CURVAS-PADRÃO DE SONDAGENS ELÉTRICAS PARA AS SEQUÊNCIAS ESTRATIGRÁFICAS BAURU-BASALTO-BOTUCATU DA BACIA DO PARANÁ E SUA IMPORTÂNCIA PARA A PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA*

ANDRÉ DAVINO**

ABSTRACT Theoretical standard curves for geoelectrical soundings are presented for a horizontal tabular stratified media involving the cretaceous sediments of Bauru Group, basalts and sediments of Botucatu Formation, both from Trio-Juro-Lower Cretaceous ages. The parameters used correspond to those of practical hydrogeological problems concerning the Paraná Basin.

INTRODUÇÃO A região de Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo, nos últimos dez anos, vem sendo objeto de pesquisas que visam a avaliar seus recursos hídricos subterrâneos. Essas pesquisas permitiram acumular grande quantidade de dados e informações, tanto geológicas como geofísicas (Davino *et al.*, 1980; Sinelli *et al.*, 1980; Davino *et al.*, 1982).

Pesquisas geofísicas com a mesma finalidade foram levadas a efeito (Davino, 1971 e 1979) em outras regiões da Bacia do Paraná.

Essas experiências forneceram os parâmetros físicos necessários à execução de uma série de curvas-padrão de sondagens elétricas que procuram retratar as diversas situações mais comumente encontradas na prática.

A sequência estratigráfica envolvida é a seguinte:

- A) Grupo Bauru.
- B) Basaltos da Formação Serra Geral do Grupo São Bento.
- C) Formação Botucatu, também do Grupo São Bento.

O Grupo Bauru é de idade cretácica superior e o Grupo São Bento é Trio-Juro-Cretáceo. Para simplificar o modelo, foram feitas as seguintes restrições: 1. não são supostos diabásios intercalados na Formação Botucatu; 2. a Formação Botucatu é "infinitamente" espessa, o que equivale a dizer que não há contraste de resistividade elétrica entre essa formação e as formações anteriores a ela; e 3. não se distingue diabásio do basalto.

Na Fig. 1 estão representados os cortes geológicos dos três casos considerados: I — Formação Bauru-Basalto (ou diabásio)-Formação Botucatu; II — Basalto (ou diabásio)-Formação Botucatu; e III — Formação Botucatu-Pirambóia.

Nos três casos, a *estratificação* geoeletrica, isto é, a sequência das camadas eletricamente homogêneas, com resistividades ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 etc., difere da sequência da estratificação geológica. Os primeiros estratos geoeletricos são criados por condições de intemperismo.

Não é possível correlacionar com exatidão os *estratos geoeletricos* com os termos empregados pelos mecanicistas do solo. Apenas o termo rocha sã apresenta valor de resistividade identificável com o da rocha. Para todo material situado acima da rocha sã, o parâmetro resistividade elétrica varia entre largos limites. Isso decorre do fato de a resistividade de um material não ser função do material em si (com raras exceções), mas, essencialmente, da geometria dos poros, coeficiente de porosidade e da qualidade da água ou ou-

tro fluido contido em seus poros. A interface entre as zonas saturada e insaturada é a mais marcante para a estratificação geoeletrica do manto de intemperismo.

PROGRAMA SONDEL É prática corrente empregar-se o computador para tratar sondagens elétricas. Como o problema a ser resolvido com uma sondagem elétrica não admite solução única, a finalidade desses tratamentos é fornecer diversas hipóteses que conduzam a uma interpretação geológica das medidas geofísicas.

Aliás, é o que se faz também quando se utiliza o método da comparação visual das curvas reais com as curvas dos ábacos pré-calculados. A diferença é que a interpretação com o uso de computador fornece soluções mais compatíveis, com maior rapidez.

Uma sondagem elétrica (S.E.) é uma série de medidas de resistividades aparentes, ρ_a , em função de um deslocamento r de eletrodos. Como ρ_a depende da distribuição das resistividades verdadeiras do subsolo, na vertical da estação de medida, procura-se encontrar essa distribuição a partir dos valores de ρ_a . Neste trabalho, limitar-nos-emos ao caso de estruturas tabulares de camadas homogêneas e isotrópicas. Seja então S a sequência de espessuras e de resistividades que se quer determinar.

Em condições ideais de uma estratificação tabular, com medidas perfeitas de ρ_a , para todo valor de r , existe uma correspondência biunívoca entre ρ_a e S .

Figura 1 — Estratificação geológica e geoeletrica dos três casos tratados neste trabalho. As unidades estratigráficas são: Bauru, basalto-diabásio e Botucatu. As unidades geoeletricas são 1, 2, 3 e 4

* Trabalho feito com auxílio da FAPESP (Proc. 81/0044)

** Geologia, Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil

Infelizmente, esta situação não se verifica jamais na realidade: a uma função ρ_a definida só para alguns valores de r correspondem, dentro dos limites de precisão das medidas, uma infinidade de soluções S . Só considerações estranhas à sondagem elétrica permitem levantar a indeterminação, e o geofísico que deve conduzir "manualmente" sua interpretação encontra-se logo diante de um enorme trabalho que consiste em controlar a validade de numerosas hipóteses. Recorre-se, então, ao computador para liberar a interpretação dessas operações de rotina, puramente mecânicas. A passagem pelo computador dá uma grande eficácia ao estudo das S.E., fornecendo sempre soluções aceitáveis em tempo curto.

Convém em primeiro lugar controlar as medidas e verificar se o diagrama a ser tratado é, de fato, uma S.E. possível. Se, após o controle, subsistem valores aberrantes, conclui-se que ou certas medidas estão perturbadas, ou, então, o subsolo não é tabular. É preciso substituir a curva de campo por uma curva mais próxima, que corresponda efetivamente a uma sondagem elétrica em estratificação tabular.

O programa Sondel, utilizado no presente trabalho, aborda o problema direto, isto é, calcula a S.E. que responde a um modelo teórico dado.

O modelo teórico corresponde a uma sequência de estratos tabulares com espessuras $h_1, h_2, h_3, \dots$ e resistividades $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \dots$, respectivamente, e o dispositivo de medidas é o Schlumberger.

A bibliografia existente sobre o assunto é ampla. Não caberia neste trabalho reproduzir toda a formulação matemática e os diversos modos que os geofísicos se utilizaram para enfrentar o problema. Para consulta, podem-se citar os trabalhos de Kunetz (1966), Kunetz *et al.* (1970) e Ghosh (1971a e b).

Entre os métodos de cálculo de curva de sondagem elétrica a partir de um corte geoeletrico dado, apenas os métodos de convolução permitem resolver o caso de camadas de espessuras e resistividades quaisquer. E o mais utilizado é o método de Ghosh (*op. cit.*), que utiliza, para o dispositivo Schlumberger, um filtro com nove coeficientes.

Um filtro é um conjunto de valores numéricos que permite, admitindo-se um certo erro, encontrar uma solução para a expressão analítica da resistividade aparente em função do dispositivo de eletrodos utilizado e do modelo de terreno escolhido. Tal expressão analítica é de difícil solução numérica, tendo decorrido seis décadas para se chegar à solução preconizada por Ghosh. Para o leitor mais interessado, aconselha-se a leitura do citado trabalho (Ghosh, *op. cit.*).

Esse método consiste primeiramente em calcular uma função de estratificação, ou função de Stefanescu, a partir das espessuras e resistividades de uma sucessão de camadas. Essa função se calcula facilmente por uma fórmula de recorrência. Os valores, inicial e final, da sucessão geoeletrica e a forma da curva dependem dos contrastes de resistividade entre as camadas sucessivas, isto é, da sucessão vertical das camadas resistentes (R) e condutoras (C).

O sucesso do método preconizado por Ghosh (*op. cit.*) resulta do fato de este autor ter conseguido determinar um filtro o mais curto possível. A precisão obtida pelo método preconizado por Ghosh (*op. cit.*) sobre o cálculo das resistividades aparentes, no entanto, depende dos contrastes das resistividades dos estratos; para contrastes que ultrapassem 100, a precisão decai muito. Para aumentar essa precisão, O'Neil (1975) preconizou um outro filtro com 20 coeficientes, que é o recomendado para contrastes de resistividades superiores a 100. Johansen (1975) apresenta um filtro com 141 coeficientes.

As curvas aqui apresentadas foram obtidas com programa Sondel com filtro Johansen. Utilizou-se, para tal, do Centro de Computação do Departamento de Genética da USP de Ribeirão Preto. Um exemplo pode ser visto na Fig. 2. O programa Sondel foi desenvolvido por Bourdin (1979).

CURVAS DO GRUPO I: BAURU-BASALTO-BOTUCATU

As curvas do Grupo I são representativas da sequência em que aparecem rochas do Grupo Bauru, seguidas de basaltos (ou diabásios) e Formação Botucatu (Fig. 1).

Da mesma forma que para as curvas dos grupos II e III, vamos considerar quatro estratos eletricamente homogêneos, a partir da superfície para a profundidade:

1. Parte superior das rochas do Grupo Bauru, de natureza arenosa, não-saturada, pouco úmida ou quase seca. Nesta camada, as resistividades são elevadas e muito variadas, podendo ir de centenas a milhares de ohm.m. Chamaremos esta camada de ρ_1 (camada resistente (R) em relação às demais).

2. Parte inferior do Grupo Bauru, saturada de água, com resistividade relativamente constante da ordem de duas dezenas de ohm.m. Chamaremos a essa camada de ρ_2 (condutora).

3. Basaltos ou diabásio, com resistividade elevada e relativamente constante, da ordem de duas a quatro centenas de ohm.m. É a camada ρ_3 .

4. Formação Botucatu-Pirambóia, de resistividade baixa e constante, da ordem de duas a três dezenas de ohm.m. É a camada ρ_4 .

Sendo h_i a espessura de cada camada e ρ_i sua resistividade, construímos as Tabs. 1 e 2.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(A)
h_1	30	30	30	30	30	ρ_1 1 500
h_2	30	30	30	30	30	ρ_2 20
h_3	300	350	400	500	1 000	ρ_3 200
h_4	∞					ρ_4 30

Tabela 1 — Dados das curvas do Grupo I-A (Fig. 3)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(B)
h_1	30	30	30	30	30	ρ_1 1 500
h_2	30	30	30	30	30	ρ_2 20
h_3	300	350	400	500	1 000	ρ_3 400
h_4	∞					ρ_4 30

Tabela 2 — Dados das curvas do Grupo I-B (Fig. 4)

Para essas tabelas, têm-se as curvas-padrão das Figs. 3 e 4. Um exemplo real é dado na Fig. 5. Trata-se de uma sondagem elétrica obtida no município paulista de Matão ao lado de um poço tubular profundo. Têm-se 55 m de rochas do Grupo Bauru, seguidos de 450 a 500 m de basaltos, abaixo dos quais se têm a Formação Botucatu-Pirambóia e as formações pré-Botucatu. Neste exemplo real aparece ainda um quinto estrato, que poderá ser um sill de diabásio situado a uns 800 m de profundidade ou a presença do próprio Embasamento Cristalino, hipótese menos provável porque, naquela área de Matão, no Embasamento é esperada a maior profundidade.

Figura 2 — Exemplo dos dados e do gráfico obtido no computador. Trata-se da curva 3 do Grupo II-A (uma das curvas da Tab. 3)

Figura 3 — Ábaco de curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo o Grupo Bauru, basaltos e a Formação Botucatu

Figura 4 — Ábaco das curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo as unidades Bauru, basalto e Botucatu

Figura 5 — Exemplo de sondagem elétrica real envolvendo as unidades Bauru, basalto e Botucatu. R-1 e R-2 são estratos resistentes e C-1 e C-2, estratos eletricamente condutores

CURVAS DO GRUPO II: BASALTO (OU DIABÁSIO)-BOTUCATU É o caso por excelência da região de Ribeirão Preto. A experiência mostrou, porém, que, aqui, predominam os diabásios (Davino *et al.*, 1982).

O diabásio (e/ou basalto) apresenta a seguinte estratificação geológica: 1. manto de alteração acima do nível freático (ρ_1); 2. manto de alteração abaixo desse nível (ρ_2); 3. rocha sã (ρ_3); e 4. Formação Botucatu-Pirambóia (ρ_4). As curvas das sondagens elétricas do Grupo II (Figs. 6, 7, 8 e 9) foram feitas a partir dos valores contidos nas Tabs. 3, 4, 5 e 6.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(A)	
h_1	15	15	15	15	ρ_1	100
h_2	30	30	30	30	ρ_2	30
h_3	10	100	500	∞	ρ_3	400
h_4		∞			ρ_4	30

Tabela 3 — Dados das curvas do Grupo II-A (Fig. 6)

Figura 6 — Abaco de curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo as unidades basalto-diabásio e Botucatu

	(1)	(2)	(3)	(4)	(B)
h_1	15	15	15	15	ρ_1 100
h_2	100	100	100	100	ρ_2 30
h_3	10	100	500	∞	ρ_3 400
h_4	∞				ρ_4 30

Tabela 4 — Dados das curvas do Grupo II-B (Fig. 7)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(C)
h_1	15	15	15	15	ρ_1 1 000
h_2	30	30	30	130	ρ_2 100
h_3	10	100	500	∞	ρ_3 400
h_4	∞				ρ_4 30

Tabela 5 — Dados das curvas do Grupo II-C (Fig. 8)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(D)
h_1	15	15	15	15	ρ_h 1 000
h_2	100	100	100	100	ρ_b 100
h_3	10	100	500	∞	ρ_b 400
h_4	∞				ρ_h 30

Tabela 6 — Dados das curvas do Grupo II-D (Fig. 9)

Um exemplo de sondagem elétrica do Grupo II é apresentado na Fig. 10. Trata-se de uma curva obtida em Ribeirão Preto. Têm-se 250 m de diabásio, dos quais os primeiros 60 estão alterados por intemperismo; em seguida, aparece a rocha sã que se assenta sobre a Formação Botucatu.

Figura 7 — Abaco de curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo as unidades basalto-diabásio e Botucatu

Figura 8 — Abaco de curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo as unidades basalto-diabásio e Botucatu

Figura 9 — Ábaco de curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo as unidades basalto-diabásio e Botucatu

Figura 11 — Ábaco de duas curvas-padrão de sondagens elétricas envolvendo tão-somente a Formação Botucatu

Figura 10 — Exemplo de uma sondagem elétrica real, obtida em Ribeirão Preto e envolvendo diabásio e Botucatu, R1 e R2 são estratos eletricamente resistentes e C1 e C2, estratos condutores

Figura 12 — Exemplo de sondagem elétrica real obtida em Ribeirão Preto, envolvendo a Formação Botucatu. R1 e R2 são estratos resistentes e C1 e C2, estratos eletricamente condutores

CURVAS DO GRUPO III: FORMAÇÃO BOTUCATU

A Formação Botucatu apresenta curvas em escada descendente: têm-se inicialmente duas camadas resistentes ρ_1 e ρ_2 , seguidas de camadas mais e mais condutoras, ρ_3 e ρ_4 . As curvas desse grupo (Fig. 11) foram obtidas a partir dos dados da Tab. 7.

Na Fig. 12 tem-se um caso real, tirado de um levantamento de Ribeirão Preto. O arenito da Formação Botucatu, da superfície até 40 m, está acima do nível freático; dessa profundidade, até cerca de 600 m, esta Formação e as formações pré-Botucatu acham-se saturadas.

	(1)	(2)
h_1	10	ρ_h
h_2	30	ρ_h
h_3	100	ρ_h
h_4	∞	ρ_h

Tabela 7 — Dados de curvas do Grupo III (Fig. 11)

CONCLUSÕES

As curvas de sondagem elétrica teóricas aqui apresentadas poderão ser utilizadas nos trabalhos de prospecção elétrica onde estejam envolvidos o Grupo Bauru, os basaltos e diabásios, e a Formação Botucatu, todos importantes aquíferos da Bacia do Paraná. Tais curvas-padrão contribuirão de duas maneiras no planejamento dos trabalhos de campo: a) na previsão do comprimento do dispositivo de sondagem elétrica a ser empregado antes mesmo de empreender sua execução; e b) na interpretação preliminar das curvas de sondagem elétrica. Se as curvas reais forem mais complicadas que as curvas-padrão, como sói acontecer, deve-se considerar que, provavelmente, intrusões de diabásios estão presentes, ou os estratos não são tabulares, ou, ainda, a estrutura geológica é complexa.

As sondagens elétricas têm sido usadas principalmente para problemas hidrogeológicos, razão porque esse conjunto de ábacos, que poderá ser completado, deverá servir principalmente para esse campo de aplicação da Geofísica. É preciso lembrar que o conhecimento do contexto geológico e hidrogeológico é imprescindível. Curvas-padrão de sondagem elétrica para situações geológicas muito diferentes podem ser idênticas entre si.

BIBLIOGRAFIA

- BOURDIN, G. — 1979 — Etude théorique sur problème inverse en sondage électrique (Relatório e tese 3º ciclo junto à Universidade de Montpellier, França). Inédito.
- DAVINO, A. — 1971 — Sondagens elétricas de grande alcance na prospecção de aquíferos da Bacia do Paraná. *Anais XXV Congr. Bras. Geol.* 2:55-59. São Paulo.
- DAVINO, A. — 1979 — Contribuição das sondagens elétricas e perfilações geofísicas ao conhecimento do perfil geológico da região de São José do Rio Preto, SP. Aplicação em hidrogeologia. *Atas 2º Simp. Reg. de Geol.* 2:51-56. Rio Claro.
- DAVINO, A., SINELLI, O., SOUZA, A. e GONÇALVES, N.M.M. — 1980 — Gravimetria, sondagens elétricas e perfilagem geofísica na pesquisa de água subterrânea de Ribeirão Preto, SP. *Anais XXXI Congr. Bras. Geol.* 2:904-914. Camboriú.
- DAVINO, A., SINELLI, O., SOUZA, A. e CORREIA, C.T. — 1982 — Diabásios na região nordeste da Bacia do Paraná. *Anais XXXII Congr. Bras. Geol.* 4:1736-1744. Salvador.
- GHOSH, D.P. — 1971a — The application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements. *Geoph. Prospec.* 19:192-217.
- GHOSH, D.P. — 1971b — Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth. *Geoph. Prosp.* 19:769-775.
- JOHANSEN, H.K. — 1975 — An interactive computer graphic display terminal system for interpretation of resistivity soundings. *Geoph. Prosp.* 23:449-458.
- KUNETZ, G. — 1966 — Principles of direct current resistivity prospecting. *Geoexploration Monographs*. Gebrüder Borntraeger, Berlin.
- KUNETZ, G. e ROCROI, J.P. — 1970 — Traitement automatique des sondages électriques. *Geoph. Prosp.* 18(2):157-198.
- O'NEIL, D.J. — 1975 — Improved linear filter coefficients for application in apparent resistivity computations. *Bull. Australian Soc. Explor. Geophys.* 6(4):104-109.
- SINELLI, O., DAVINO, A., SOUZA, A., GONÇALVES, N.M.M. e TEIXEIRA, J.A. — 1980 — Hidrogeologia da região de Ribeirão Preto, SP. *Anais do 1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*: 319-335. Recife.

MANUSCRITO

Recebido em 24 de setembro de 1982

Revisão aceita em 10 de novembro de 1982