

# SECÇÕES 2D DO ÍNDICE DE VAZIOS E GRAU DE SATURAÇÃO A PARTIR DE PERFIS DE RESISTIVIDADE E DE REFRACÇÃO SÍSMICA

## 2D SECTIONS OF VOID RATIO AND SATURATION DEGREE FROM COMBINED RESISTIVITY AND SEISMIC REFRACTION PROFILES

Mota, Rogério, *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Lisboa, Portugal, rmota@lnec.pt*

Monteiro dos Santos, Fernando, *Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa e Instituto Dom Luiz, Lisboa, Portugal, fasantos@fc.ul.pt*

### RESUMO

O índice de vazios e o grau de saturação do meio são dois dos parâmetros físicos normalmente considerados na caracterização geotécnica de um terreno. Estes parâmetros são geralmente obtidos a partir de ensaios laboratoriais em amostras seleccionadas, colhidas em sondagens geotécnicas. Com esta técnica obtêm-se resultados que dificilmente podem ser generalizados a toda a zona de interesse. Apresenta-se no presente trabalho uma metodologia para a estimativa daqueles parâmetros, a partir da inversão 2D de dados de sísmica de refração e de resistividade eléctrica. Os resultados finais são apresentados sob a forma de secções bidimensionais do índice de vazios e do grau de saturação.

### ABSTRACT

Void ratio and saturation index are two of the physical parameters usually used in a geotechnical investigation. These parameters are usually obtained from laboratorial tests performed on selected samples collected from geotechnical soundings. The results obtained with this approach are hardly generalized to the all area of investigation. With the present work a methodology is proposed to obtain 2D sections of void ratio and saturation index from 2D inversion of seismic refraction and resistivity data, by a stochastic process.

### 1. INTRODUÇÃO

São diversos os estudos que têm vindo a ser realizados nos últimos anos com o objectivo de melhorar a relação entre os parâmetros físicos medidos em prospecção geofísica e aqueles que interessam para a caracterização geotécnica de terrenos (Carrara et al., 1999; Berge et al., 2000).

De entre os diversos métodos de prospecção geofísica existentes, os mais utilizados em geotecnia têm sido os métodos sísmicos e de resistividade eléctrica.

Sendo os métodos sísmicos mais adequados para o estudo da estrutura e da porosidade do meio (Lines et al., 1993; Guéguen e Palciauskas, 1994) e os métodos geoelectricos para a identificação de fluidos e estimativa da saturação do meio (Wilt et al., 1995a; Wilt et al., 1995b), procurou-se, no trabalho aqui apresentado avaliar o grau de saturação e índice de vazios do meio a partir da combinação destes dois métodos. Com esta abordagem é possível obter uma estimativa da variação destes parâmetros tanto vertical como horizontalmente.

A metodologia aqui apresentada baseia-se na estimativa por meio de um processo estocástico – *Simulated Annealing* - do índice de vazios e do grau de saturação a partir da inversão 2D de

dados de sísmica de refração e de resistividade eléctrica, com recurso à Lei de Archie (Archie, 1942) e à fórmula de Wyllie (Wyllie, 1956). Alguns parâmetros – resistividade e velocidade das ondas sísmicas na água, no ar e para a matriz rochosa, são impostos como constantes ao longo de todo o processo de cálculo.

O resultado final é apresentado sobre a forma de secções bidimensionais do índice de vazios e do grau de saturação, ao longo de um determinado alinhamento.

## 2. SIMULATED ANNEALING

A resolução de problemas de optimização em áreas tão diversas do conhecimento como por exemplo Redes Neurais, Geofísica, Engenharia, Tratamento de Imagens e Economia faz-se com recurso à minimização de uma função custo ou de energia, que descreve o problema. Com esta função pretende-se testar modelos matemáticos do mundo real através do ajuste de diversos parâmetros que descrevem o problema em questão.

Se a função custo tem um mínimo absoluto único, qualquer método de gradiente descendente pode resolver o problema. No entanto, quando essa função tem diversos mínimos locais são necessários métodos mais complexos para atingir o mínimo global (Szu e Hartley, 1987; Mosegaard e Tarantola, 1995; Tsallis e Stariolo, 1996). Estes métodos podem envolver aumentos da energia por forma a sair dos mínimos locais e implicam inúmeros testes de avaliação da energia. Os métodos em questão são métodos estocásticos dos quais um dos mais utilizados é o *Simulated Annealing (SA)*.

O *Simulated Annealing* deve o seu nome à semelhança com o processo de arrefecimento termodinâmico (*annealing*) de um metal fundido até atingir o estado cristalino, correspondente ao mínimo global termodinâmico. Foi originalmente proposto por Metropolis *et al.* (1953), para simulação numérica da equação de estado de um sistema termodinâmico. Posteriormente, Kirkpatrick *et al.* (1983) introduziram um esquema de “temperatura” ( $T$ ) para melhorar a eficiência da busca da solução.

O algoritmo matemático correspondente consiste no seguinte esquema: a partir de um dado estado aleatório inicial a que corresponde uma energia elevada ( $E$ ), com uma determinada temperatura inicial, é introduzida uma alteração aleatória ao modelo. A alteração proposta vai ser avaliada segundo o critério de Metropolis *et al.* (1953): se ocorrer uma diminuição de energia ( $\Delta E < 0$ ) este novo modelo é aceite; se, pelo contrário, se verificar um aumento de energia, vai-se determinar se a probabilidade de Boltzmann ( $P(\Delta E) = \exp(-\Delta E/T)$ ) é inferior a um número aleatório compreendido entre 0 e 1. Se for maior, o modelo é aceite, e passa-se para nova iteração. Se for menor, o modelo é rejeitado, recupera-se o modelo anterior e introduz-se nova alteração aleatória, que por sua vez também vai ser avaliada. Ao fim de um número pré-determinado de sucessos com a mesma temperatura, esta é reduzida e incrementa-se o número de iterações.

## 3. PROCESSO ITERATIVO DE OPTIMIZAÇÃO

Com recurso ao processo de *Simulated Annealing* procurou-se obter secções bidimensionais de grau de saturação e teor em água, a partir da conjugação dos modelos obtidos por inversão independente de dados de resistividade eléctrica e de velocidade de propagação de ondas sísmicas de compressão. Os modelos de resistividade eléctrica foram obtidos com recurso ao programa Res2DInv (Loke e Barker, 1996; Loke, 1999), enquanto os de refração sísmica

foram obtidos a partir do programa RayFract (Schuster e Quintus-Bosz, 1993; Intelligent Resources, 2004).

O processo iterativo de busca das secções de saturação e teor em água, inicia-se com secções uniformes de porosidade e saturação, tendo como função custo ou energia a seguinte expressão:

$$E = \alpha (\rho_{obs} - \rho_{cal})^2 + \beta (V_{obs} - V_{cal})^2 \quad (1)$$

onde  $\rho_{obs}$  e  $V_{obs}$  são a resistividade e velocidade provenientes dos modelos,  $\rho_{cal}$  e  $V_{cal}$ , aquelas obtidas no processo iterativo e,  $\alpha$  e  $\beta$  os pesos atribuídos a cada uma das grandezas. O processo de optimização é assim constringido pelos modelos de resistividade e velocidade de compressão pré-determinados, procurando-se minimizar a diferença entre os valores resultantes dos modelos inversos independentes e aqueles determinados com o processo estocástico.

Os valores de  $\rho_{cal}$  são obtidos com recurso à Lei d'Archie (1942), para meios não saturados:

$$\rho_{cal} = a \phi^{-m} S_w^{-n} \rho_w \quad (2)$$

onde  $\phi$  é a porosidade;  $a$  é uma constante empírica de proporcionalidade, que depende do tipo de meio presente ( $0,6 < a < 1,5$ );  $m$  é o coeficiente de cimentação, que também depende do tipo de material – varia entre 1,3 para areias não consolidadas e 2,3 para rochas compactas, com baixa porosidade;  $S_w$  é o grau de saturação do meio;  $\rho_w$  é a resistividade do electrólito presente nos poros do meio granular saturado e  $n$  é o expoente de saturação (normalmente  $n = 2$ ).

Os valores de  $V_{cal}$ , são determinados com recurso à equação de Wyllie do tempo médio, modificada (Wyllie, 1956):

$$V_{cal} = \frac{1}{\frac{1-\phi}{V_m} + \frac{S_w \phi}{V_w}} \quad (3)$$

onde  $V_w$  e  $V_m$ , são as velocidades de propagação da onda de compressão na água (1.690 m/s) e na matriz, respectivamente. Na Tabela 1 apresentam-se os valores característicos da velocidade de propagação da onda de compressão em alguns materiais, coligidos a partir de diversos autores. Na coluna da direita consta o valor médio de cada intervalo considerado para a velocidade de compressão da matriz em cada célula do modelo.

Considerando a presença de argila nos terrenos, (2) e (3) tomam a seguinte forma, respectivamente:

$$\rho_{cal} = \frac{\rho_w \rho_{cl}}{a \phi^m S_w^n \rho_{cl} + \rho_w} \quad (4)$$

$$V_{cal} = \frac{1}{\frac{(1-\phi)(1-P_{cl})}{V_m} + \frac{(1-\phi)P_{cl}}{V_{cl}} + \frac{S_w \phi}{V_w}} \quad (5)$$

onde  $\rho_{cl}$  é a resistividade da argila;  $P_{cl}$  é a percentagem de argila da matriz e  $V_{cl}$  é a velocidade de propagação da onda de compressão na argila.

Tabela 1- Valores considerados para a velocidade da onda sísmica de compressão da matriz ( $V_m$ ), a partir dos valores tabelados presentes na literatura (adaptado de (Dobrin, 1976; Folque, 1988; Lavergne, 1989) e (Press, 1966) *in* (Darracott, 1976)).

Material	$V_p$ (m/s)	$V_m$ (m/s)
Solos incoerentes	180 - 750	465
Argilas e margas	750 - 1 200	975
Areias e solos grosseiros compactos	1 200 - 2 400	1 800
Arenito	2 400 - 3 000	2 700
Calcário e Granito	3 000 - 6 000	4 500
Gabro e Basalto	6 000 - 7 000	6 500
Dunito	7 000 - 9 000	8 000

#### 4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Apresentam-se os resultados obtidos com dados colhidos em dois locais distintos. No primeiro (Local A - Alentejo), encontramos blocos de granito e xisto, cobertos por areias soltas com algum conteúdo em argila, enquanto no segundo (Local B - Trás-os-Montes) estamos perante um terreno constituído por solo residual sobre granito alterado, por vezes aflorante.

##### Local A

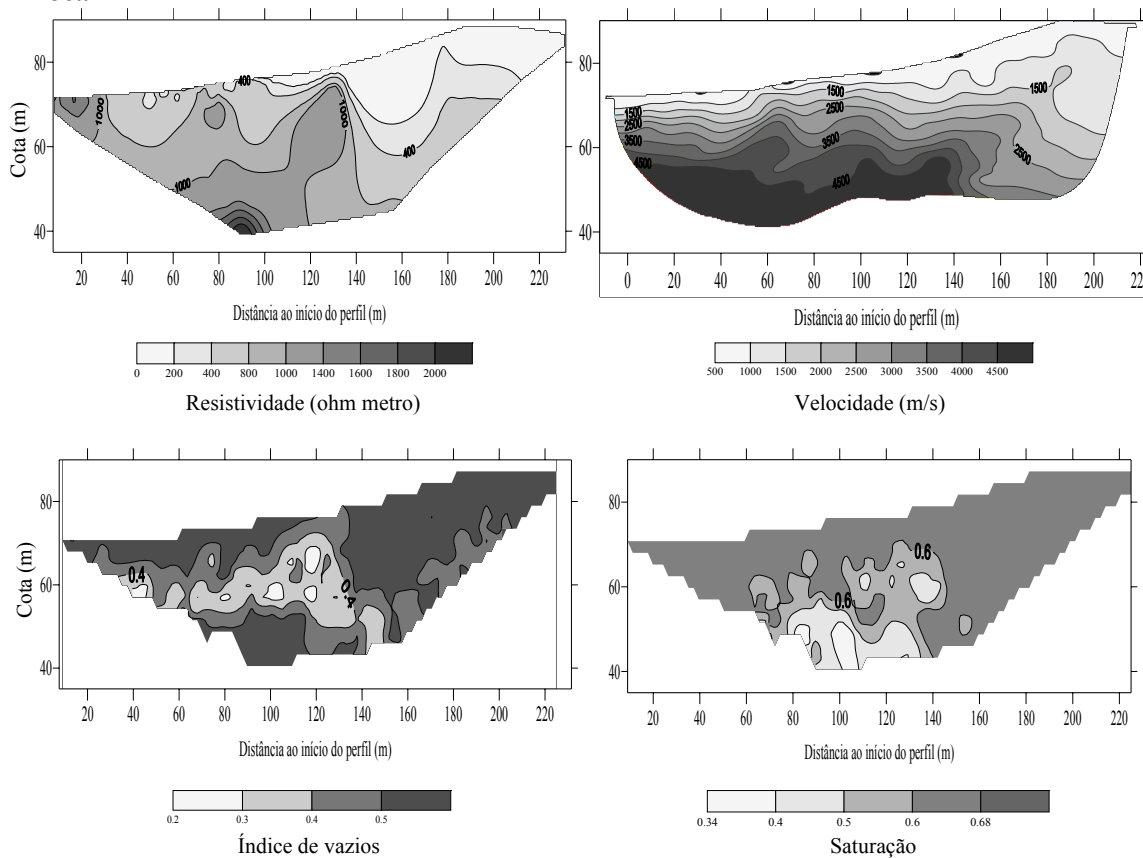


Figura 1 – Topo: Esquerda – modelo de resistividade. Direita – modelo de velocidade de propagação da onda sísmica de compressão (Onda P). Baixo: Esquerda – secção de índice de vazios. Direita – secção de saturação.

A partir da análise dos modelos da resistividade eléctrica do terreno e da velocidade de propagação da onda sísmica, é notória a transição, cerca da coordenada 140, entre o substrato granítico (resistividade mais elevada e velocidade de propagação igualmente mais elevada) e o xistento, assim como o aumento da espessura de solo, sensivelmente a partir da coordenada 100. A má resolução do modelo de resistividade em profundidade entre as coordenadas 80 e 100, induz instabilidade no cálculo do índice de vazios nesta zona, que se traduz numa maximização irrealista do mesmo. Qualitativamente é bom o ajuste entre as zonas onde *a priori* o índice de vazios deveria ser mais elevado – zonas onde se encontram as areias e os xistos, o mesmo acontecendo com o grau de saturação do meio. Quantitativamente não é possível avaliar o ajuste dos valores obtidos, uma vez que não existem valores experimentais destas grandezas neste local.

### Local B

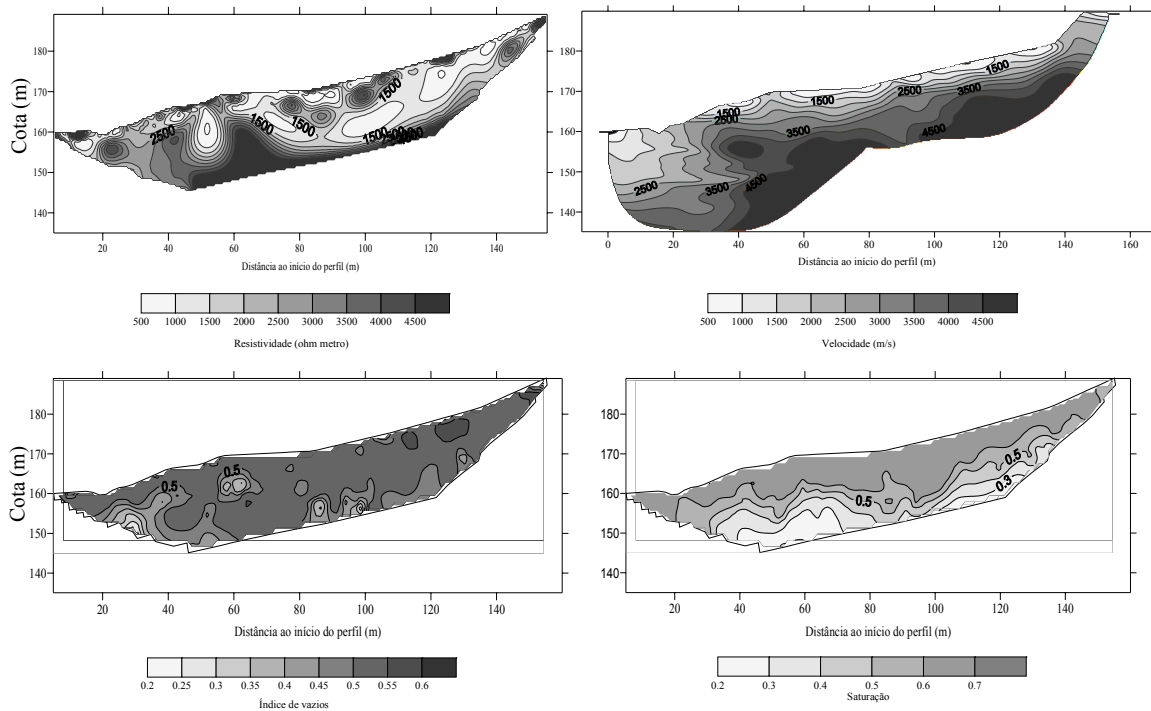


Figura 2 – Topo: Esquerda – modelo de resistividade. Direita – modelo de velocidade de propagação da onda sísmica de compressão (Onda P). Baixo: Esquerda – secção de índice de vazios. Direita – secção de saturação.

Neste local a secção de índice de vazios é relativamente homogénea, o que se atribui ao facto da secção comum a ambos os modelos não atingir a zona do maciço menos alterada, ficando apenas pela camada relativamente homogénea em termos de velocidade de propagação da onda sísmica de solo residual e granito alterado. Tal como no Local A, também aqui não existem valores colhidos *in situ* destas grandezas (índice de vazios e grau de saturação). No entanto, do ponto de vista qualitativo o ajuste das secções obtidas é bom. No caso da secção do grau de saturação, por exemplo, os valores mais elevados da saturação ocorrem onde a resistividade eléctrica é menor, o que é sinónimo de maior preenchimento dos poros do material pelo electrólito condutor da corrente eléctrica.

## 5. CONCLUSÕES

Com os exemplos apresentados pretendeu-se mostrar que, a partir da conjugação dos dois

métodos de prospecção geofísica utilizados, é possível obter-se uma estimativa da variação de parâmetros geotécnicos.

O facto de não se dispor de dados provenientes de amostras colhidas a partir de sondagens de prospecção mecânica, não permitiu comparar, do ponto de vista quantitativo, a variação espacial dos parâmetros geotécnicos obtidos, pelo que estes apenas puderam ser avaliados sob o ponto de vista qualitativo.

## 6. REFERÊNCIAS

- Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoirs characteristics. *Trans. AIME*, 146: 54-62.
- Berge, P.A., Berryman, J.G., Bertete-Aguirre, H., Bonner, B.P., Roberts, J.J. e Wildenschild, D., 2000. Joint inversion of geophysical data for site characterization and restoration monitoring. Relatório UCRL-ID-128343, Lawrence Livermore National Laboratory.
- Carrara, E., Mazzacca, A., Pece, R., Roberti, N. e Vanorio, T., 1999. Evaluation of porosity and saturation degree by laboratory joint measurements of velocity and resistivity: a model improvement. *Pure appl. geophys.*, 154: 211-255.
- Darracott, B.W., 1976. Seismic surveys and civil engineering. *The civil engineer in South Africa*, February: 35-40.
- Dobrin, M.B., 1976. *Introduction to geophysical prospecting*. McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, 630 pp.
- Folque, J., 1988. *Prontuário de engenharia de solos*. Relatório ITG 13, LNEC, Lisboa.
- Guéguen, Y. e Palciauskas, V., 1994. *Introduction to the physics of rocks*. Princeton Univ. Press, New Jersey.
- Intelligent Resources, I., 2004. *Rayfract Manual*.
- Kirkpatrick, S., Gellat, C.D. e Vecchi, M.P., 1983. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220: 671-680.
- Lavergne, M., 1989. *Seismic methods*. Graham Trotman Limited, Londres.
- Lines, L.R., Miller, M., Tan, H., Chambers, R. e Treitel, S., 1993. Integrated interpretation of borehole and crosswell data from a west Texas field. *The Leading Edge*, 12: 13-16.
- Loke, M.H., 1999. RES2DINV - Rapid 2D Resistivity & IP Inversion (Geoelectrical Imaging 2D & 3D).
- Loke, M.H. e Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophys. Prosp.*, 44: 131-152.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, H. e Teller, E., 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*, 1: 1087-1092.
- Mosegaard, K. e Tarantola, A., 1995. Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7): 12431-12447.
- Schuster, G.T. e Quintus-Bosz, A., 1993. Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. *Geophysics*, 58(9): 1314-1323.
- Szu, H. e Hartley, R., 1987. Fast simulated annealing. *Physics Letters A*, 122(3.4): 157-162.
- Tsallis, C. e Stariolo, D.A., 1996. Generalized simulated annealing. *Physica, A* 233: 395-406.

- Wilt, M., Alumbaugh, D.L., Morrison, H.F., Becker, A., Lee, K.H. e Deszcz-Pan, M., 1995a. Crosswell electromagnetic tomography: System design considerations and field results. *Geophysics*, 60: 871-885.
- Wilt, M., Morrison, H.F., Becker, A., Tseng, H.-W., Lee, K., Torres-Verdin, C. e Alumbaugh, D., 1995b. Crosshole electromagnetic tomography: A new technology for oil field characterization. *The Leading Edge*, 14: 173-177.
- Wyllie, M.R.J., Gregory, A. R. , e Gardner, I. W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophysics*, 21(1): 41-70.