



## Eletrorresistividade e Magneto Resistividade no estudo de zonas de fratura: Metodologia e Aplicação.

\* Vagner R. Elis, Francisco Y. Hiodo, Jorge L. Porsani, Carlos A. Mendonça, Henrique A. P. Dal Pozzo, IAG - USP & José Domingos F. Gallas, IGc - USP

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

Some results of application of electrical and magnetic resistivity methods in two areas with distinct geological characteristics, for mapping fracture zones, are presented. These geophysical methods associated with aerial photography and geological information have shown good results to delineate fracture zones. Dipole-dipole geoelectrical sounding is a very versatile technique, easy to apply in the field, and allow to identify presence of overburden fractures by delineating low apparent resistivity anomaly. The magnetic resistivity method requires heavy switched current generator and sensitivity fluxgate magnetometer that become field survey more difficult. In order to become easy magneto resistivity use in field work, some electronic circuits were added as DC magnetic field autozeroing and microcontrolled datalogger. On the other hand, the results were interesting and the method can be very important to detect fractures in crystalline rocks below thick sedimentary cover.

### Introdução e objetivos

Em estudos hidrogeológicos a aplicação de métodos geofísicos, em especial dos métodos elétricos, tem aumentado em função da crescente demanda de água de boa qualidade. No entanto, principalmente em regiões onde ocorrem rochas cristalinas, o sucesso na locação de poços, mesmo com a ajuda de metodologia geofísica, tem ficado em níveis ainda insatisfatórios. O meio fraturado é considerado como um domínio hidrogeológico heterogêneo e anisotrópico, onde a presença de água depende da intensidade, abertura e interconexão da rede de fraturas. Esse comportamento é responsável pela dificuldade de locação de poços em zonas cristalinas. Com o objetivo de estudar formas de auxiliar na resolução desse problema, neste trabalho foram realizados ensaios de caminhamento elétrico dipolo dipolo e magneto resistividade para buscar o conhecimento da assinatura geofísica de zonas de falha e fraturas conhecidas e observáveis em mapas e fotografias aéreas. Os resultados permitem a proposição de uma metodologia integrada de observação de feições de relevo e geologia aliadas a aplicação de métodos geofísicos adequados para a definição da posição da zona de falha/fratura.

### Metodologia

No âmbito da utilização da geofísica em estudos hidrogeológicos e geoambientais, normalmente os métodos elétricos e eletromagnéticos (em especial o método da eletrorresistividade) respondem com eficiência a maioria das solicitações. Em casos onde o importante é a variação lateral da resistividade, como na procura por zonas de fratura, contatos laterais e cavidades, a técnica a ser utilizada é o caminhamento elétrico. Entre os vários arranjos de eletrodos para a aplicação de caminhamento o arranjo dipolo-dipolo fornece a melhor resolução e melhor poder de penetração, e em razão disso foi o utilizado neste trabalho. Nos últimos anos, têm sido desenvolvidas técnicas de interpretação quantitativa para pseudo-seções de resistividade obtidas em ensaios de caminhamento elétrico, possibilitando a criação de modelos 2D onde podem ser individualizados os vários corpos e camadas geológicas investigadas. Nesse trabalho resultados foram interpretados com o programa RES2DINV de Loke (1998). O modelo 2D resultante é apresentado em isolinhas de resistividade e procura definir com maior precisão a posição e o formato das estruturas causadoras de anomalias.

Outro método utilizado foi o método da magneto resistividade. O método da resistividade tradicional tem por objetivo mapear variações das propriedades elétricas em superfície através de medidas de diferença de potencial causada pelo fluxo de corrente elétrica entre dois eletrodos. O método da magneto resistividade (MMR) difere do tradicional pela substituição dos eletrodos de potencial por um magnetômetro onde uma ou mais componentes do campo magnético são registradas. Trata-se de um método de exploração baseado na medida de campo magnético de baixa magnitude e frequência, gerado por um fluxo de corrente percorrendo a fratura ou falha. Esse método tem sido usado com sucesso na prospecção de sulfetos maciços, estudos de fontes geotermiais e auxílio a mapeamento geológico regional, principalmente (Nabighian, 1993). De acordo com esses autores, os usuários do método são poucos. O ensaio de campo é descrito por Jarosky (1933; in Nabighian, 1993) considerado o inventor do método. O ensaio consiste de aplicar corrente entre dois eletrodos conectados a uma fonte de potência adequada, ou seja, suficientemente potente para permitir a investigação do espaço investigado através do campo magnético gerado. A separação dos eletrodos pode ser constante em trabalhos onde se deseja mapear variações laterais, ou pode ser aumentada sucessivamente para investigar maior profundidade. A área de estudo fica entre os dois eletrodos, sendo que os cabos são dispostos em forma de "U" no terreno para manter uma distância entre o magnetômetro e a linha de transmissão de corrente para

evitar influência desta nas medidas. Quanto maior for o comprimento do "U", isto é, quanto mais distante estiver a linha do cabo paralelo a linha de eletrodos, menor será o efeito da corrente primária que flui no cabo. O magnetômetro realiza as medidas na direção perpendicular a linha com os eletrodos energizados. Nessa posição, a magnitude do campo sendo medida pelo aparato é devida a dois campos artificiais: a) o campo magnético essencialmente vertical  $H_a$  criado pelo fluxo de corrente através do cabo energizado a e b) o campo complexo  $H_c$  criado pelo fluxo de corrente em subsuperfície. Pelo estudo do campo  $H_c$ , pode-se inferir a distribuição do fluxo de corrente no terreno e identificar anomalias de condutividade. O método pode ser superior a ensaios de resistividade convencional no mapeamento de heterogeneidades posicionadas abaixo de coberturas condutivas não consolidadas (Edwards, 1974; Seigel & Howland-Rose, 1983). Esse comportamento pode ser muito interessante no mapeamento de estruturas como falhas e fraturas em zonas tropicais, onde a cobertura de solo normalmente é espessa e condutiva.

### Equipamentos de campo

Os dados de caminhamento dipolo-dipolo foram obtidos com um equipamento digital marca Syscal usando fonte de corrente comutada, de 800 Vdc de pico, com recurso para medidas de polarização induzida.

Para a aplicação da técnica da magneto-resistividade foram usadas as seguintes unidades de transmissão e de recepção:

1- gerador de corrente controlada SCINTREX TSQ-3

Potência máxima de saída: 3500 VA

Tensão máxima: 1500 Volts

Corrente máxima: 10 A

Estabilização de corrente:  $\pm 0,1\%$  para variações de carga externa acima de 20% ou para variação de tensão de entrada acima de  $\pm 10\%$ .

Formas de onda de saída:

a) Onda quadrada : 0,1; 0,3; 1,0 e 3,0 Hz

b) Onda quadrada comutada no domínio do tempo: 1-2-4-8s (tempos de ligado-desligado)

2- magnetômetro fluxgate SCINTREX MFM-3

Sensibilidade: 100 mV/gamma

Resposta em frequência: plana de 0-1000 Hz

Nível de ruído eletrônico:  $< 1$  miligamma  $\text{RMS}/(\text{Hz})^{1/2}$ , 1-1000 Hz

Para detecção do sinal, algumas modificações foram introduzidas nos circuitos do magnetômetro e, um datalogger com memórias não voláteis  $E^2\text{PROM}$  foi desenvolvido. O sistema de aquisição de dados montado, usa um microcontrolador ATMEL AT92S8252 da família 8051, conectado a um conversor AD 12 bits MAX 199, de razão de amostragem  $10^5$  amostras/s. Através do sinal de sincronismo proveniente do gerador é possível empilhar os dados de tensão com grande precisão, para ter-se um sinal (resposta do meio) coerente. Para o cancelamento do campo local ao longo do eixo do magnetômetro, antes da aplicação da corrente chaveada, foi desenvolvido um circuito de autozeramento do campo magnético usando servocontrole PID. O sinal de sincronismo do gerador que permite o empilhamento

exato do sinal de saída do magnetômetro fluxgate é enviado ao receptor microcontrolado através de cabo coaxial. O circuito de autozeramento usando controlador PID baseia-se no sistema apresentado por Hodo et al. (2001), para cancelamento de potencial eletroquímico desenvolvido nos eletrodos de potencial em trabalhos de SEV ou de caminhamento.

### Ensaio e Resultados

Para o estudo do potencial de aplicação de métodos geofísicos na localização de zonas de fratura em rochas cristalinas, foram realizados ensaios de caminhamento elétrico dipolo dipolo e magneto resistividade em duas áreas com características geológicas diferentes: uma área de ocorrência de espessa cobertura sedimentar sobre rochas do embasamento cristalino dentro da Cidade Universitária, localizada entre o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas e o Instituto de Física (Figura 1), e um local na área de afloramento do Granito Itu, em Itu-SP (Figura 2), onde ocorrem extensas fraturas e falhas de caráter regional podem ser observadas em fotografias aéreas, mapas geológicos e cartas topográficas.

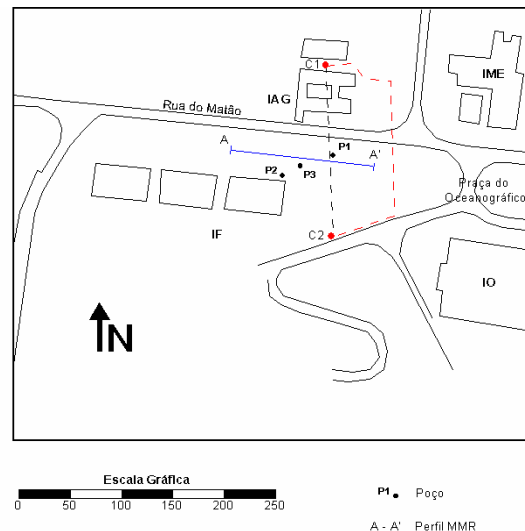


Figura 1 – Localização do perfil A-A' na Cidade Universitária

Na área situada dentro da Cidade Universitária ocorre uma espessa camada de sedimentos (cerca de 50 metros) da Bacia de São Paulo sobre o embasamento cristalino. Essa área foi escolhida pela existência de uma série de dados geofísicos que indicam a presença de uma zona mais condutora que pode caracterizar fratura, e de três poços com informações detalhadas sobre a estratigrafia do local. Uma outra característica que concorda com a possibilidade de existência de uma zona de fratura nesse local é a existência de uma série de sulcos de drenagem com direção NNE dentro da Cidade Universitária. Um ensaio de caminhamento elétrico com espaçamento de 30 metros foi executado na direção E-W (Linha A-A' da Figura 1).

Os resultados do caminhamento elétrico são apresentados na Figura 3 e mostram uma anomalia de menor resistividade que pode caracterizar uma zona de fratura de direção aproximada N-S que mostra alguma influência já dentro dos sedimento. Na pseudo-seção (Figura 3a) a anomalia mostra uma influência na parte superior do perfil e parece estar posicionada entre as distâncias 90 e 120 metros). Na seção interpretada (Figura 3b) a zona condutora (valores de resistividade inferiores a 30 ohm.m) aparece em profundidade na posição 75 metros. Levando em consideração esses resultados, o ensaio com o método da Magneto Resistividade foi executado direção E-W, no mesmo perfil do ensaio elétrico, com o objetivo de testar o método na prática ao mesmo tempo em que seus resultados seriam importantes para confirmar a interpretação da estrutura do local e definir melhor sua posição. O ensaio foi realizado usando-se os equipamentos descritos anteriormente, com os eletrodos de corrente dispostos o mais próximo possível do alinhamento previsto para a zona condutora e distanciados de 170 metros. De acordo com Edwards (1974) a separação dos eletrodos de corrente deve ser determinada teoricamente antes do ensaio para garantir que uma percentagem da corrente gerada penetre no embasamento abaixo da cobertura condutora, caso contrário a estrutura dentro do embasamento não poderá ser estudada. Esse autor fornece uma função que pode ser usada de forma simples para determinar aproximadamente a percentagem de corrente que permanece concentrada na cobertura. Essa função é descrita em termos do parâmetro adimensional  $a$ , que pode ser calculado por:

$$a = \frac{2Sr}{L} \quad (1)$$

onde  $S$  é produto da condutividade pela espessura da cobertura, e  $r$  a resistividade do embasamento e  $L$  a abertura entre os eletrodos de corrente. O autor fornece uma relação entre a percentagem de corrente concentrada na cobertura e  $a$ . Para o nosso caso, usando-se os dados de sondagens elétricas e dos poços, tem-se um valor de  $a = 492.4/L$ , e sendo  $L = 170$ , o valor de  $a$  encontrado é de 2.9. De acordo com a relação de Edwards, para essa abertura cerca de 25% da corrente atravessa a cobertura e penetra até o embasamento. Evidentemente seria interessante que uma percentagem maior de corrente passasse pela cobertura, mas em função da operacionalidade do ensaio, com o posicionamento dos eletrodos de forma que o perfil esteja aproximadamente na linha central, a distância de 170 metros pode ser considerada satisfatória. O arranjo de campo foi montado com a configuração mostrada na Figura 1 e os dados foram coletados no perfil A - A'. As leituras foram tomadas de 5 em 5 metros, sendo o ensaio programado para sincronizar o transmissor e o receptor para tempo de integração de 2 segundos, e três ciclos de integração para cada medida. Como o local não é considerado ideal, com a presença de fontes de ruído, a cada ponto esse processo foi repetido três vezes, sendo o valor médio considerado como representativo. As leituras foram tomadas em mV e depois transformadas

em gammas através do fator de conversão do magnetômetro MFM-3, de 50 mV/nT (50 mV/gamma). Depois de executada a redução dos dados foi elaborado o perfil de anomalia MMR, que é apresentado na Figura 4. No perfil pode-se observar que existem duas anomalias, com valores de 9,1% e 9,4% nas distâncias 65 e 130. A primeira anomalia é coincidente com a posição da zona condutora obtida na seção interpretada de resistividade. Dessa forma, pode-se concluir que o método da Magneto Resistividade detectou a zona condutora e confirmou a presença da estrutura no local e ainda sugere a presença de mais uma possível zona de fratura no final do perfil.

Na área de Itu-SP os ensaios foram executados cruzando uma zona de fratura bem marcada por sulcos de drenagem em rochas graníticas. A área de ensaio está situada numa área de proteção ambiental localizada na Fazenda da Serra, município de Itu, Estado de São Paulo.

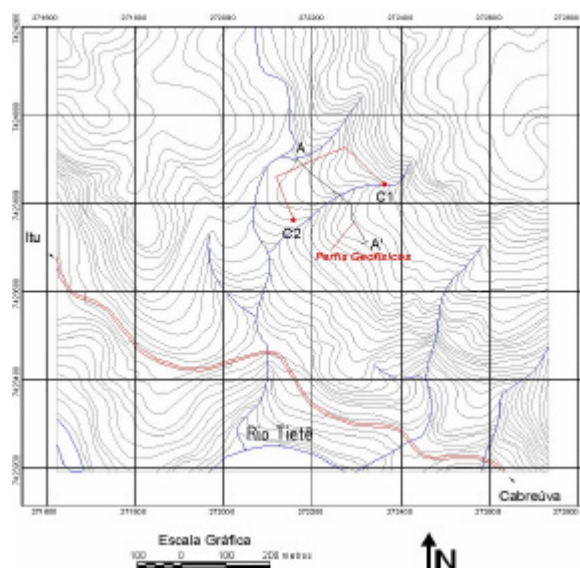


Figura 2 – Localização dos perfis geofísicos na área de Itu – SP.

Nessa região, as principais fontes de água de superfície estão bastante contaminadas e o abastecimento de água potável para a comunidade é realizado através da exploração de água subterrânea por meio de poços tubulares. Portanto, a aplicação de métodos geofísicos, visando a localização de zonas de fraturas em rochas cristalinas para a exploração de água subterrânea é de grande importância para a região. A Suíte Granítica de Itu está localizada a aproximadamente 60km da cidade de São Paulo, e abrange uma área de aproximadamente 400km<sup>2</sup>. As estruturas geológicas mais marcantes da Suíte Granítica de Itu são os lineamentos que correspondem às zonas de falhas curvadas, sub-paralelas ou convergentes à zona de falha de Jundiuvira. Essas zonas coincidem parcialmente com a orientação das principais drenagens da região, por exemplo, os rios Tietê, Pirai e da Fonte. Os lineamentos retilíneos mais importantes que afetam os corpos granitoides apresentam orientação NE e NW, onde são abundantes

as direções preferenciais de N20-30E e N45-50W. Os ensaios foram executados em um desses lineamentos, de direção NE, que representam geologicamente as zonas de falhas/fraturas e caracterizam importantes estruturas para a exploração de águas subterrâneas em rochas graníticas. Os ensaios geofísicos foram executados segundo um perfil de direção aproximada NW-SE que atravessa a zona de fratura. A localização desse perfil na área bem como as posições dos eletrodos para o ensaio de Magneto Resistividade são mostradas na Figura 4. O ensaio de caminhamento elétrico dipolo dipolo foi executado com abertura de 20 metros e devido a grande heterogeneidade da zona de transição solo-rocha e presença de matacões a pseudo-seção apresenta um padrão bastante complexo (Figura 5a), mas possibilita identificar uma zona de menor resistividade (em profundidade entre as posições 80 e 100 metros). Na seção interpretada a zona de menor resistividade apresenta valores inferiores a 1.500 ohm.m dentro de um substrato com valores superiores a 5.000 ohm.m, característico do granito. A zona de anomalia aparece em superfície na posição 80 metros e mergulha no sentido do final do perfil, ou seja, para SE. Uma outra zona condutora menos profunda é observada no início do perfil, local onde existe uma drenagem instalada. O ensaio de Magneto Resistividade foi executado com os mesmos parâmetros de aquisição de dados da área anterior, colocando-se os eletrodos em cima da zona de fratura, distanciados de 200 metros e com pontos de leitura a cada 10 metros. Como o meio é muito resistivo, a corrente máxima que conseguiu-se injetar foi de 641 mA, embora tenha-se utilizado uma solução salina para procurar diminuir a resistência de contato. Os resultados são apresentados no perfil da Figura 6 e mostram que o método também identificou as duas fraturas existentes, a primeira na drenagem do início do perfil (MMR 1,63 a 1,79 %) e a anomalia relativa a fratura de interesse posicionada na distância 90 metros (MMR 1,78%).

### Conclusões

A aplicação dos métodos elétricos de prospecção geofísica associada a um estudo das feições estruturais por meio de fotografias aéreas, mapas geológicos e cartas topográficas em escala de detalhe apresenta-se como uma metodologia que possibilita a identificação e localização de zonas de fraturas. A localização de zonas

de fratura com vistas a exploração de água subterrânea torna-se cada vez mais importante em razão do aumento da demanda de recursos hídricos. No entanto observa-se uma utilização bastante reduzida da geofísica, talvez em função da falta de relatos de resultados positivos. Esse trabalho procurou apresentar o potencial de utilização de caminhamento elétrico e também de testar a magneto resistividade na localização de fraturas previamente identificadas. Os resultados mostram o potencial da metodologia, especialmente do caminhamento elétrico, pela facilidade de aplicação dos ensaios e possibilidade de interpretação quantitativa. A magneto resistividade mostrou bons resultados e sua utilização justifica-se em áreas com espessa cobertura inconsolidada, situação em que o desempenho do caminhamento elétrico é afetado pela cobertura condutora.

### Referências

- Edwards, R.N.** - 1974 - The Magnetometric Resistivity method and its application to the mapping of a fault. Canadian Journal of Earth Sciences, n. 11, pp. 1136-1156.
- Hido, F.H., Silva, N., Elis, V.R., Galhardo, L., Silva, J.E.** - 2001- Projeto de um sistema semi-automatizado de medidas de potencial elétrico natural ou induzido do solo para aplicações geoeletricas. 7<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society, pp. 136-139.
- Loke, M.H.** - 1998 -RES2DINV ver. 3.3. for Windows 3.1 and 95- Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares method. Penang: M.H. Loke Software User's Manual, 35p.
- Nabighian, M.N.** - 1993 - Electromagnetic methods in applied geophysics (Investigations in Geophysics no. 3), Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, Vol I.
- Seigel, H.O. & Howland-Rose, A.W.** - 1983 - The magnetic induced polarisation method. In Developments in geophysical exploration methods-4. Ed:A.A.Fitch, Elsevier Science Publishing, 65-99.

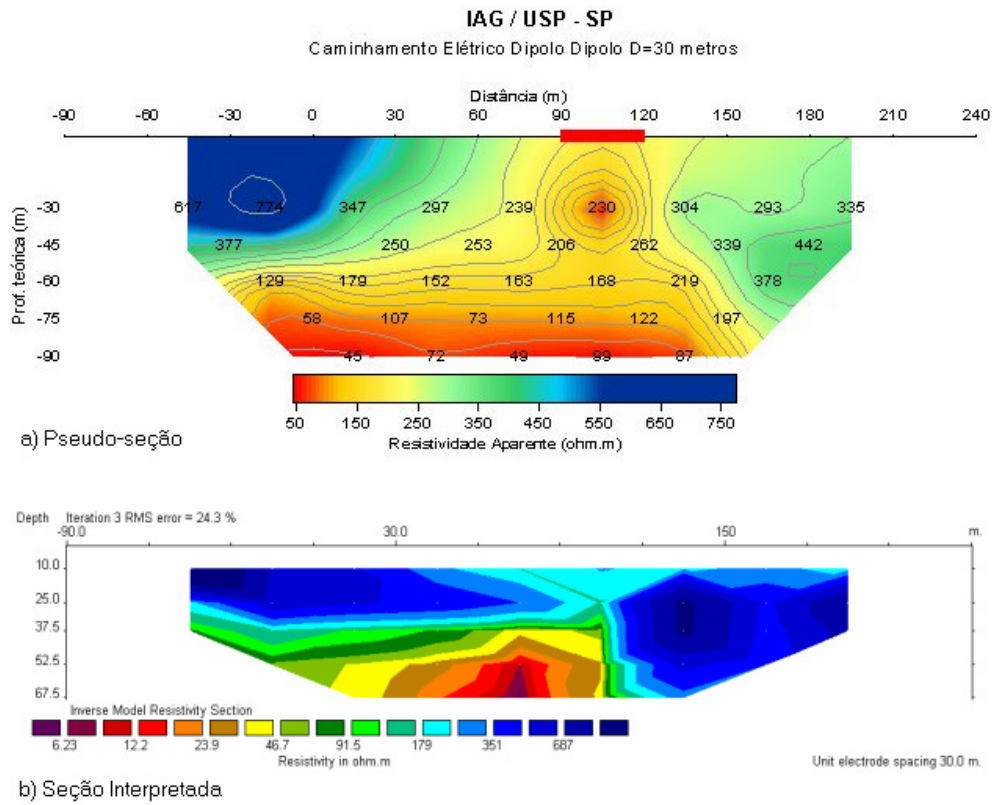


Figura 3 – Resultados dos ensaios de caminhamento elétrico na Cidade Universitária.

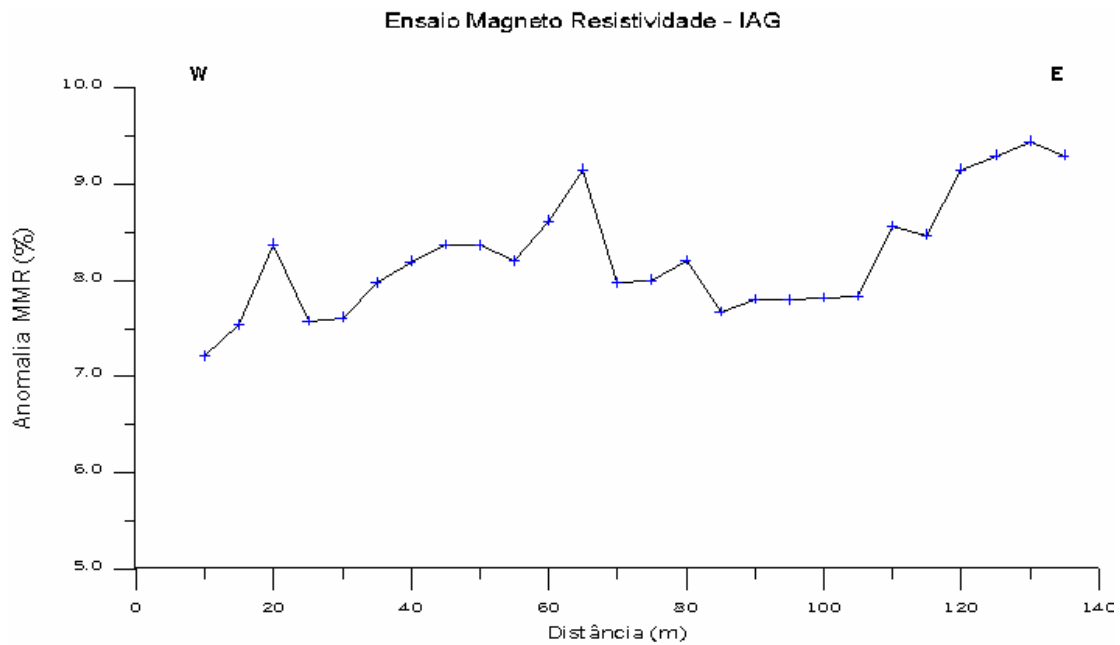


Figura 4 – Resultado do ensaio de Magneto Resistividade na Cidade Universitária.



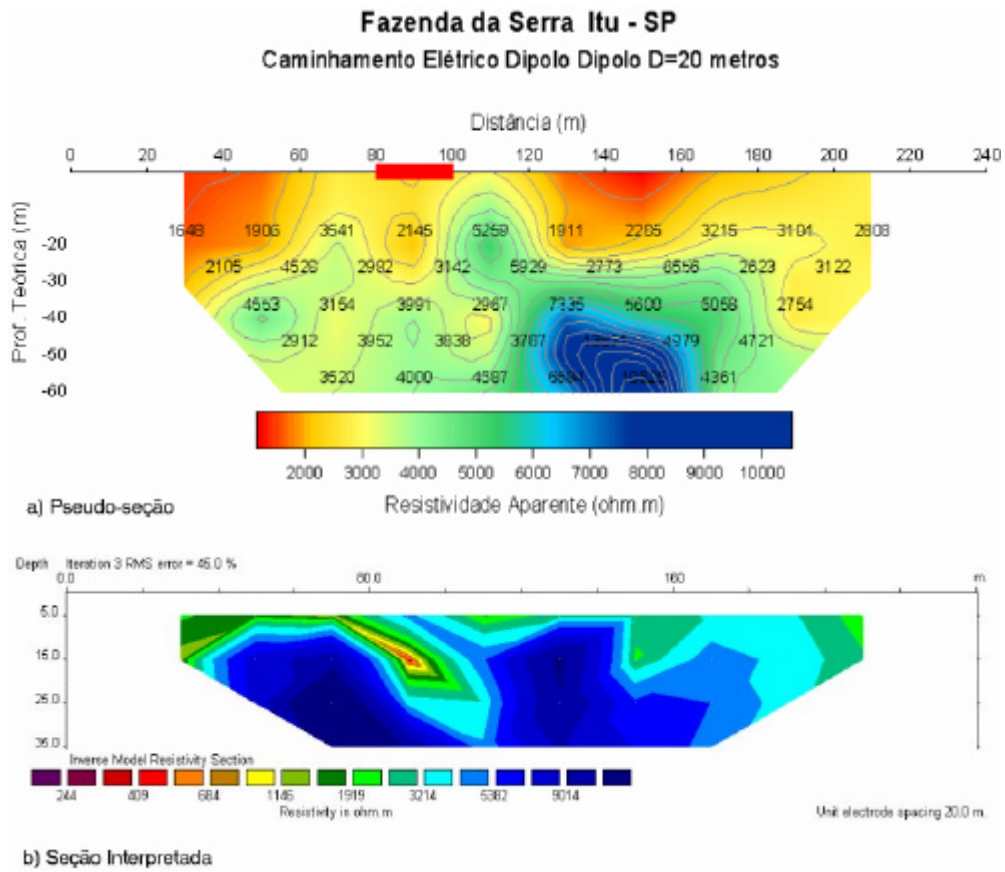


Figura 5 – Resultados do caminhamento elétrico da área de Itu – SP.

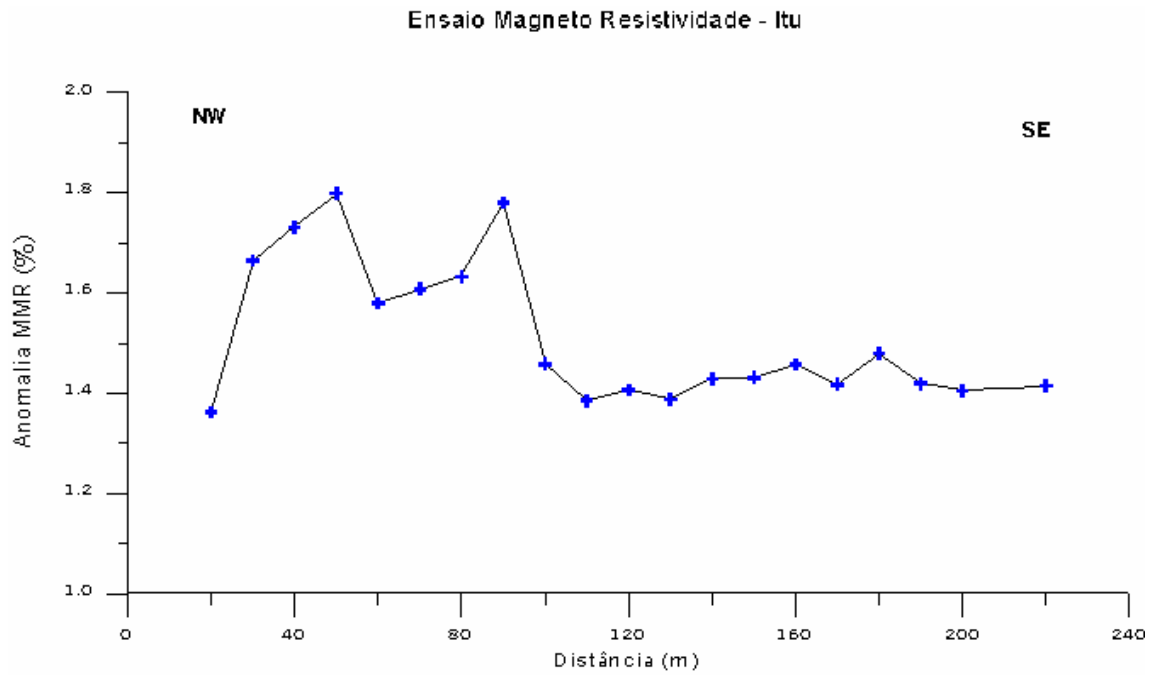


Figura 6 – Perfil de Magneto Resistividade da área de Itu – SP.