, University of Leeds.
- Orellana, E. 1982, *Prospeccion geoelectrica em corriente continua*, Paraninfo, Madrid.
- Schlumberger, C. e M. e Leonardon, 1933, Some observations concerning electrical measurements in anisotropic media and their interpretation, *Am. Inst. Mining and Metallurgical Engineers*, Tech. Pub. 505; *Trans.*, vol. 110, 159-182.
- Tang Muoi, 1986, A method of reducing the lateral effects in resistivity probing, *Geoexploration*, vol. 24, 71-79.
- Van Dam e Meulemkamp, 1969, Standard graphs for resistivity prospecting, E. A. E., Haia.