



## Efeito da Zona de Transição entre Camadas nos Perfis de Indução EM

Paulo Roberto de Carvalho<sup>v</sup>, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Brasil

Om Prakash Verma e Licurgo Peixoto de Brito, Universidade Federal do Pará – UFPA, Brasil

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

Very frequently the transition between the beds in a geologic sequence is gradational but in the modeling these interfaces are represented as sharp boundaries in form of step profiles. This would causes some discrepancies between the field and synthetic electromagnetic induction borehole profiles. Besides this, other factors that can cause discrepancies are: that in modeling a point source is considered than a coil, and the borehole and invasion effects are ignored. Also omitted in our study. Although these later effects are studied by some authors but the gradational transition zone effects between beds is yet to be analysed. We report some of these effects here.

A comparative study of a gradational and a step transition zone responses is carried out. The “polarization horns” which appear in the coplanar array profiles, and in inclined bed and / or inclined borehole profiles of the coaxial arrays are smoothed due to the gradational transition. Therefore, one has to be careful in the interpretation of the actual profiles in simply applying “polarization horns” as bed boundary indicators based on the synthetic modeling profiles.

### Introdução

A modelagem computacional de poço utiliza, quase que na sua totalidade, perfis sintéticos quadratizados (*step profiles*), ou seja, consideram passagens bruscas de condutividades entre camadas. Todavia, sabemos que nos meios geológicos estas transições são predominantemente gradacionais, embora sejam bem mais complexas de serem modeladas.

A modelagem das respostas de sondas com arranjo coaxial de bobinas, em poços perfurados verticalmente em formações com estratificação horizontal, apresentam uma boa similaridade com os perfis de campo. Entretanto, se a perfilagem for direcional e / ou a estratificação inclinada, *i.e.*, interfaces não estão normais ao eixo do poço, os perfis sintéticos e de campo começam a apresentar diferenças significativas. Anderson et. al (1990) observaram que nos perfis de

campo do Golfo do México os “*polarizations horns*” que apareciam defronte as interfaces das camadas nos perfis sintéticos sofriam uma forte redução, ou até mesmo desapareciam. Esta diferença foi atribuída a duas simplificações muito comuns nas modelagens: (1) fontes pontuais (Howard, 1997) e (2) ausência do poço e das zonas de invasão (Carvalho & Verma, 1994). Entretanto, poderemos ver que a discrepância entre as fronteiras dos modelos quadratizados (passagens bruscas) com as encontradas mais freqüentemente em campo (transições gradacionais) é, talvez, a maior razão das diferenças nas respostas entre os perfis sintéticos e de campo.

Os efeitos das zonas de transição entre camadas nas respostas das sondas com um par de bobinas coaxial e coplanar (Figura 4) são estudados comparativamente. As fontes e sensores foram simulados como pontuais e ignorado o efeito do poço e das zonas de invasão.

### Teoria e Método

As respostas para ambos os arranjos de dipolos foram obtidas de forma semi-analítica, através das condições de contorno nas fronteiras (*Sommerfeld Boundary Value Problem*). São utilizados modelos unidimensionais (1D) formado por superfícies plano-paralelas e horizontais, com a condutividade variando apenas verticalmente, sendo cada camada homogênea, isotrópica e ilimitada lateralmente.

Devido a linearidade dos campos eletromagnéticos (EM), por decomposição vetorial, podemos simular fontes pontuais em posições arbitrárias utilizando um clássico par de fontes: (1) o Dipolo Magnético Vertical (DMV) e o Dipolo Magnético Horizontal (DMH), respectivamente.

Através de técnicas de transformadas integrais, respostas de modelos com geometria unidimensional (1D) para fontes bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D), como nos casos dos modelos de interfaces plano-paralelas com fontes do tipo DMV (1D-2D) e fontes do tipo DMH (1D-3D), respectivamente, são tratados como problemas unidimensionais do tipo 1D-1D. Segundo Wait, 1982, estes resultados são interpretados como uma decomposição espectral dos campos em um contínuo de “ondas planas” com ângulo de incidência complexo.

### Modelos

Inicialmente são obtidas as respostas dos arranjos coaxial e coplanar utilizando os convencionais modelos quadratizados para uma camada espessa e condutiva (Figura 2) e para uma seqüência de multicamadas com elevado contraste de condutividade (Figura 3). Os gráficos estão na forma de condutividade aparente

versus profundidade normalizada com o espaçamento fonte-sensor ( $z/L$ ), geradas pelo sinais reativos ( $\sigma_{XF}$ ), resistivos ( $\sigma_R$ ) e corrigidos ( $\sigma_c$ ) pelos *boosters* de cada arranjo geométrico, respectivamente

Para estudar a influencia do tipo de zona de transição entre duas camadas espessas (dois semi-espacos) foram modeladas uma região de espessura igual a distância fonte-sensor ( $L$ ), com uma variação linear de condutividade entre os dois meios, na forma de “escadas” com 4 e 8 degraus, respectivamente (Figuras 4 e 5). Para efeito de comparação, foram também geradas as respostas para uma passagem brusca de condutividade, posicionada exatamente no meio da região de transição gradacional.

### Resultados

Pela Figura 2 podemos notar que a diferença mais evidente entre as respostas dos arranjos coaxial e coplanar está nas vizinhanças das fronteiras dos meios, pois enquanto o arranjo coaxial apresenta um padrão suave de curvas, o coplanar sofre uma forte variação, defronte às interfaces, exibindo um “pulso” (*polarization horns*). O motivo destes dois padrões distintos está ligado diretamente a natureza da fonte em cada um dos arranjos, ou seja, no caso do coaxial (DMV) os campos elétricos induzidos são contínuos nas interfaces, pois são todos paralelos a elas, enquanto no coplanar (DMH) eles interceptam estas superfícies que separam meios de condutividades distintas, gerando desta forma acúmulo de cargas elétricas que irão “perturbar” o sinal defronte às interfaces.

Nas respostas do arranjo coplanar poderemos observar que a distância entre as interfaces e qualquer um dos dois picos presentes nas suas respectivas deflexões (“horns”) é exatamente igual a metade do espaçamento fonte-sensor ( $L/2$ ), ou seja, elas podem ser utilizadas como precisos demarcadores de fronteira entre dois meios. Em contrapartida, o sinal corrigido ( $\sigma_c$ ) do arranjo coplanar demora bem mais para se ajustar ao modelo (*shoulder effect*).

Os “pulsos” não são exclusivos dos perfis do arranjo coplanar pois Howard & Chew (1992) obtiveram deflexões (*horns*) bastante similares com o convencional arranjo coaxial, em perfis com ângulos superiores a 60° e modelos com elevados contrastes de condutividade (acima de 10 vezes). Ao inclinar o arranjo coaxial, a fonte deixa de ser puramente do tipo DMV e o sinal registrado no sensor passa a ter uma contribuição cada vez maior dos campos gerados por uma componente do tipo DMH, ou seja, a orientação dos campos EM com relação as interfaces passam a ser mais do tipo TM do que TE (Anderson et al., 1986). Estas observações podem ser vistas na Figura 3 bem como podemos verificar, para ambos os arranjos de bobinas, que além da inclinação do eixo de perfilagem, as magnitudes dos *polarizations horns* estão em função dos

contrastes de condutividades e das frequências de operação das sondas.

Anderson et al. (1990) estudaram o comportamento dos *polarizations horns* do arranjo coaxial gerados computacionalmente (*semi-analytic and FEM*), experimentalmente (*test tank*) e obtidos em campo, e chegaram a conclusão que será apresentada na sua forma original de publicação: “*Since the horn is located directly at the bed boundary, it is a high quality bed boundary indicator for large resistivity contrast in steeply dipped beds*”. Deste modo, é importante salientar que para se obter os “pulsos” defronte as interfaces das camadas (*horning effects*) nos perfis do arranjo coplanar não são necessárias nenhuma das duas condições citadas pelos autores, ou seja (1) elevado contraste de resistividade e (2) ângulo de inclinação acentuado (Carvalho and Verma, 1998).

Nas Figuras 4 e 5 os sinais do arranjo coaxial atravessam a fronteira entre dois semi-espacos de forma suave e buscam assintoticamente as condutividades dos respectivos meios, independente se ela é modelada como brusca (linha tracejada -  $\sigma_i^1$ ) ou gradacional (linha contínua -  $\sigma_i^2$ ). Já no arranjo coplanar, como as fontes geradoras de sinal do meio são correntes e cargas elétricas acumuladas na zona de fronteira, verifica-se uma visível suavização do “pulso” (*horn effects*). Este efeito é incrementado a medida que aumentamos o número de degraus na zona de transição de 4 (Figura 4) para oito (Figura 5).

### Conclusões

Uma vez que os *polarizations horns* estão associados ao acúmulo de cargas elétricas nas fronteiras entre dois meios condutivos, é de se esperar que eles sejam afetados pela natureza desta transição.

Nos modelos de perfilagem vertical ficou evidente que o tipo de fronteira afeta de forma bem mais acentuada as respostas do arranjo coplanar pois somente nelas aparecem os *polarizations horns*. Deste modo, nas perfilagens de poços inclinados, eles serão naturalmente suavizados pelas transições gradacionais, independente do arranjo geométrico de bobinas.

Apesar da grande complexidade de simular perfis com transições gradacionais é de fundamental importância estar atento para as discrepâncias apresentadas entre as respostas dos perfis sintéticos e de campo nos casos de: (1) camadas inclinadas; (2) poços inclinados e (3) sondas com fontes em posições arbitrárias (DMV e DMH).

### Referências

Anderson, B. I., Borner, S., Lüling, M. G. and Rosthal R., 1990. Response of 2-MHz LWD resistivity and wireline induction tools in dipping beds and laminated formations. In: Annual Logging Symposium, 31. Houston, USA. Anais SPWLA.

**Anderson, B. I.; Sainya, K. A. and Habashy, T., 1986.** Effects of dipping beds on the response of induction tools. In: Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, USA. Anais SPE.

**Carvalho, de P. R. and Verma, O. P., 1994.** Coplanar coil system in electromagnetic induction well-logging tool. In: Annual Logging Symposium, 35. Tulsa, USA. Anais SPWLA. v. II, EE.

**Carvalho, de P. R. and Verma, O. P., 1998.** Induction tool with a coplanar coil system. The Log Analyst, 39 (6): 48-53.

**Howard, A. Q. Jr., 1997.** Electromagnetic fields loop antenna with axis parallel to planar interface. Applied Geophysics. 38: 41-56.

**Howard, A. Q. Jr. and Chew., W. C., 1992.** Electromagnetic borehole fields in a layered, dipping-bed environment with invasion. Geophysics, 57 (3): 451-465.

**Wait, J. R., 1982.** Geo-electromagnetism. academic Press, Inc. 268p.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – MCT/CNPq pelo financiamento deste projeto.

Paulo R. de Carvalho agradece a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) pelo apoio, sem o qual não seria possível sua participação neste evento.

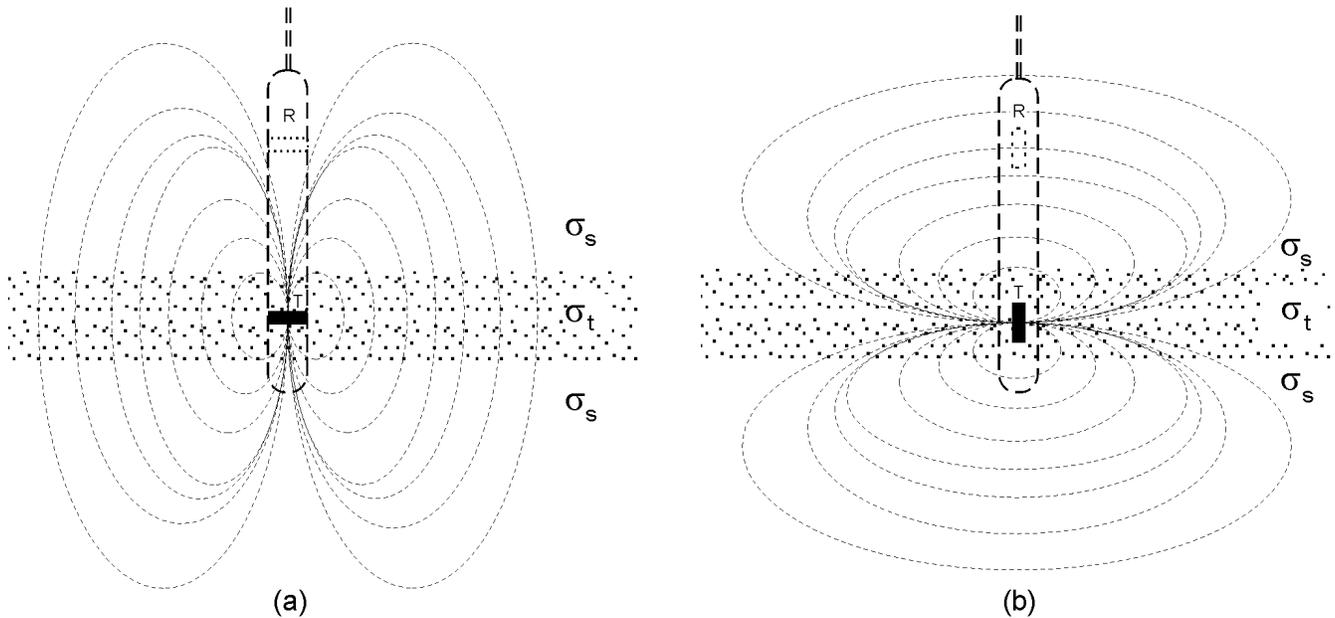


Figura 1 – Diagrama esquemático das sondas de indução EM de duas bobinas (  $T \neq$  fonte e  $R \neq$  sensor ) com os arranjos coaxial (a) e coplanar (b) num modelo formado por uma camada e dois semi-espacos iguais. As distribuições das linhas de campo magnético são puramente hipotéticas.

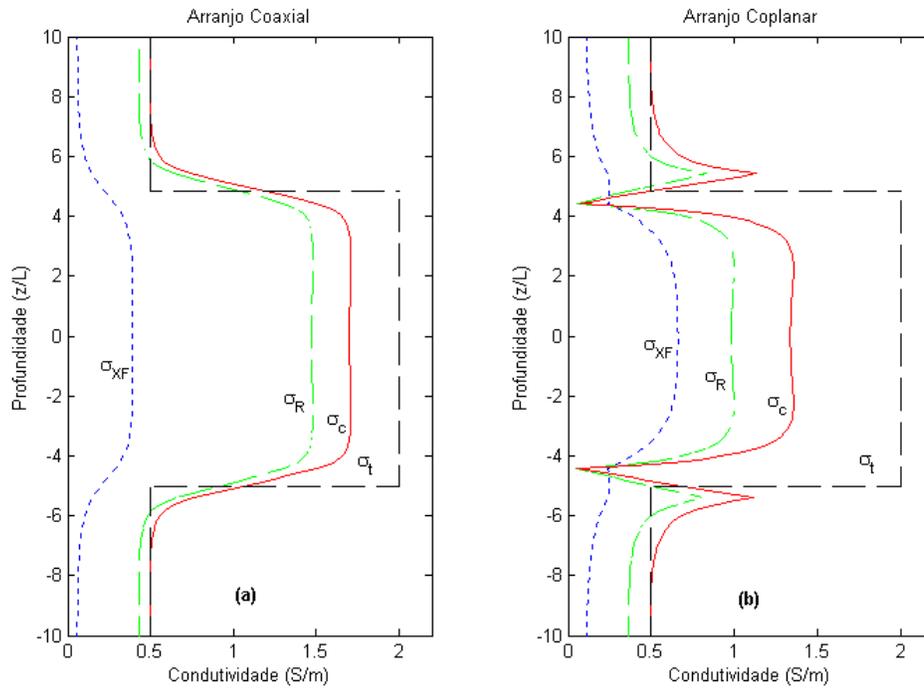


Figura 2 – Condutividades reativas ( $\sigma_{XF}$ ), resistivas ( $\sigma_R$ ) e corrigidas ( $\sigma_c$ ) de uma perfilagem vertical com os arranjos coaxial **(a)** e coplanar **(b)**, operando a 20 kHz, num modelo ( $\sigma_t$ ) de uma camada horizontal e dois semi-espacos iguais.

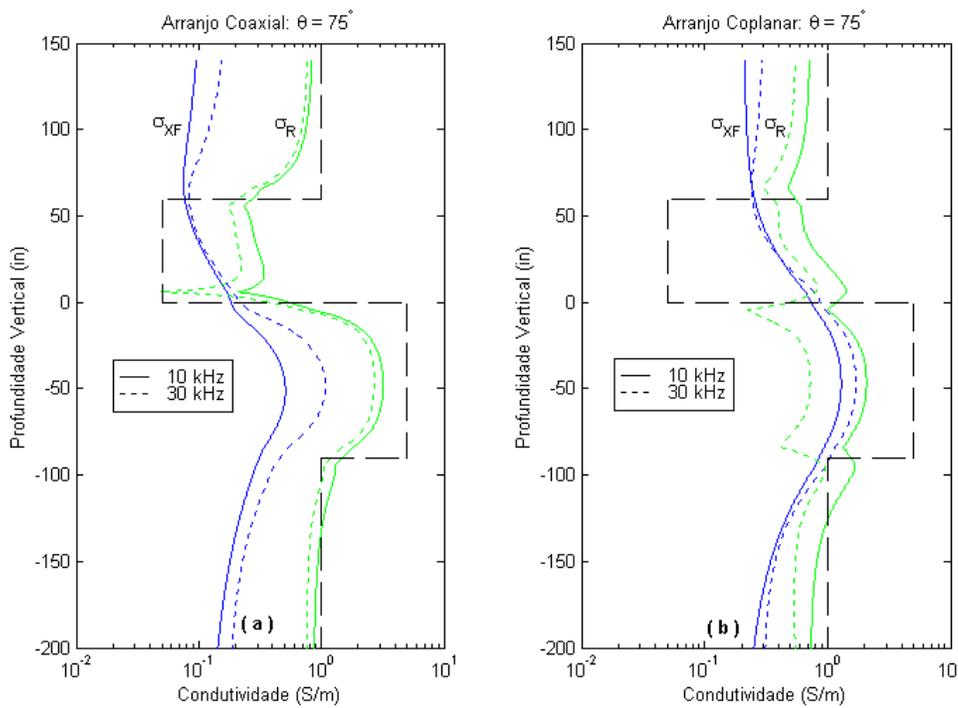


Figura 3 – Respostas das sondas coaxial **(a)** e coplanar **(b)**, operando a 10 e 30 kHz, numa perfilagem inclinada de  $75^\circ$ , num modelo de multicamadas horizontais com elevado contraste de condutividade.

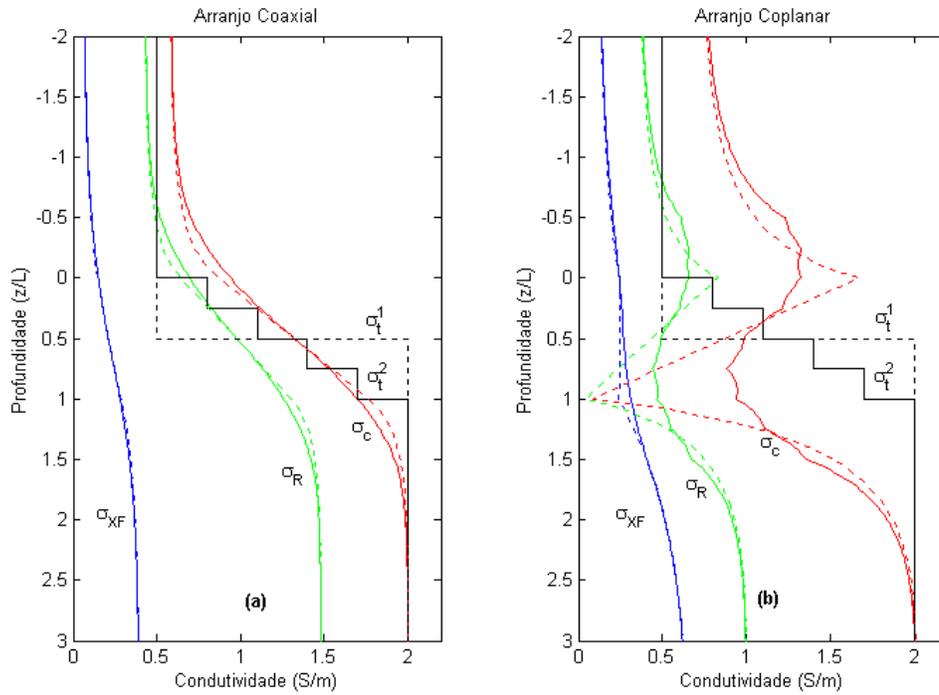


Figura 4 – Perfilagem vertical com as sondas coaxial **(a)** e coplanar **(b)** em modelos formados por dois semi-espacos (2 e 0,5 S/m) separados por uma transição brusca ( $\sigma^1_t$ ) e por uma transição gradacional formada por QUATRO degraus ( $\sigma^2_t$ ).

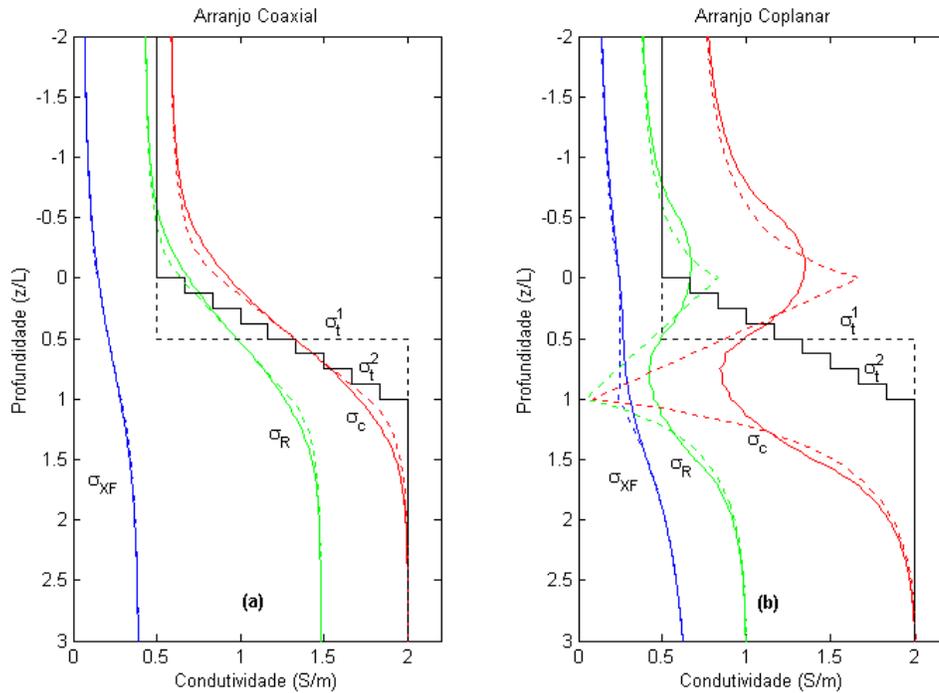


Figura 5 – Perfilagem vertical com as sondas coaxial **(a)** e coplanar **(b)** em modelos formados por dois semi-espacos (2 e 0,5 S/m) separados por uma transição brusca ( $\sigma^1_t$ ) e por uma transição gradacional formada por OITO degraus ( $\sigma^2_t$ ).