

Ensaios de Polarização Induzida Espectral (SIP) Aplicados à Exploração Mineral de Cobre e Chumbo na Área Galeria Velha, Vale do Ribeira-PR

Francisco José Fonseca Ferreira ⁽¹⁾; Rodoilton. Stevanato ⁽¹⁾; José Roberto de Góis ⁽²⁾, Luciano Stasiak ⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR; ⁽²⁾ Geoplanejamento Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental Ltda.

Abstract

The present work shows de assays of Spectral Induced Polarization (SIP), in gradient and dipole-dipole modes, on occurrences of metallic sulphides and geochemical anomalies of Cu-Pb-Zn-Au in soils, on the region of Vale do Ribeira – PR. In gradient mode, the spectral parameter of time constant has reflected a fault zone that lodges the main mineralization recognaized in surface. The main axes of apparent cargability coincide with graphitic marble lens (carbonous). The inversion models of apparent chargeability and resistivity data, obtained with the dipole-dipole array, have defined whit accuracy the lithological contact between calcitic marbles and impure calcitic marbles, with graphitic intercalations.

Introdução

O método da polarização induzida (*induced polarization - IP*) é freqüentemente empregado na exploração mineral, sobretudo na prospecção de metais base e ouro, em fases avançadas da pesquisa, as quais, normalmente, orientam e precedem as campanhas de sondagem. Recentemente, a equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, juntamente com pesquisadores da Geoplanejamento, Pesquisa Mineral e Geologia Ambiental Ltda., realizou ensaios de polarização induzida espectral (*spectral induced polarization - SIP*) com o objetivo de testar a performance do método e avaliar os resultados em ocorrências superficiais de sulfetos metálicos (Cu-Pb-Au-Ag), detectadas por mapeamento geológico e geoquímicas de solos, na área denominada Galeria Velha, município de Adrianópolis, Vale do Ribeira – PR (Figura 1).



Figura 1 – Mapa de localização da área investigada.

A = Galeria Velha.

O Método da Polarização Induzida Espectral

O método da polarização induzida espectral - *SIP* envolve uma série de técnicas vistas como complementares às da resistividade e cargabilidade dos tradicionais levantamentos de *IP*. Tal método pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole (Cole & Cole, 1941) ou o de Dias (1972) para estudar os efeitos da polarização induzida espectral nos domínios da freqüência (*eg.* Sampaio *et al.*, 1993) ou do tempo (*eg.* Johnson, 1990). A impedância complexa (função transferência) depende da resistividade - R_0 ; da voltagem relativa residual registrada após a interrupção de um pulso muito longo (cargabilidade verdadeira - m); da constante de tempo - τ e do expoente - c , os quais descrevem as formas das curvas de decaimento no domínio do tempo, ou o espectro de fase no domínio da freqüência. Pelton *et al.* (1978), sugeriram que a impedância complexa de uma fonte polarizável simples pode ser expressa como segue:

$$Z(\omega) = R_0 \{ 1 - m [1 - 1 / \{ 1 + (i\omega\tau)^c \}] \}$$

onde: $Z(\omega)$ = impedância complexa ($\Omega.m$); R_0 = resistividade ($\Omega.m$); m = cargabilidade verdadeira (V/V); τ = constante de tempo (s); ω = freqüência angular (1/s); c = expoente e $i = (-1)^{1/2}$.

Para alvos convencionais de *IP*, τ varia desde mili-segundos até índices superiores a 100 segundos e está relacionada com a granulometria (*grain size*) dos minerais polarizáveis. O expoente c varia, via de regra, entre 0.1 e 0.5 e constitui um parâmetro relacionado à uniformidade granulométrica dos alvos. O *SIP* é primeiramente utilizado para definir a “textura” da mineralização metálica em subsuperfície, relacionando-se a constante de tempo - τ do efeito *IP* medido, com a granulometria da mineralização (Pelton *et al.* 1978). Assim, em geral, a constante de tempo é pequena em mineralizações de granulação fina, verificando-se o contrário quando a mineralização é grossa, o que pode permitir, por exemplo, a discriminação entre grafita e sulfetos metálicos de interesse econômico (Pelton *et al.*, 1978). Estes últimos autores verificaram que os parâmetros espectrais c e R_0 variam pouco com o tipo de mineralização, sendo que o primeiro deles é um fator independente e praticamente constante, enquanto τ e m são os mais importantes e estão

Polarização Induzida Espectral

relacionados com o aumento dos teores (incrementos simultâneos de m e τ) e da granulometria (aumento de τ e diminuição de m) do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram também que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química, mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais (R_0 , m , τ e c), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de SIP medidos, além do erro médio quadrático (*rms*) da cargabilidade verdadeira.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente c fixo e igual a 0.25 (incorporado ao *software* do equipamento em função dos experimentos de Pelton *et al.*, 1978) e τ entre 10 ms e 100 s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida espectral utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), o qual permite investigar dez níveis de profundidade, um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM4500X.

Geologia da Área Galeria Velha

As litologias predominantes na área Galeria Velha envolvem uma unidade carbonática bastante diferenciada, na qual se intercalam lentes de metapelitos aluminosos e carbonáticos e, subordinadamente, mármores “carbonosos”. Todo o conjunto é atribuído à Formação Votuverava (Grupo Açungui). Ao sul, em contato com os metapelitos, predominam mármores calcíticos “puros”, de cor cinza claro a escuro, mais enriquecidos em CaO e depletados em SiO₂, FeO e MgO, relativamente aos demais tipos. Ocorre ainda uma intercalação de lente de mármore “carbonoso” (grafitoso) de coloração preta, contendo cristais de pirita. Na porção centro-norte aflora uma unidade de mármores calcíticos “impuros”, caracterizada por intercalações de cálcio-filitos e calcarenitos. À nordeste dominam mármores “bandados”, com alternância rítmica de bandas cinza (calcíticas) e bandas claras (magnesianas/dolomíticas). Finalmente, no extremo sul da malha, aflora a unidade metapelítica formada

por quartzo-mica xistos, filitos e cálcio-filitos, localmente tectonizados, gerando uma foliação tipicamente anastomosada. O mapa geológico da área é apresentado na Figura 2.

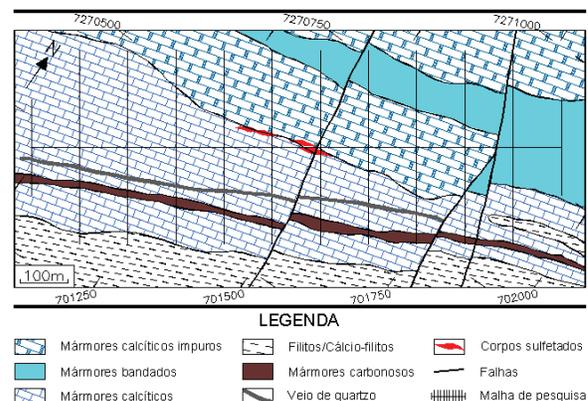


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da área das ocorrências de Galeria Velha - PR.

Os diagramas da foliação principal Sn indicam a presença de dobramentos regionais, cujos eixos estatísticos situam-se em torno de N64E, com caimentos desde horizontais até 22°. Estes valores são compatíveis com os eixos de microdobras medidos em afloramentos. Já a leitura do diagrama de roseta revela que o principal sistema rúptil presente na área está orientado segundo a classe N15-30W, seguido pela seguinte ordem: N30-45W, N0-15W, N75-90E, N45-60E e N0-15E, sendo que o sistema N15-30W afeta diretamente os corpos sulfetados através de falhamentos com rejeito anti-horário.

O levantamento geoquímico realizado nas várias etapas do projeto envolveu 167 amostras de solo e 30 de minério e rocha. As amostras de canal em trincheira forneceram os seguintes resultados analíticos: 301-3670 ppm de Pb, 146-163 ppm de Zn, 141-230 ppm de Cu e 1-5 ppm de Ag. As análises realizadas em fragmentos de *gossans* recuperados de trincheiras, mostraram teores de 1203-3896 ppm de Cu, 0,56-3,0 % de Pb, 104-215 ppm de Zn e 2-37 ppm de Ag. As amostras de minério aflorante, coletadas em vários corpos de sulfeto, resultou nos seguintes teores: 0,15-0,56 % de Cu, 0,98-2,7% de Pb, 131-193 ppm de Zn, 1-78 ppm de Ag e 0,17-6,12 ppm de Au.

Resultados Obtidos

Os dados de polarização induzida espectral foram adquiridos segundo dois arranjos eletródicos, gradiente e dipolo-dipolo. No primeiro deles foi utilizada uma linha de corrente (AB) com 1.500 m de extensão, enquanto as medidas dos parâmetros

Polarização Induzida Espectral

relacionados com o aumento dos teores (incrementos simultâneos de m e τ) e da granulometria (aumento de τ e diminuição de m) do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram também que a discriminação espectral entre mineralizações disseminadas, maciças e em vênulas (*veinlets*), não depende da composição química, mas sim do hábito ou da granulometria do minério. Após a remoção das distorções provocadas pelo acoplamento eletromagnético, os resultados são interpretados através de um programa de inversão, determinando-se os quatro parâmetros espectrais (R_0 , m , τ e c), os quais fornecem a curva de dispersão Cole-Cole que mais se ajustou aos dados de SIP medidos, além do erro médio quadrático (*rms*) da cargabilidade verdadeira.

No modo Cole-Cole empregado na presente pesquisa, no domínio do tempo (2s), as curvas de decaimento medidas são comparadas com curvas teóricas calculadas com um expoente c fixo e igual a 0.25 (incorporado ao *software* do equipamento em função dos experimentos de Pelton *et al.*, 1978) e τ entre 10 ms e 100 s, de modo que os dados apresentados deste último parâmetro correspondem às curvas teóricas que melhor se ajustaram aos dados observados. O sistema de polarização induzida espectral utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), o qual permite investigar dez níveis de profundidade, um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM4500X.

Geologia da Área Galeria Velha

As litologias predominantes na área Galeria Velha envolvem uma unidade carbonática bastante diferenciada, na qual se intercalam lentes de metapelitos aluminosos e carbonáticos e, subordinadamente, mármores “carbonosos”. Todo o conjunto é atribuído à Formação Votuverava (Grupo Açungui). Ao sul, em contato com os metapelitos, predominam mármores calcíticos “puros”, de cor cinza claro a escuro, mais enriquecidos em CaO e depletados em SiO₂, FeO e MgO, relativamente aos demais tipos. Ocorre ainda uma intercalação de lente de mármore “carbonoso” (grafitoso) de coloração preta, contendo cristais de pirita. Na porção centro-norte aflora uma unidade de mármores calcíticos “impuros”, caracterizada por intercalações de cálcio-filitos e calcarenitos. À nordeste dominam mármores “bandados”, com alternância rítmica de bandas cinza (calcíticas) e bandas claras (magnesianas/dolomíticas). Finalmente, no extremo sul da malha, aflora a unidade metapelítica formada

por quartzo-mica xistos, filitos e cálcio-filitos, localmente tectonizados, gerando uma foliação tipicamente anastomosada. O mapa geológico da área é apresentado na Figura 2.

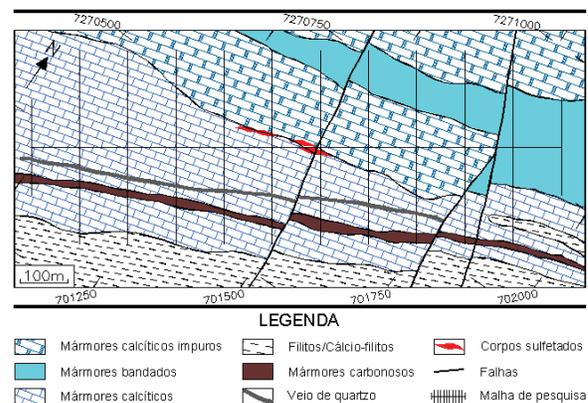


Figura 2 – Mapa geológico simplificado da área das ocorrências de Galeria Velha - PR.

Os diagramas da foliação principal Sn indicam a presença de dobramentos regionais, cujos eixos estatísticos situam-se em torno de N64E, com caimentos desde horizontais até 22°. Estes valores são compatíveis com os eixos de microdobras medidos em afloramentos. Já a leitura do diagrama de roseta revela que o principal sistema rúptil presente na área está orientado segundo a classe N15-30W, seguido pela seguinte ordem: N30-45W, N0-15W, N75-90E, N45-60E e N0-15E, sendo que o sistema N15-30W afeta diretamente os corpos sulfetados através de falhamentos com rejeito anti-horário.

O levantamento geoquímico realizado nas várias etapas do projeto envolveu 167 amostras de solo e 30 de minério e rocha. As amostras de canal em trincheira forneceram os seguintes resultados analíticos: 301-3670 ppm de Pb, 146-163 ppm de Zn, 141-230 ppm de Cu e 1-5 ppm de Ag. As análises realizadas em fragmentos de *gossans* recuperados de trincheiras, mostraram teores de 1203-3896 ppm de Cu, 0,56-3,0 % de Pb, 104-215 ppm de Zn e 2-37 ppm de Ag. As amostras de minério aflorante, coletadas em vários corpos de sulfeto, resultou nos seguintes teores: 0,15-0,56 % de Cu, 0,98-2,7% de Pb, 131-193 ppm de Zn, 1-78 ppm de Ag e 0,17-6,12 ppm de Au.

Resultados Obtidos

Os dados de polarização induzida espectral foram adquiridos segundo dois arranjos eletródicos, gradiente e dipolo-dipolo. No primeiro deles foi utilizada uma linha de corrente (AB) com 1.500 m de extensão, enquanto as medidas dos parâmetros

Polarização Induzida Espectral

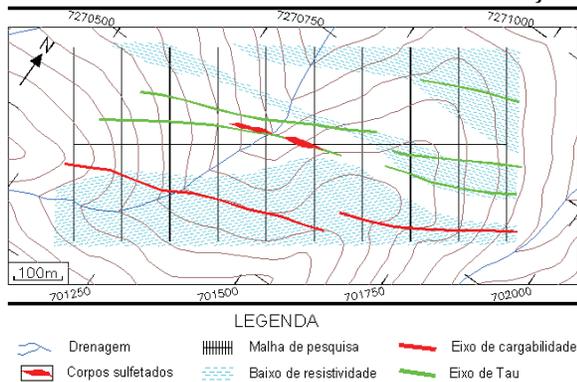


Figura 7 – Mapa de interpretação geofísica.

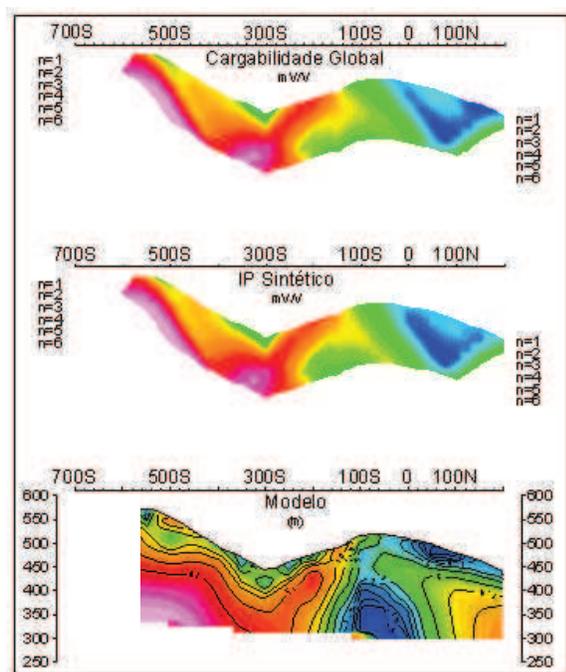


Figura 8 – Pseudo-seções de cargabilidade e o modelo de profundidade obtido por inversão (LT-700).

Conclusões

Os resultados e a interpretação dos ensaios de polarização induzida espectral (SIP), realizados na área das ocorrências de Galeria Velha, permitiram concluir: 1) o parâmetro espectral da constante de tempo, no modo gradiente, permitiu delinear uma zona de falha coincidente com exposições de sulfetos e anomalias geoquímicas de chumbo, zinco e ouro em solos; 2) as modelagens derivadas da inversão dos dados de cargabilidade e resistividade aparentes indicaram a continuidade em profundidade da citada zona de falha, apontando para o potencial da área e para o aprofundamento da pesquisa.

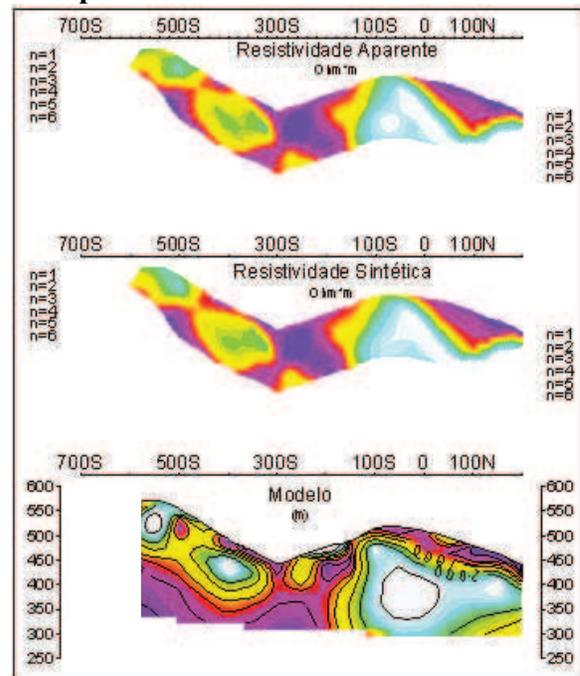


Figura 9 – Pseudo-seções de resistividade e o modelo de profundidade obtido por inversão (LT-700).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Projeto Geofísica Aplicada CNPQ/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3 e à Paraná Comércio, Administração S.A., a liberação dos dados.

Referências Bibliográficas

- Cole, K.S. & Cole, R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J Chem. Phys.* v. 9, p.341.
- Dias, C.A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77 (26):4945-4956.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v.42, p. 1020-1036.
- Johson, I.M. 1990. Spectral IP parameters from time-domain measurements, p. 57-78. *In: Induced Polarization – Applications and Case Histories*, SEG.
- Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *Advanced Geosciences, Inc.* 58p. (<http://www.agiusa.com>).
- Pelton, W.H. et al. 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, v. 43, p. 588-609.
- Sampaio, E.S. et al. 1993. Polarização Induzida Espectral em Santa Luz - Ba. 3º Congresso da Sociedade Brasileira de Geofísica, SBGF, RJ, v.I, p.503-508.