

Ensaio de Polarização Induzida Espectral (SIP) Aplicados à Exploração Mineral de Chumbo e Zinco nos Corpos Canoas 2 e Canoas 3, Vale do Ribeira-PR

Francisco José Fonseca Ferreira⁽¹⁾; Elias Carneiro Daitx⁽²⁾; Rodoilton Stevanato⁽¹⁾; Maximilian Forlin⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR; ⁽²⁾IGCE/UNESP/Rio Claro-SP

Abstract

The Spectral Induced Polarization method (SIP) involves techniques considered to complement those as resistivity and chargeability methods in traditional induced polarization surveys. The paper discusses the results derived from a line that runs 1,325 m across Canoas 2 and Canoas 3 bodies identified through rotary sounding. Dipole-dipole with $a = 50$ m was the electrode array used. The mineralized areas correspond to sulphide concentration (sphalerite, galena, pyrite, pirrotite), with average grades of 3.5% (Zn), 3.2% (Pb) and 63 g/ton (Ag). Inversion of the mean IP values allowed a good subsurface delimitation of the bodies, and the analysis of the spectral parameters (time constant and true chargeability) shows simultaneous elevation of those parameters at depths that correspond to those of the mineralized bodies.

Introdução

O método da polarização induzida (*induced polarization - IP*) é frequentemente empregado na exploração mineral, sobretudo na prospecção de metais base e de 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 do Instituto de Geociências da UNESP/Rio Claro-SP, realizou ensaios de polarização induzida espectral (*spectral induced polarization - SIP*) com o objetivo de testar a performance do método e avaliar os resultados em concentrações sub-superficiais (depósitos “cegos”) de sulfetos metálicos estratiformes (Zn-Pb-Ag), detectadas por sondagens rotativas na área da jazida Canoas, município de Adrianópolis, PR.

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 frequência (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 frequência. 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 = frequência 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 granulção 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 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

Polarização Induzida Espectral

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 EM5000S.

Geologia da Jazida Canoas

As mineralizações de zinco-chumbo-prata que compõem a jazida Canoas foram descobertas em 1981 no decorrer de um programa exploratório regional de metais base conduzido pela empresa Plumbum. A seleção da área foi feita a partir de anomalias detectadas em sedimentos de corrente e em solos; um programa de sondagens levou à descoberta de três corpos sulfetados (denominados Canoas 1, Canoas 2 e Canoas 3), cujas reservas totalizavam aproximadamente um milhão de toneladas de minério, com teores médios de 3,5 % de Zn, 3,2 % de Pb e 63 g/t de Ag. Os corpos Canoas 1 e Canoas 2 foram parcialmente lavrados no período entre 1988 e 1995; o corpo Canoas 3 não chegou a ser totalmente dimensionado devido ao encerramento das atividades de pesquisa e lavra na região, em 1995.

As mineralizações correspondem a concentrações de sulfetos (esfalerita, galena, pirita, pirrotita) em rochas baritíferas, carbonático/cálcio-silicáticas e carbonático-(micáceas) que integram a Unidade Intermediária do Complexo Perau, de suposta idade mesoproterozóica. A jazida é considerada do tipo sedimentar-exalativa, devido ao seu caráter estratiforme e à sua associação com camadas de barita e de formações ferríferas à magnetita (Daitx, 1996).

Os corpos Canoas 2 e Canoas 3 apresentam-se como lentes alongadas na direção NE-SW, com caimento regional ao redor de 10°, concordantes ao pacote carbonático encaixante, que apresenta espessura média da ordem de 25 m. O corpo Canoas 2 ocorre a profundidades variáveis entre 38 m e 47 m, apresentando uma largura aproximada de 200 m e espessura máxima de 7 m. O pacote mineralizado é

composto por uma camada rica em barita, na base, com espessura ao redor de 2 m, sobreposta por rochas carbonático-cálcio-silicáticas e por rochas (carbonático)-micáceas na porção superior. Nas porções inferior e média do pacote, a mineralização é predominantemente do tipo disseminada, com galena > esfalerita > pirita; na porção superior predomina a esfalerita sobre a galena, com maior participação de pirrotita, formando minérios do tipo semi-maço; no topo predomina pirita e/ou pirrotita em minérios do tipo semi-maço e maço, com participação subordinada dos demais sulfetos. O corpo Canoas 3 ocorre a maiores profundidades (entre 78 m e 101 m) e apresenta largura da ordem de 160 m, com espessura máxima de 7,5 m. Na seção atravessada ocorrem apenas os minérios do tipo carbonático/cálcio-silicático e (carbonático)-micáceo, com características semelhantes às dos minérios do corpo Canoas 2; no topo ocorre igualmente um nível enriquecido em pirrotita, na forma de minérios do tipo semi-maço e maço.

Resultados Obtidos

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 1 a 5 e foram derivados de uma linha de *SIP* sobre os corpos Canoas 2 e Canoas 3, com 1.325 m de extensão e direção NW-SE, perpendicular à dos corpos, na qual foi empregado o arranjo dipolo-dipolo com $a = 50m$ e seis níveis de investigação. As profundidades adotadas para os mencionados níveis, em função do espaçamento do arranjo utilizado, foram aquelas sugeridas por Edwards (1977), ou seja, $n1 = 21m$; $n2 = 35m$; $n3 = 48m$; $n4 = 61m$; $n5 = 74m$ e $n6 = 87m$, mais aproximadas das profundidades reais dos corpos do que as normalmente aplicadas em levantamentos de *IP*. Tal disposição eletródica, entretanto, não é a ideal em situações onde predominam estruturas horizontais (Figura 2), uma vez que o arranjo dipolo-dipolo discrimina melhor a variação horizontal de resistividade/cargabilidade, ou seja, estruturas verticais estreitas (Loke, 2000). Para superar esta limitação, o segmento da linha correspondente ao corpo Canoas 2 foi também perfilado no modo Cole-Cole, com o arranjo Wenner ($a = 25m$), mais sensível à variações verticais e portanto mais adequado para a presente situação geológica, contemplando oito níveis de investigação. Os resultados obtidos, assim como a comparação com os dados oriundos do arranjo dipolo-dipolo, serão objeto de outra nota.

Todos os dados foram processados no módulo *IP* da *Geosoft OASIS Montaj™* (5.06), e os resultados das inversões da resistividade e da cargabilidade

Polarização Induzida Espectral

aparentes foram obtidos através do pacote *Zonge 2D Inversion for Interactiv™ IP*, da *Interpex/Geosoft*.

Como se pode observar nas figuras 1 e 2, as pseudoseções de cargabilidade e de resistividade não apresentam padrões típicos de corpos verticalizados, em função da realidade geológica, o que dificulta a interpretação do posicionamento das concentrações mineralizadas. Entretanto, o modelo de profundidade obtido por inversão dos dados aparentes de *IP* (Figura 1) foi considerado satisfatório, uma vez que identificou com clareza o posicionamento dos dois corpos de minério (valores de cargabilidade entre 5 e 10 mV/V para ambos os corpos), como também logrou êxito na definição aproximada de suas profundidades (compare as figuras 1 e 3), além de refletir a disposição das camadas do perfil geológico. Já o modelo da Figura 2, ao contrário, mostrou diferenças significativas da resistividade nos segmentos ocupados pelos corpos Canoas 2 e Canoas 3. No primeiro deles os valores variaram entre 500 à maiores que 1.000 $\Omega.m$, enquanto no outro as resistividades modeladas são bem maiores (500 a > 10.000 $\Omega.m$). Tais índices podem ser interpretados pelos contrastes de espessuras de rochas resistivas entre os mencionados tratos (Figura 2). A Figura 2, portanto, reflete as propriedades elétricas das litologias envolvidas e não os corpos mineralizados, talvez como decorrência das pequenas espessuras de material condutivo quando comparadas com o semi-espaço resistivo. Por outro lado, as baixas resistividades aparentes da porção central do perfil (Figura 2) constituem resposta de uma zona intensamente fraturada/falhada, com soerguimento do embasamento quartzítico de pelo menos 30m, caracterizando um *horst* entre as estações 600N e 800N, o que permite maior infiltração e percolação das águas superficiais e subterrâneas, respectivamente, portanto incrementando a condutividade elétrica no citado segmento do perfil geológico (compare as figuras 2 e 3).

Parâmetros Espectrais

A pseudoseção espectral da constante de tempo (τ), apresentada na Figura 4, identifica bem os dois corpos de minério, posicionados entre as estações 950-1075N e 450-550N (Figura 3), não obstante as distorções provocadas pela disposição dos estratos. Já a Figura 5, da cargabilidade verdadeira (*m*), não reflete claramente os dois corpos pelos mesmos motivos citados anteriormente. Os valores de τ e *m* típicos dos corpos Canoas 2 e 3 são apresentados nas tabelas 1 e 2, respectivamente, juntamente com outros parâmetros da polarização induzida (cargabilidade

global aparente – **IP(a)** e resistividade aparente – **Res(a)**. É interessante notar na Tabela 1 que existe um incremento de τ e *m* nos níveis 2 e 3, em correspondência ao Corpo Canoas 2, o mesmo ocorrendo com a cargabilidade global aparente. Já na Tabela 2, tais incrementos são verificados nos níveis 5 e 6, justamente coincidentes com a profundidade do corpo Canoas 3. Nota-se também nas referidas tabelas que a resistividade aparente diminui nos citados níveis. Os índices espectrais médios de τ são 2.41 e 0.71 e os de *m* são 83 e 62, para os corpos Canoas 2 e 3, respectivamente, sugerindo, de acordo com Pelton *et al.* (1978), que os teores deveriam ser maiores no primeiro deles. Os dados divulgados por Daitx (1996), em contraste, mostram que os teores são maiores em Canoas 3, da ordem de 3,4 % de Pb e 4,0 % de Zn, do que em Canoas 2 (2,5 % de Pb e 2,5 % de Zn). Entretanto, tais dados não refletem o conjunto dos sulfetos. Considerando que pirita e galena predominam no Corpo Canoas 2, e que as elevadas quantidades de esfalerita em detrimento da galena estão associados, relativamente, com pouca pirita em Canoas 3 (Daitx 1996), é possível explicar o incremento da cargabilidade aparente e dos parâmetros espectrais em Canoas 2 como função da maior contribuição da pirita em relação à galena.

Níveis	IP(a)	Res(a)	τ	<i>m</i>
n1=21m	4.7	68	0.02	74
n2=35m	5.8	120	0.12	86
n3=48m	6.5	148	7.70	92
n4=61m	7.0	196	5.37	97
n5=74m	6.0	300	1.25	73
n6=87m	6.0	300	0.02	75
Média	6.0	189	2.41	83

Tabela 1 – Parâmetros espectrais do corpo Canoas 2.

Níveis	IP(a)	Res(a)	τ	<i>m</i>
n1=21m	4.0	138	0.04	61
n2=35m	3.9	143	0.02	59
n3=48m	4.4	139	0.26	61
n4=61m	4.3	131	3.13	58
n5=74m	4.4	121	0.60	63
n6=87m	5.1	100	0.18	68
Média	4.3	128	0.71	62

Tabela 2 – Parâmetros espectrais do corpo Canoas 3.

Conclusões

Os resultados e a interpretação dos ensaios de polarização induzida espectral (*SIP*), realizados sobre depósitos “cegos” da jazida Canoas, mostraram-se satisfatórios uma vez que: 1) permitiram posicionar em profundidade os corpos Canoas 2 e 3; 2) o modelo de cargabilidade global verdadeira, obtido por inversão, refletiu a disposição horizontalizada do

Polarização Induzida Espectral

minério e dos estratos geológicos; 3) o incremento dos parâmetros espectrais e da cargabilidade aparente em Canoas 2 foi interpretada pela maior contribuição de pirita, em relação à Canoas 3, apesar dos menores teores de chumbo e zinco.

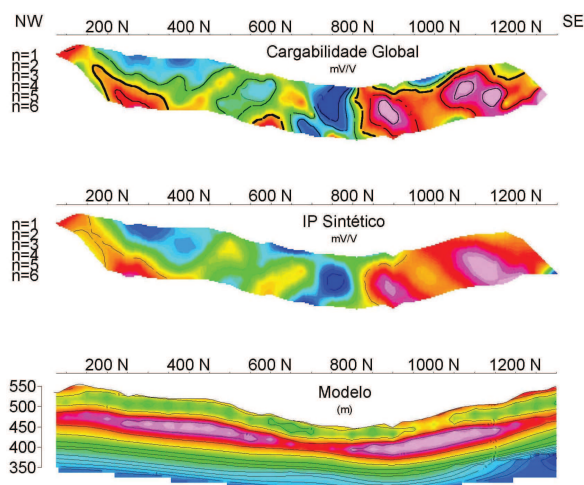


Figura 1 – Pseudo-seções de cargabilidade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

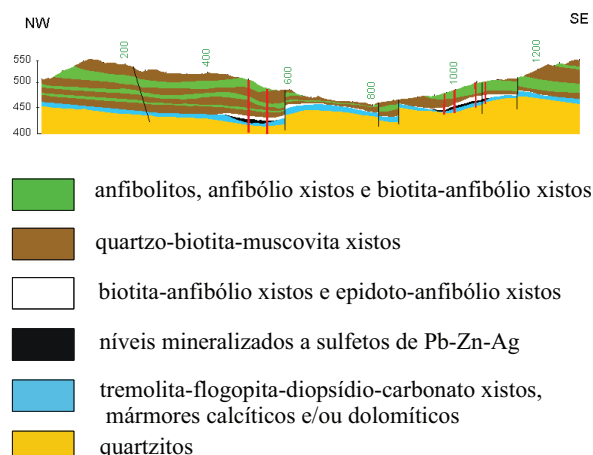


Figura 3 – Perfil geológico indicando os corpos de minério Canoas 3 (NW) e Canoas 2 (SE).

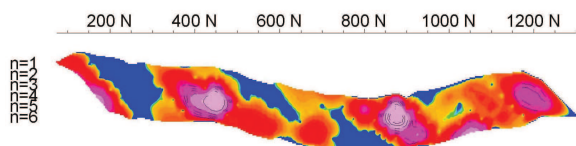


Figura 4 – Pseudoseção da constante de tempo (τ).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Projeto Geofísica Aplicada CNPq/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3, o apoio para a realização desta pesquisa.

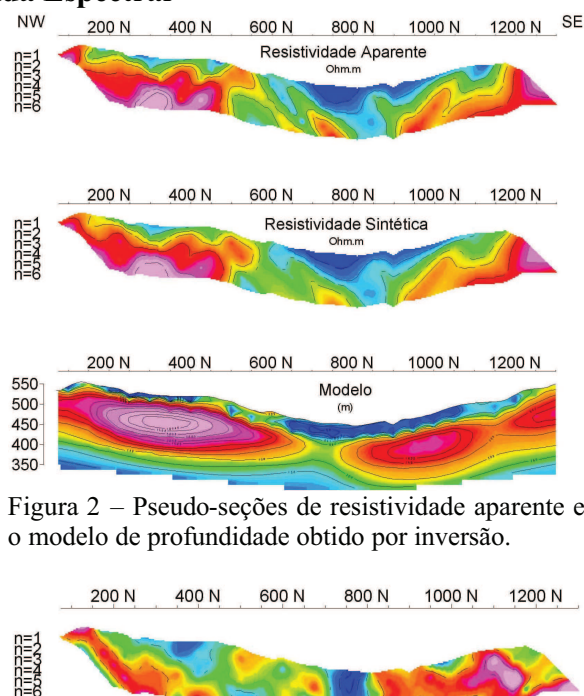


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade aparente e o modelo de profundidade obtido por inversão.

Figura 5 – Pseudo-seção da cargabilidade verdadeira.

Referências Bibliográficas

- Cole, K.S. & Cole, R.H. 1941. Dispersion and absorption in dielectrics. *J. Chem. Phys.* v. 9, p. 341.
- Daitx, E.C. 1996. Origem e evolução dos depósitos tipo-Perau (Pb-Zn-Ag), com base nas jazidas Canoas e Perau, Vale do Ribeira-PR. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, UNESP, Rio Claro, 435p.
- 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.