



MÉTODOS INDIRETOS NA PROSPECÇÃO DE AQUÍFEROS CRISTALINOS

José Domingos Faraco Gallas^{1,2}

¹Geologia/Ppgeo/Unisinos; ²Igc/USP jgallas@euler.unisinos.br; jgallas@usp.br;

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

Geophysical methods, particularly electroresistivity, are becoming a major tool in subsurface water exploration as their use diminishes costs by detecting precisely the existence of water-prone structures and thus optimizing well location. This paper brings some technical and theoretical aspects of the electroresistivity method and details the procedures for the acquisition, processing and interpretation of data from crystalline basement aquifers. Results of a real case study are presented, from an area in the municipality of São José do Rio Pardo/SP.

Keywords: applied geophysics, electroresistivity, groundwater.

Introduction

O conteúdo deste trabalho aborda a aplicação da eletrorresistividade na prospecção hidrogeológica, objetivando a detecção de fraturamentos em rochas cristalinas, potencialmente aquíferos produtores. Este tipo de estrutura é favorável à locação de poços tubulares profundos para o fornecimento de água.

Normalmente, fraturamentos assumem o comportamento de zonas de baixa resistividade encaixadas em um "background" mais resistivo. Isto deve-se ao fato de que a presença de fraturas/fissuras em uma matriz rochosa torna-se uma região que facilita a infiltração de águas e alteração da rocha. Estes processos têm como consequência proporcionar uma redução nos valores de resistividade originais da rocha (IPT, 1994; GALLAS, 2003, 2000 e 1998).

Na aquisição dos dados empregou-se o arranjo de eletrodos dipolo-dipolo. Nas pseudo-seções dipolo-dipolo, as feições de baixa resistividade podem surgir sob a forma eixos menos resistivos e/ou sob a forma de um incremento localizado das camadas mais superficiais de baixa resistividade, identificável nas pseudo-seções como

feições de espessamento do pacote superficial condutivo. Tais assinaturas geofísicas são correlacionáveis a locais fraturados/falhados no substrato rochoso. Em áreas de rochas cristalinas, como neste caso, estas estruturas são favoráveis à presença de aquíferos.

Geologia

A região dos trabalhos localiza-se ao sul da Faixa de Cisalhamento Varginha, que possui direção aproximada E-W a WNW-ESSE, deformando as rochas, que apresentam texturas miloníticas, sendo a deformação essencialmente dúctil.

São distinguidas rochas de natureza metassedimentar e ortoderivada, afetadas pelos mesmos processos deformacionais. As litologias apresentam um comportamento estratiforme a irregular, com freqüentes mudanças composicionais, texturais e estruturais, verticais a laterais.

As rochas mais deformadas (que possuem bandamento composicional, foliação, fraturas etc), tais como gnaisses e quartzitos, serão mais susceptíveis à geração de planos de fraqueza (estes muitas vezes reativados por esforços tectônicos posteriores). Estes planos de fraqueza aumentam as porosidades e permeabilidades secundárias dessas rochas aflorantes, tornando-as favoráveis para constituírem bons aquíferos. Por outro lado, granitóides não deformados serão menos susceptíveis à geração de fraturas. Dessa forma, estas rochas não apresentarão as características de porosidade e permeabilidade necessárias para a infiltração, circulação e armazenamento de água subterrânea.

O relevo predominantemente ondulado que ocorre nesta região favorece a formação de manto de alteração e também a infiltração de água no subsolo, sendo esta região caracterizada por boa recarga de aquífero (CPRM, 2002).

Resistividade Aparente (ρ_a)

As técnicas mais utilizadas para medir-se a resistividade em subsuperfície são aquelas que utilizam uma fonte artificial para introduzir uma corrente elétrica no subsolo. Isto é feito por intermédio de dois eletrodos em contato galvânico com o solo. Através deste circuito (eletrodos/subsolo) estabelece-se um fluxo de corrente. Pode-se medir o potencial originado pelo referido fluxo por intermédio de outro par de eletrodos posicionados

nas proximidades, possibilitando determinar-se a resistividade efetiva ou aparente do subsolo.

Fisicamente, a corrente elétrica propaga-se através dos diferentes materiais dos seguintes modos: eletrônico e iônico.

Condução eletrônica – é aquela que se verifica nos materiais que possuem elétrons livres, como é o caso dos metais ou dos sulfetos metálicos. Também é o modo como se dá nos materiais semicondutores, normalmente maus condutores ou até mesmo isolantes, que possuem poucos ou nenhum caminho que possibilite a passagem de corrente.

Condução iônica (eletrolítica) – é aquela que ocorre em um eletrólito, onde o fluxo da corrente se processa através de íons. Este modo de propagação da corrente elétrica certamente é a maneira de condução elétrica de maior importância nos estudos e levantamentos geofísicos de eletrorresistividade.

A resistividade aparente (ρ_a) é o parâmetro fornecido pelo método da eletrorresistividade. Seu princípio é baseado na passagem pelo solo de uma corrente contínua de intensidade I , transmitida por um par de eletrodos A e B, ligado a um emissor E (baterias ou grupo-gerador). Mede-se a diferença de potencial ΔV entre dois eletrodos M e N, e a resistividade aparente (ρ_a) é dada pela fórmula

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

onde K é um coeficiente que depende das dimensões e arranjo do quadripolo AMNB.

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}$$

O arranjo eletrônico utilizado neste trabalho foi o dipolo-dipolo e, neste arranjo, os eletrodos A e B de envio de corrente e os eletrodos M e N de potencial ou de recepção, são alinhados sobre um mesmo perfil. O arranjo é definido pelos espaçamentos $L = AB = MN$. A profundidade de investigação cresce com L e teoricamente corresponde a L, 3/2L, 2L, ..., ((n+1)/2)L (Figura 1).

Comumente, as medidas são realizadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5, e atribuídas na intersecção das linhas que partem a 45° dos centros de AB ($\Omega, \Omega', \Omega''...$) e MN ($O, O', O''...$).

A cada estação, os dois dipolos são deslocados a uma distância igual a L, e os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, ...$ e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente.

Metodologia e Processamento

Inicialmente, o recomendado para o melhor posicionamento da malha dos ensaios, havendo aerolevantamentos disponíveis, é fazer-se uma

interpretação prévia das fotos aéreas da área dos trabalhos objetivando posicionar os perfis de caminhamento elétrico transversais às estruturas identificadas. Mapas geológicos e/ou topográficos também podem ser adequados a esta finalidade.

Não havendo estas disponibilidades, então uma solução é a de posicionar os perfis de modo a interceptar as fraturas quaisquer que sejam as suas direções, por exemplo, uma disposição triangular ou quadrangular. Desta forma, as estruturas serão interceptadas independentemente de suas orientações. Este último (quadrangular) foi o procedimento adotado neste caso e a malha estabelecida pode ser vista na Figura 2. Os pontos/perfis de medidas foram posicionados com o uso de GPS (Global Positioning System) e de modo a obter o melhor recobrimento possível da área, levando-se em conta as limitações físicas e de acesso do local.

Um conhecimento geológico/estrutural da área objeto também é desejável e em muitos casos é de fundamental importância, como para fornecer informações sobre direções de foliação e direções dos movimentos relativos que causaram as fraturas (fraturas “fechadas” ou “abertas”).

Um outro fator de grande importância é a otimização das dimensões do arranjo, dipolo-dipolo, no caso. As aberturas entre eletrodos devem ser tais que no primeiro ou no máximo no segundo nível de investigação seja ultrapassada a camada de alteração superficial – solo+rocha alterada (GALLAS, 2003, 2000, 1998).

Obedecendo a este critério, os levantamentos de eletrorresistividade foram efetuados com abertura entre eletrodos de 40m ($AB=MN=40$ m) e 5 profundidades teóricas de investigação ($n_1=40$ m; $n_2=60$ m; $n_3=80$ m; $n_4=100$ m e $n_5=120$ m (HALLOF, 1957)). O equipamento usado para os trabalhos foi o SAS-4000, de fabricação sueca (ABEM Instruments).

Conforme visto nas figuras 3 e 4, os dados estão sendo apresentados sob a forma de pseudo-seções e seções modeladas de resistividade (atualmente vem sendo empregado o termo *tomografia* ou *imageamento* para tal). As pseudo-seções contém os dados brutos apresentados conforme descrito anteriormente e exposto na Figura 1, que é o sistema de apresentação de dados comumente adotado, proposto por HALLOF (1957). Já as seções modeladas trazem os dados obtidos pelo processamento dos dados brutos de resistividade por meio de programa de inversão descrito adiante.

A representação dos dados é denominada de pseudo-seção porque as formas e contornos assumidos não são absolutamente verdadeiros e sim uma aproximação. Medidas de resistividade normalmente são apresentadas e interpoladas (contornos de isovalores) sob a forma de pseudo-seções que dão uma representação não real do comportamento das resistividades em subsuperfície.

As pseudo-seções não dependem exclusivamente das distribuições de resistividades medidas, mas também da geometria da configuração de eletrodos empregada (dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, entre outras). Igualmente, as resistividades calculadas são ditas aparentes por representarem uma resultante de um

volume do subsolo investigado constituído de diferentes resistividades. Também as profundidades atingidas dependem do arranjo geométrico dos eletrodos e das resistividades. Mesmo corpos de formas geométricas simples (retangulares ou quadradas, p. ex.), apresentam pseudo-seções diferentes e dependem do arranjo empregado.

Nesse sentido, para obter-se uma seção de resistividade “real”, torna-se necessária a aplicação dos chamados processos de inversão nos dados que, em tese, conduzem a uma aproximação razoável de modelos para diversas estruturas geológicas. Estes processos de inversão foram empregados no tratamento dos dados deste levantamento e são tratados a seguir.

As seções modeladas são resultantes de um processo automático de inversão bi-dimensional (2-D). Os processos de inversão de dados de resistividade buscam estabelecer um modelo da provável distribuição real dos valores de resistividade em subsuperfície. As eventuais distorções nas pseudo-seções inerentes aos arranjos de eletrodos são, teoricamente, eliminadas por este procedimento.

Os dados obtidos foram processados através dos programas RES2DINV e Surfer 8, da ABEM Instruments (1998) e Golden Software, respectivamente. O Surfer 8 é um programa para interpolação de dados, enquanto que o RES2DINV é um programa de inversão para resistividade e polarização induzida (IP).

Os resultados da inversão pelo RES2DINV foram exportados na forma de arquivos XYZ e interpolados pelo Surfer 8, visando uma apresentação de melhor qualidade dos mesmos.

O RES2DINV adota uma técnica rápida e eficiente para inversão de dados de resistividade que foi desenvolvida por LOKE & BARKER (1996a, 1996b) e DEGROOT-HEDLIN & CONSTABLE (1990), baseia-se no método dos mínimos quadrados e “suavização restringida” (smoothness-constrained). Teoricamente, produz um modelo de subsuperfície 2-D isento das distorções na pseudo-seção de resistividade aparente originadas pela geometria do arranjo eletródico usado.

O sistema de modelagem 2-D do programa consiste em dividir a subsuperfície em blocos retangulares para os quais são calculadas as resistividades e suas posições são relacionadas aos pontos das pseudo-seções. O método de otimização empregado consiste em reduzir a diferença entre os valores calculados e os medidos de resistividade, fazendo o ajuste entre estes e os blocos. A distribuição e o tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa de modo que o número de blocos não exceda ao número de pontos medidos (a não ser como opção imposta pelo usuário).

A profundidade final dos blocos, ou seja, a profundidade dos níveis de investigação calculadas (*default* do programa), são aproximadamente iguais às propostas por EDWARDS (1977) para a maior abertura de eletrodos do arranjo, e são cerca da metade daquelas da pseudo-seção proposta por HALLOF (1957). Estas profundidades também podem ser manuseadas pelo usuário, como em

casos em que existam informações geológicas disponíveis.

Interpretação dos Resultados

Os dados obtidos com o dispositivo eletródico dipolo-dipolo estão sendo apresentados nas Figuras 3 e 4 sob a forma de pseudo-seções de resistividade aparente e como seções modeladas de resistividade.

As seções modeladas são resultantes do processamento de inversão 2-D pelo software RES2DINV anteriormente referido.

O objetivo principal dos levantamentos geofísicos pelo método da eletrorresistividade foi o de detectar feições/aspectos correlacionáveis a possíveis fraturamentos/falhamentos que possam ser potenciais aquíferos.

Normalmente, zonas fraturadas em rochas cristalinas, caso da área estudada, apresentam-se como regiões onde as resistividades tendem a ser mais baixas do que na mesma rocha quando não fraturada/sã. Isto deve-se ao fato que fraturamentos tendem a armazenar água e conter minerais argilosos produzidos pela ação da água e conseqüente alteração da rocha, aumentando o conteúdo iônico do eletrólito → menor resistividade.

Assim, as feições correlacionáveis a estas estruturas devem ser aquelas onde as resistividades assumem valores mais baixos nas pseudo-seções/seções modeladas e que também foram interpretadas como tendo continuidade em profundidade. Por outro lado, tais aspectos igualmente podem estar correlacionados a variações faciológicas de baixas resistividades e que não correspondem a fraturas.

Os resultados aqui apresentados são os das linhas B e C, que proporcionaram boas seções modeladas e os resultados estão contidos nas Figuras 3 e 4. As anomalias bem definidas detectadas nestes perfis apresentam-se como um grande espessamento da região de alteração superior e devem estar correlacionadas a uma zona fraturada com continuidade em subsuperfície.

A Figura 2 apresenta a posição dos perfis ensaiados em planta e as anomalias detectadas. Desta forma, é possível que se estabeleçam correlações entre as anomalias identificadas e os alinhamentos que definem as fraturas – potenciais aquíferos.

Conclusões

A eletrorresistividade é um método indireto de prospecção e mostra que constitui-se em uma ferramenta de grande utilidade na busca e detecção de estruturas favoráveis para armazenamento de água subterrânea. O emprego deste método geofísico é uma forma eficaz de minimizar custos, uma vez que os poços tubulares são locados com grande probabilidade de êxito.

Na ausência de aerolevantamentos e/ou informações geológicas que indiquem as direções preferenciais dos fraturamentos que permitam o estabelecimento de uma

direção preferencial nos perfis a serem ensaiados, é necessário que estes se interceptem, como neste caso, numa malha do tipo quadrática. Dependendo das condições de acesso ou disponibilidade livre da área, são necessárias pelo menos 3 linhas cruzando-se de forma triangular.

Estas duas formas de disposição dos perfis permitem que seja obtido um efetivo recobrimento das estruturas existentes na área estudada e se possa posicioná-las em planta, proporcionando uma interpretação correta na localização e correlação das estruturas.

Neste trabalho, os trechos/locais onde foram identificadas as anomalias interpretadas como sendo as mais favoráveis, são assinalados com barras contínuas. Aqueles locais indicados com barras descontínuas foram considerados como menos adequados, seja por dados perturbados por ruídos, seja pelas características geofísicas (forma e contraste da anomalia). As estruturas interpretadas constituídas pelos alinhamentos das anomalias são marcadas com linhas tracejadas.

Com base no exposto, relacionam-se abaixo os locais mais indicados para a locação de poços tubulares profundos no contexto das estruturas/anomalias geofísicas identificadas.

Linha A – Estaca A11.

Linha B – Entre estacas B8 e B9.

Linha C – Entre estacas C8 e C9.

Bibliografia

- ABEM INSTRUMENTS, 1998. Geoelectrical Imaging 2D & 3D – RES2DINV, ver. 3.3 for Windows 3.1, 95 and NT. Rapid 2D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. By M. H. Loke. ABEM Instruments, P. O. Box 20086, S-161 02 Bromma, Sweden. Paginação irregular.
- CPRM, 2002. Atlas Geoambiental das bacias hidrográficas dos rios Mogi Guaçu e Pardo (SP). CD-ROM
- DEGROOT-HEDLIN, C. & CONSTABLE, S., 1990, Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55, 1613-1624.
- EDWARDS, L. S. 1977. A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, v.3, p.78-95.
- GALLAS, J. D. F. 1998. Eletrorresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea em áreas de rochas cristalinas. In: WORKSHOP DE GEOFÍSICA APLICADA, II, 1998, Rio Claro. *Anais...*Rio Claro, 1998, CD-ROM, Arquivo Wga09.RTF.
- GALLAS, J. D. F. 2000 – Principais Métodos Geoeletricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Rio Claro, 174p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- GALLAS, J. D. F. 2003 – Prospecção de água subterrânea com o emprego de métodos indiretos. *Revista do Instituto Geológico*, v. 24, p. 43-51.
- HALLOF, P. G. 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements: Cambridge, MIT, Ph. D. thesis.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Relatório IPT-32.388. 1994. Levantamentos geofísicos de eletrorresistividade em apoio à captação de águas subterrâneas em rochas cristalinas, nas proximidades da Usina Termoelétrica de Piratininga e da Represa Billings. IPT, 13p.
- LOKE, M.H. AND BARKER, R.D., 1996a, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152 .
- LOKE, M.H. AND BARKER, R.D., 1996b, Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523..

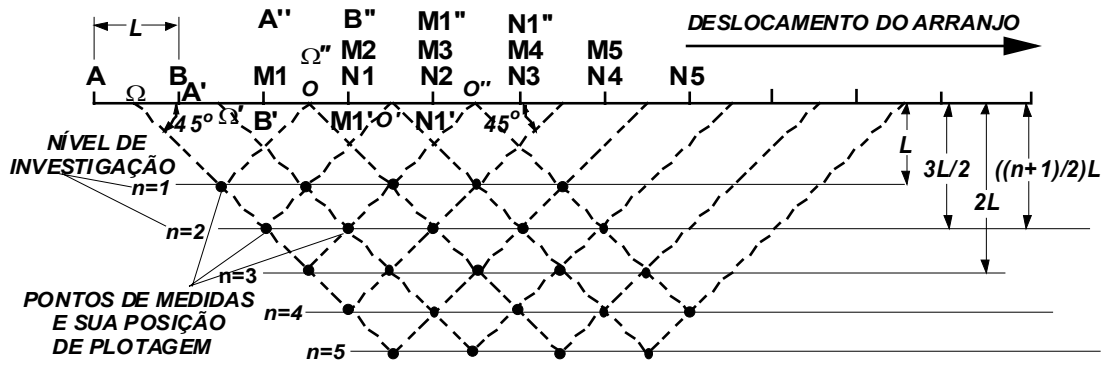


Figura 1 - Caminhamento Resistividade/Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo (original de GALLAS, 2000).

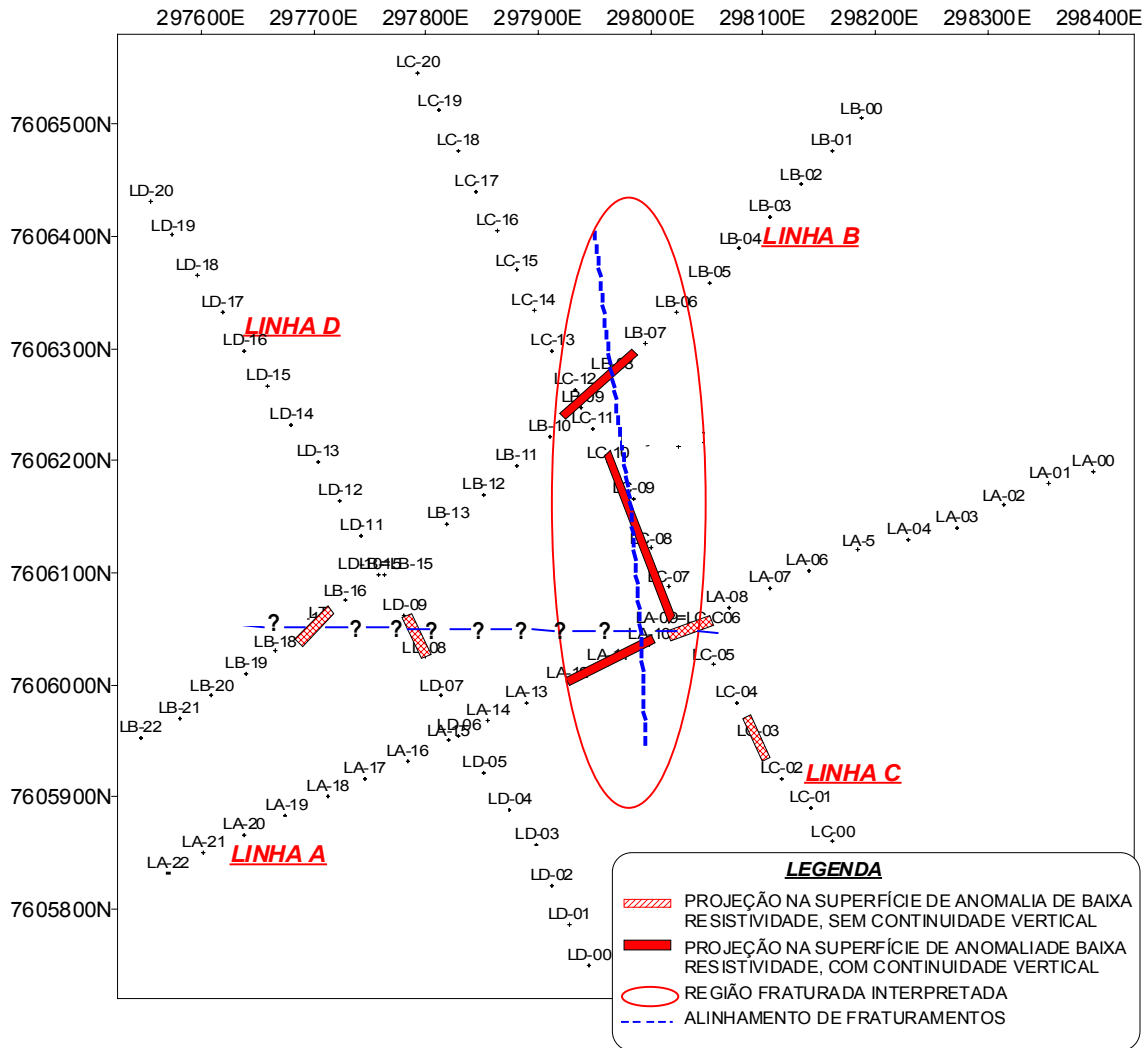


Figura 2 – Mapa de localização e síntese dos ensaios geofísicos.

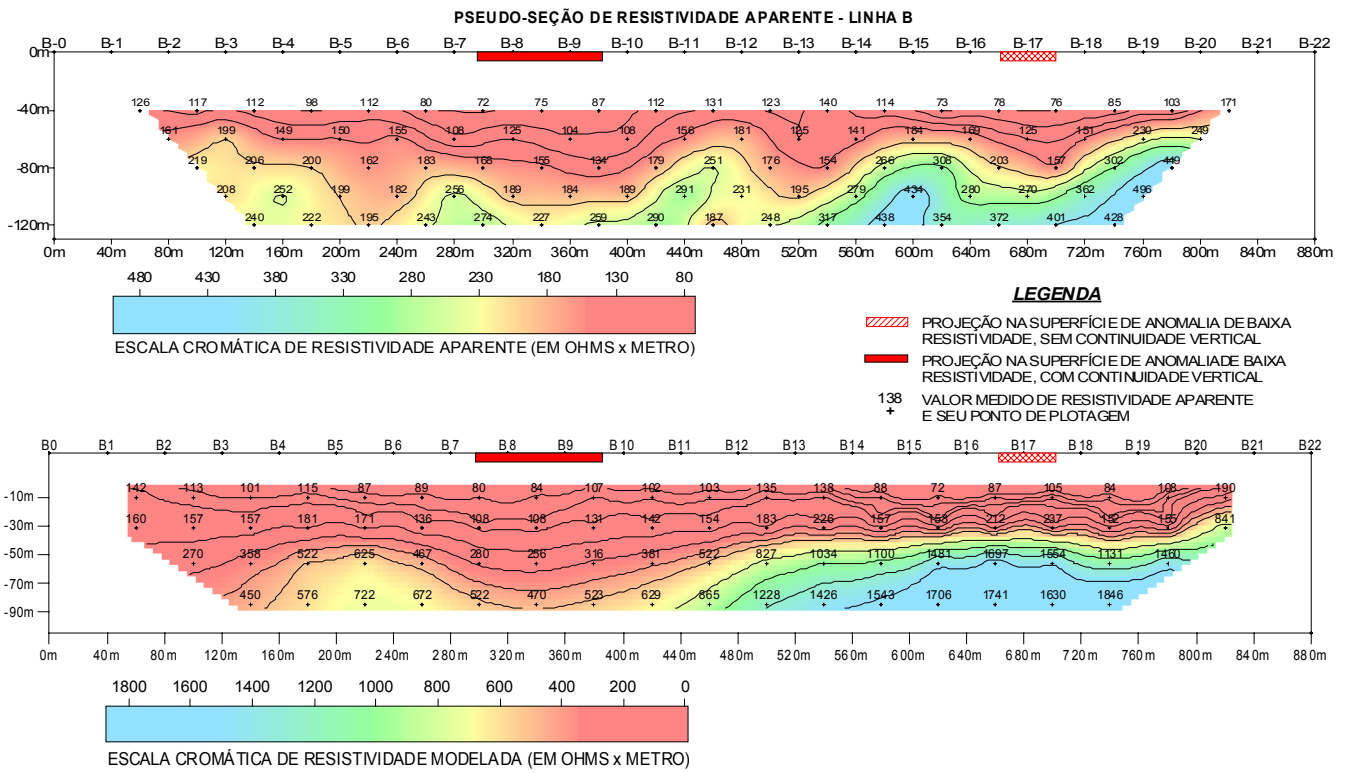


Figura 3 – Pseudo-seção e seção modelada de resistividade da Linha B.

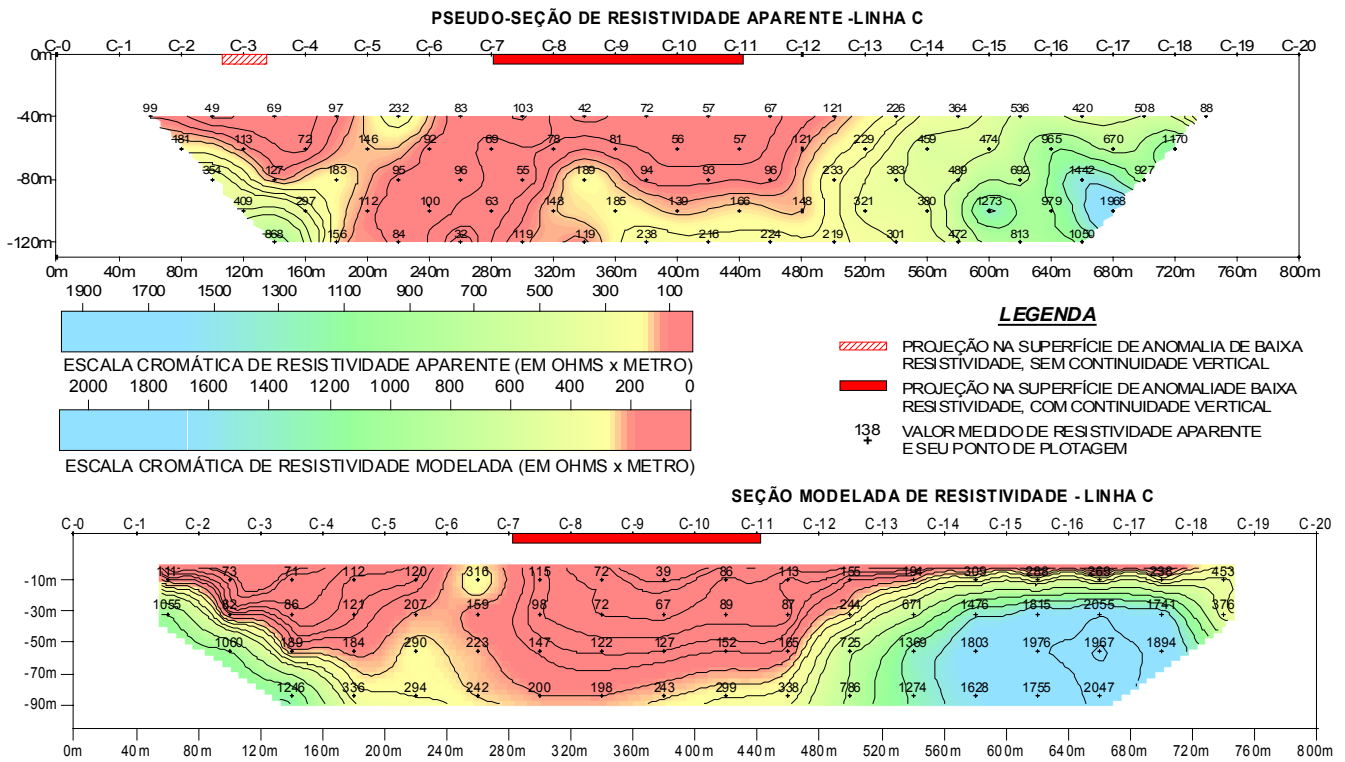


Figura 4 – Pseudo-seção e seção modelada de resistividade da Linha C.