

## Aplicação do Método da Polarização Induzida Espectral (SIP) na Descoberta do Depósito Breves, Província Mineral de Carajás-PA

J. L. do Rêgo <sup>(1)</sup>; A. R. Nunes <sup>(1)</sup>; R. Stevanato <sup>(2)</sup>; P. E. Lima da Silva <sup>(3)</sup>; F. J. F. Ferreira <sup>(2)</sup>; J. B. Siqueira <sup>(1)</sup>  
<sup>(1)</sup> Companhia Vale do Rio Doce, CVRD; <sup>(2)</sup> Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, LPGA/UFPR;  
<sup>(3)</sup> Geoprospec, Prospecção Geológica Ltda.

### Abstract

The spectral induced polarization – SIP designate a variety of methods which look beyond the familiar resistivity and chargeability as measured in induced polarization surveys, that analysis electrical survey data at a number of frequencies or delay times. A set of quantities which characterize the information gained. The Cole-Cole impedance model is adopted for the study of the spectral IP effect's on time-domain measurements. The spectral induced polarization applied to near Igarapé Bahia gold mine exploration, makes possible, the detailed analysis of areas, pre-selected by induced polarization surveys, using gradient array. It has been useful for modeling and understanding chargeability anomalies in Breves deposit. Enable us to identify different types of anomalies, distinguishing disseminated sulfide concentrations related anomalies, from those related to membrane polarization effect, related to rocks composed dominantly by clay minerals, with carbonaceous material and manganese. The contribution of spectral induced polarization survey, carried out by CVRD and LPGA, comprises drilling optimization and exploration costs reduction. This paper presents as results, the characterization of Breves deposit. Cole-Cole analysis parameters signature, characterized by disseminated sulfide concentrations related to medium chargeability ( $m$ ) and Tau ( $\tau$ ) values, while high chargeability ( $m$ ) and Tau ( $\tau$ ) values, are relate to rocks with high contents of clay minerals, with manganese and carbonaceous material.

### Introdução

Recentemente, a equipe do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada - LPGA/UFPR, juntamente com geofísicos da Geoprospec – Prospecção Geológica Ltda e geólogos da Companhia Vale do Rio Doce – CVRD, realizou levantamentos de polarização induzida espectral (SIP), no modo dipolo-dipolo, com o objetivo de testar a hipótese da CVRD, vinculada à existência de zonas sulfetadas primárias em profundidade, responsáveis pelas concentrações auríferas associadas com crostas lateríticas, *gossans* e veios de quartzo no denominado Alvo Breves, Mina do Igarapé Bahia, Província Mineral de Carajás-PA.

Na tentativa de rastrear as zonas sulfetadas em profundidade, foi feito um levantamento IP, no

arranjo gradiente (AB=1600 m), o qual mostrou grande eficiência na cobertura de grandes áreas a um custo reduzido. Neste levantamento foram identificadas anomalias de cargabilidade, sugerindo a presença de sulfetos disseminados em profundidade, o que suportou a locação de furos de sonda. Nessa campanha os furos interceptaram expressivos intervalos com sulfetos disseminados, preenchendo fraturas em padrão *stockwork*, mineralizados em Cu, Au, Ag, W, Sn, Mo e Bi. Com o objetivo de delinear detalhadamente as anomalias geradas pelo levantamento no arranjo gradiente e otimizar a sondagem, foi aplicado o método SIP.

O presente trabalho discute os resultados de SIP obtidos em duas linhas, selecionadas de um conjunto de nove seções, com 4.000 m de extensão cada, direção E-W, os quais suportaram novas perfurações pela CVRD. Do mesmo modo, os furos interceptaram intervalos significativos de minério, otimizando a campanha de sondagem no depósito Breves. Os trabalhos de pesquisa da CVRD ainda estão em fase de individualização dos corpos mineralizados, mas já indicam recursos da ordem de 50 milhões de toneladas de sulfetos mineralizados em cobre, ouro, prata, tungstênio, estanho, molibdênio e bismuto.

### O Método da Polarização Induzida Espectral

O método SIP pode adotar os modelos de impedância Cole-Cole (Pelton *et al.*, 1978) 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 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 -  $\tau$  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.

Para alvos convencionais de IP,  $\tau$  varia desde milissegundos 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. De acordo com Pelton *et al.* (1978), 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

## Polarização Induzida Espectral

exemplo, a discriminação entre grafita e outros minerais polarizáveis e sulfetos de interesse econômico. Estes últimos autores verificaram que os parâmetros espectrais  $c$  e  $R_0$  variam pouco com o tipo de mineralização e o primeiro deles é um fator independente e praticamente constante, enquanto  $\tau$  e  $m$  são os mais importantes e estão relacionados com os teores e a granulometria do minério. Os experimentos de Pelton *et al.* (1978) demonstraram 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 ( $R_0$ ,  $m$ ,  $\tau$  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.

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 e  $\tau$  entre 10ms e 100s, 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 utilizado nos ensaios, fabricado pela *Iris Instruments*, envolve um receptor multicanal (ELREC-10), um transmissor (VIP-3000) com potência máxima de 3kW, alimentado por um gerador Honda EM5000.

### Geologia e Mineralizações do Depósito Breves

O depósito Breves situa-se no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, o qual hospeda a Província Mineral de Carajás (Docegeo, 1988). O Alvo foi inicialmente pesquisado pela Rio Doce Geologia e Mineração S.A. – Docegeo, nas décadas de 80 e 90. Os primeiros indícios das mineralizações revelaram fortes anomalias de cobre em sedimentos de corrente ( $> 400\text{ppm}$ ). O levantamento geoquímico de solo, posterior, resultou em anomalias discretas de Au, acima de 4,5 ppb, com valores de até 347 ppb, situadas nas bordas do platô, onde afloram colúvios e crostas lateríticas. A investigação direta da principal anomalia, através de trincheiras e sondagens rotativas, revelou mineralizações auríferas associadas às crostas lateríticas e veios de quartzo.

No segundo semestre de 1997 a CVRD retomou as pesquisas no Alvo, com o objetivo de ampliar as reservas de minério aurífero oxidado para beneficiá-lo na planta da Mina do Igarapé Bahia. Uma campanha de sondagens por circulação reversa mostrou a

potencialidade do Alvo para reservas de minério de ouro no horizonte oxidado, associados a *gossans*, veios de quartzo e crosta laterítica (pisolítica), com possibilidade de extensão em profundidade. Entretanto, mesmo após as sondagens, desconhecia-se o controle da zona mineralizada, a fonte primária do ouro laterítico e os sulfetos responsáveis pela formação dos *gossans*.

Os modelos dos depósitos de cobre e ouro da Província são caracterizados pela presença de *gossans* sobre corpos sulfetados, principalmente maciços, com desenvolvimento de carapaça laterítica e crosta pisolítica, além de uma espessa cobertura de latossolo empobrecido em metais. No perfil de intemperismo do Platô Breves, ocorre também uma espessa cobertura de latossolo, que grada em espessura na direção da borda, onde afloram crostas lateríticas compactas e/ou friáveis, estas últimas constituindo as zonas de colúvio. Abaixo da crosta pisolítica ocorre um pacote de saprólito ferrífero com *boxworks*, sugerindo a presença de sulfetos disseminados e *gossans* associados aos veios de quartzo, frequentemente mineralizados em ouro.

A mineralização cupro-aurífera pode ser enquadrada no modelo de depósitos de Au relacionado à intrusões, em correspondência à províncias de W e Sn, o qual envolve uma associação de Au, Cu, Ag, Sn, W, Mo e Bi, vinculada à intensa atividade metassomática e hidrotermal gerada pela intrusão ígnea. A principal zona mineralizada ocorre em um *greisen* relacionado ao ápice de uma intrusão granítica alcalina peraluminosa que passa, na base, à uma rocha subvulcânica de composição riolítica, geneticamente relacionada à intrusão granítica, encaixada em metassedimentos laminados de baixo grau (metarenitos, metasiltitos e metargilitos). A mineralogia sulfetada é representada por calcopirita, pirita, arsenopirita, pirrotita, molibdenita e feberita, que ocorrem disseminados e preenchendo fraturas em padrão *stockwork*. A mineralização pode também ocorrer nas encaixantes metassomatizadas, próxima à intrusões, em veios e/ou disseminadas, no primeiro caso na forma *stratabound*. O contexto estrutural e tectônico é representado pela zona de cisalhamento transcorrente que envolve a falha de Carajás e *splays*, de direção geral WNW-ESSE, constituindo um padrão em Z. A direção predominante do sistema de fratura que aloja a mineralização é representada por um par conjugado N45E-N15W. A intrusão granítica está orientada segundo NNE e é truncada por sistemas de fraturas em *stockwork*. Também ocorrem sistemas de falhas normais de direção predominantes N-S, formadas em evento tardio, com magmatismo associado (diques de gabro granofírico).

## Polarização Induzida Espectral

### Resultados Obtidos

Os resultados obtidos são apresentados nas figuras 1 a 8, e foram derivados de duas linhas de SIP (LT 200S e LT 300S), nas quais foi empregado o arranjo dipolo-dipolo com  $a = 80\text{m}$  e seis níveis de investigação. As profundidades adotadas para os mencionados níveis, em função do espaçamento utilizado, foram aquelas intermediárias entre as máximas e as mínimas sugeridas por Edwards (1977).

Todos os dados foram processados no módulo IP da *Geosoft OASIS Montaj™* (5.06) e os resultados das inversões da resistividade e da cargabilidade global aparentes (cálculos dos modelos de profundidade), foram obtidos através do pacote *Zonge 2D Inversion for Interactiv™ IP*, da *Interpex/Geosoft*.

Como observa-se nas seções geofísicas, o comportamento da cargabilidade (mV/V), da resistividade (Ohm\*m) e da constante de tempo ( $\tau$  em s), permitem distinguir três tratos, assim descritos: 1) extremos W e E, caracterizados por altos valores de cargabilidade aparente e de  $\tau$  e baixas resistividades; 2) segmento central (700W a 1000E), individualizado por índices baixos das duas primeiras variáveis e altos da última; 3) zona mineralizada (centrada na estação 400W), incluída no segmento anterior e identificada por grandezas intermediárias dos citados parâmetros, como pode-se observar na Tabela 1, a qual também exibe os teores de Au e Cu.

|                | Trato 1 | Trato 2 | Minério |
|----------------|---------|---------|---------|
| Au (g/t)       | -----   | -----   | 1,59    |
| Cu (%)         | -----   | -----   | 1,25    |
| Cargabilidade  | 45      | 15      | 30      |
| Resistividade  | 500     | 8000    | 1500    |
| Tau ( $\tau$ ) | 25,0    | 0,2     | 2,7     |

Tabela 1 – Parâmetros geofísicos típicos de SIP e os teores médios do minério.

Os parâmetros geofísicos relacionados aos extremos das seções (trato 1), refletem litologias condutivas compostas por metassedimentos laminados ricos em manganês e grafita. O trato 2, encoberto por solos e crostas lateríticas, denotado pelo platô, é caracterizado por uma assinatura de SIP distinta, tanto dos metassedimentos quanto do minério. Já o trato 3 reflete a zona mineralizada, a qual foi identificada por diversos furos de sonda (figuras 3 e 7), composta por *greisens* com sulfetos disseminados, justificando os valores espectrais (Tabela 1).

Os modelos das figuras 1, 2, 5 e 6, obtidos por inversão das cargabilidades e das resistividades aparentes, mostram com clareza a localização do

corpo subvertical e do *front* mineralizado, relacionado à intrusão da cúpula granítica, em contraste com a disposição regional horizontalizada dos metassedimentos da Formação Águas Claras.

### Conclusões

A aplicação de SIP na descoberta do depósito Breves mostrou que o método é eficiente na discriminação de anomalias de IP, sobretudo através do parâmetro espectral da constante de tempo ( $\tau$ ), relacionado à granulometria dos minerais polarizáveis. Assim, altos valores de cargabilidade e de  $\tau$  estão vinculados ao efeito de polarização de membrana, gerado pela presença de rochas metassedimentares ricas em argilo-minerais, com manganês e grafita, enquanto as concentrações de sulfetos disseminados estão associados à índices intermediários daquelas variáveis. Por fim, os modelos derivados da aplicação de técnicas de inversão dos dados de cargabilidade e resistividade aparentes, tiveram papel importante no posicionamento dos corpos mineralizados e na consequente otimização da locação das sondagens.

### Referências Bibliográficas

- Dias, C.A. 1972. Analytical model for a polarizable medium at radio and lower frequencies. *Journal of Geophysical Research*, 77 (26):4945-4956.
- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, Anexo aos *Anais*, p.11-56.
- Edwards, L.S. 1977. A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, v.42, p. 1020-1036.
- Johnson, I.M. 1990. Spectral IP parameters from time-domain measurements, p. -78. In: *Induced Polarization – Applications and Case Histories*, Society of Exploration Geophysicists, SEG.
- 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.

**Agradecimentos** Os autores agradecem ao CNPq/PADCT, Contrato N° 62.0155/97-3, o apoio para a realização desta pesquisa; à CVRD pela liberação dos dados e à Geoprospec pelo apoio financeiro.

## Polarização Induzida Espectral

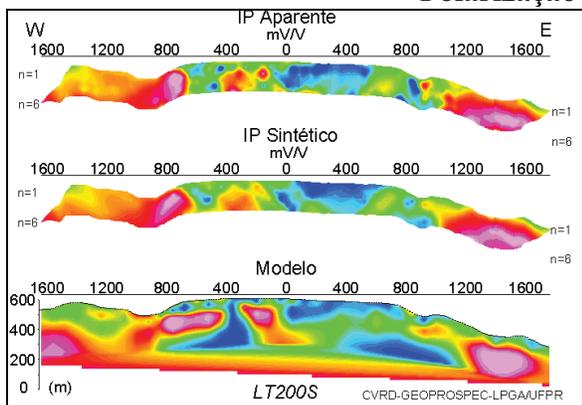


Figura 1 – Pseudo-seções de cargabilidade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

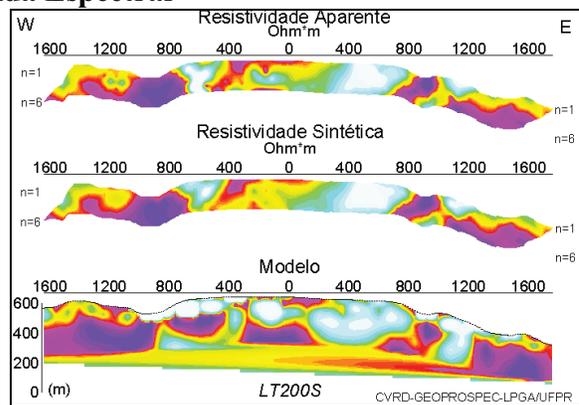


Figura 2 – Pseudo-seções de resistividade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

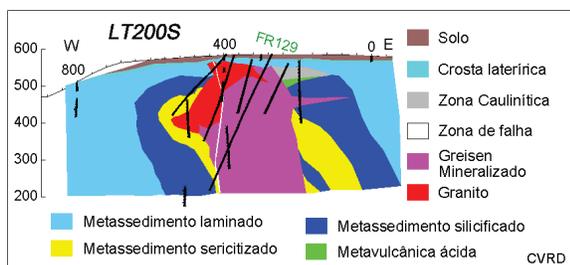


Figura 3 – Perfil geológico indicando a zona mineralizada e suas encaixantes.

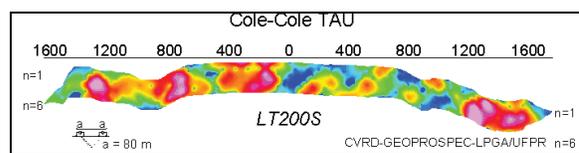


Figura 4 – Pseudo-seção da constante de tempo ( $\tau$ ).

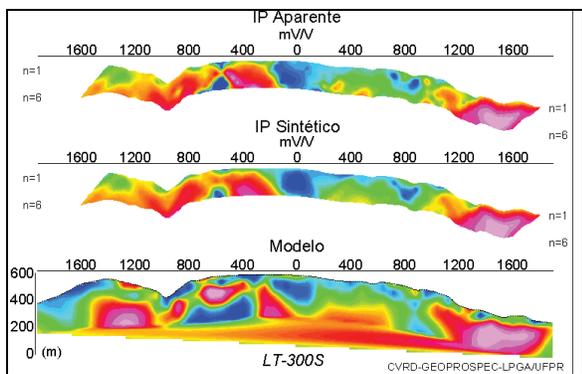


Figura 5 - Pseudo-seções de cargabilidade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

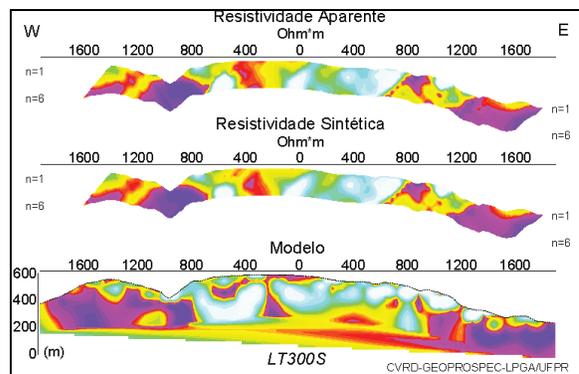


Figura 6 - Pseudo-seções de resistividade e o modelo de profundidade obtido por inversão.

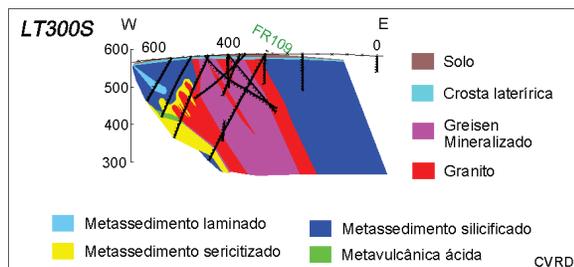


Figura 7 – Perfil geológico indicando a zona mineralizada e suas encaixantes.

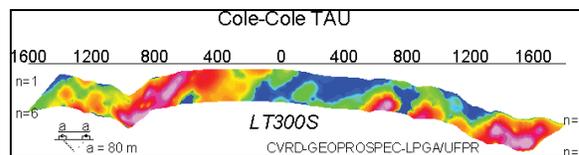


Figura 8 – Pseudo-seção da constante de tempo ( $\tau$ ).