

Fig. 5 – Exemplo da medição dum intervalo de tempo com Audacity. As setas indicam a taxa de amostragem e o intervalo em número de amostras.

sária para decidirmos qual dos ramos da hipérbole é que devemos desenhar. Apenas um dos ramos interessa. Para convertermos a largura do intervalo de tempo em distância, temos de conhecer a velocidade de propagação do som no meio,  $s$ , que deverá ser medida logo no início da atividade experimental. Sabendo  $\Delta t$ , o parâmetro  $a$  da hipérbole vale  $s \cdot \Delta t / 2$ .

### Exemplo

Na mesa de trabalho, considerámos o canto inferior esquerdo como a origem do nosso sistema de coordenadas. Os valores indicados a seguir estão em centímetros.

#### Notas práticas

Para medir as pequenas diferenças de tempo que ocorrem nesta experiência, é conveniente fazer a digitalização do som a uma taxa bastante elevada. Usámos neste exemplo 96 kHz. A estas frequências de amostragem, o programa usado não mede convenientemente intervalos de tempo, mas mede corretamente esses intervalos em número de amostras. Conhecendo o intervalo de amostragem, é simples a conversão do número de amostras em largura de intervalo de tempo (ver exemplo na Figura 5).

Sendo  $na$  o número de amostras e  $f_a$  a frequência de amostragem, a largura do intervalo de tempo correspondente vale

$$\Delta t = \frac{na}{f_a} \quad (3)$$

Usando  $f_a$  em kHz, a largura do intervalo de tempo vem em ms.

#### Medir a velocidade do som

A estratégia usada foi a seguinte. Colocámos os dois sensores à distância de 70 cm um do outro. Na linha que une estas duas posições, marcámos pontos a cada 5 cm. Damos uma pancada em cada um desses pontos e medimos a diferença nos tempos de chegada da onda acústica a cada um dos sensores. Considerámos que a diferença de tempos e respetiva diferença de trajetões eram positivos quando o sinal chegava primeiro ao sensor S1 (à esquerda) e negativos no caso contrário.

Fizemos a representação gráfica da diferença de percursos em função da diferença de tempos e obtivemos a velocidade de propagação por regressão linear, tendo obtido o valor de  $s = (63,6 \pm 1,5)$  cm/ms (Figura 6).

#### Localizar o epicentro

Para efeitos de demonstração, colocámos o epicentro no ponto de coordenadas (40., 50.). Na 1.ª experiência os sensores tinham as coordenadas S1(20., 20.) e S2(80., 20.). Na 2.ª experiência as coordenadas foram S'1(20., 20.) e S'2(20., 80.). A estratégia foi desenhar um dispositivo em L com os sensores bastante afastados (Figura 7). Em ambos os casos, a distância entre sensores vale 60 cm, pelo que o parâmetro  $c$  das duas hipérbolas a traçar vale 30 cm. Para o primeiro conjunto de sensores, o intervalo de tempo medido, usando S1 como referência, foi de 18 amostras. No segundo caso, obtivemos a largura do intervalo de tempo de -2 amostras (o sinal chega primeiro a S2 e depois a S1). Convertidos em tempo e depois em distância, temos que, no primeiro caso, traçar o ramo

cm pos.	cm dist.	amostras $\Delta t$	ms $\Delta t$
5	60	94	0,979
10	50	74	0,771
15	40	63	0,656
20	30	43	0,448
25	20	31	0,323
30	10	15	0,156
35	0	-6	-0,063
40	10	-27	-0,281
45	20	-33	-0,344
50	30	-43	-0,448
55	40	-65	-0,677
60	50	-73	-0,760
65	60	-84	-0,875

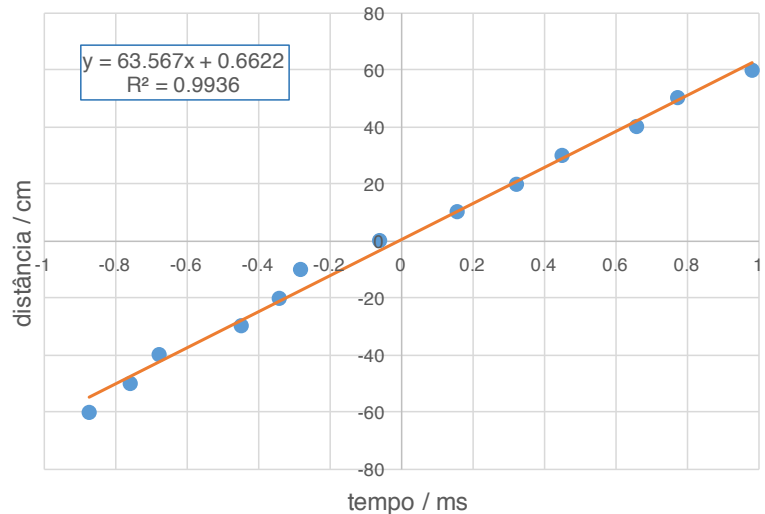


Fig. 6 – Valores usados na determinação da velocidade de propagação do som na mesa.

da hipérbole mais próxima de S1 com uma diferença entre distâncias de  $2a = 11,9$  cm. No segundo caso teremos de traçar o ramo de hipérbole mais próximo de S'2 com  $2a = 1,3$  cm.

O epicentro é calculado graficamente com auxílio duma régua em madeira e fio, usando o traçado manual descrito na Figura 3. Os focos são fixos com o auxílio de ventosas (Figura 7a). Trata-se duma construção aproximada, mas que permite obter um valor razoável e ilustrar de forma mais prática o método de cálculo tornando-o análogo ao “método das circunferências” para o cálculo de epicentros no globo.

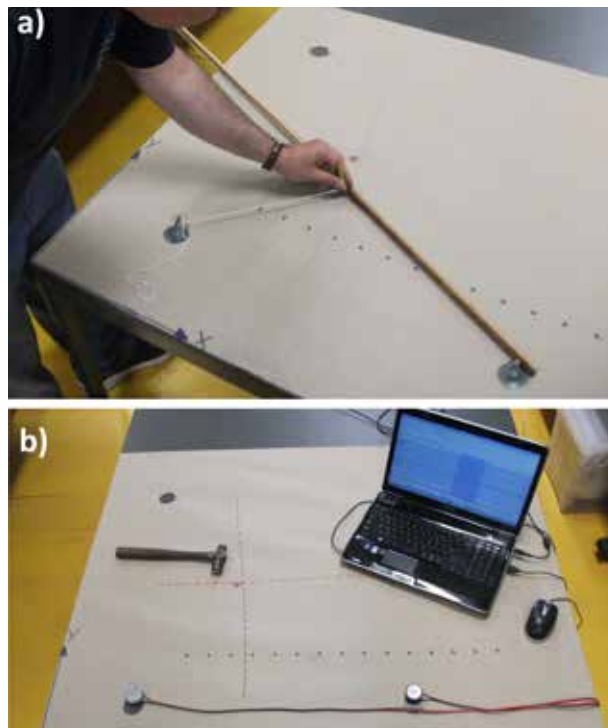


Fig. 7 – a) Traçado manual duma das hipérbolas do problema exemplificado; b) Apresentação da montagem experimental já com o resultado final após o traçado das duas hipérbolas. O símbolo \* indica a posição teórica do epicentro. Mostram-se também as marcas espaçadas de 5 cm que foram usadas na medição da velocidade do som na mesa.

#### Referências

1. [http://national.udppc.asso.fr/attachments/Arpenteur\\_du\\_Web\\_Ondes\\_sismiques.pdf](http://national.udppc.asso.fr/attachments/Arpenteur_du_Web_Ondes_sismiques.pdf)  
[https://www.iris.edu/hq/inclass/lesson/locating\\_an\\_earthquake\\_with\\_recent\\_seismic\\_data](https://www.iris.edu/hq/inclass/lesson/locating_an_earthquake_with_recent_seismic_data)  
<http://www.indiana.edu/~pepp/curriculum/2002/cauble02curr.htm>
2. [http://www.kgsorkney.com/uploads/1/4/9/3/14935550/researching-physics-earthquakes\\_tcm4-649463.pdf](http://www.kgsorkney.com/uploads/1/4/9/3/14935550/researching-physics-earthquakes_tcm4-649463.pdf)
3. <http://disciplines.ac-montpellier.fr/svt/modele-de-localisation-de-l-epicentre-d-un-seisme>
4. <http://www.raineclasse.com/textbook/tb48.pdf>
5. <http://www.audacityteam.org/>



**Luis Matias** é professor associado com agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, e investigador do IDL, Instituto Dom Luiz. As suas áreas principais de investigação têm sido a Sismologia e a Geofísica Marinha. Tem coordenado e participado em vários projetos de divulgação científica nestes domínios, quer a nível nacional quer a nível internacional. A observação sismológica nos oceanos tem permitido a ligação da investigação a outras áreas científicas, como a Oceanografia, a Meteorologia e a Biologia Marinha.

# Prospecção Electromagnética em Geofísica – o método Transiente

Rui M. D. Gonçalves

Unidade Departamental de Matemática e Física Escola Superior de Tecnologia de Tomar Instituto Politécnico de Tomar

rui.goncalves@ipt.pt

## Introdução

Podemos afirmar que o conhecimento e descrição da estrutura sólida da Terra é a finalidade última da Geofísica Interna. Aplicando métodos físicos, é possível aceder ao interior da Terra de uma forma remota e indirecta, o que genericamente apelidamos de Prospecção Geofísica. O método Transiente é um dos métodos que faz uso dos campos electromagnéticos (EM) para obter informação sobre o subsolo.

A Geofísica é um dos ramos da Física. A tradicional divisão particulariza ainda este ramo em Geofísica Interna (parte sólida), Meteorologia (atmosfera) e Oceanografia Física (oceanos). É uma parte integrante das Ciências da Terra, conjuntamente com a Geologia, Geoquímica e demais disciplinas relacionadas com o globo terrestre. Na realidade há décadas que estes conhecimentos já não são exclusivos ao nosso planeta sendo vastamente aplicados noutros corpos do sistema solar.

## Prospecção Geofísica

Os vários métodos usados na Prospecção Geofísica do subsolo estão directamente relacionados com as propriedades físicas dos materiais. Este conhecimento pode ser adquirido “passivamente” ou “activamente”. “Passivamente” quando a aquisição é limitada ao registo temporal dos fenómenos naturais (como a Sismologia) e “activamente” quando actuamos directamente sobre o meio em estudo (como na Prospecção Sísmica, com a geração de pequenos “sismos artificiais”). Assim, por exemplo a gravimetria (prospecção gravimétrica) mede a interacção entre massas (massas terrestres e a “massa” do mecanismo do gravímetro) – equipamento que mede (em valor relativo ou absoluto) o valor da aceleração da gravidade. A propriedade física no cerne do método é a massa volúmica. A Física-Química dos Materiais fornece-nos também valores, via ensaios laboratoriais ou *in loco*, para as diferentes propriedades físicas dos múltiplos constituintes da crosta terrestre. A modelação Geofísica, conjuntamente com demais informações de outras disciplinas, indicará então

qual ou quais os modelos que melhor respondem aos dados adquiridos, em termos das distribuições espaciais das propriedades dos materiais. Em prospecção geoelectrica, nas suas múltiplas técnicas de aplicação, explora-se basicamente uma das propriedade eléctrica dos materiais – a sua condutividade eléctrica (ou o seu inverso, a resistividade eléctrica). Mais uma vez, sabendo os valores desta propriedade para os inúmeros constituintes da crosta terrestre, podemos mapear as suas distribuições espaciais para a região em estudo, através da modelação dos dados adquiridos.

## TDEM

O método de prospecção habitualmente conhecido por Transiente é baseado no princípio da indução electromagnética, regido pela conhecida lei de Faraday. São emitidas e recebidas ondas electromagnéticas sobre a área de estudo, sendo conhecida a distribuição da condutividade eléctrica, pela aplicação de técnicas de modelação. Os primeiros equipamentos foram desenvolvidos nos anos 50-60 do século passado, para prospecção de jazigos minerais. O método TEM - *Transient ElectroMagnetic* ou TDEM - *Time Domain ElectroMagnetic*, consiste na aplicação de um sinal eléctrico numa antena emissora (circuito eléctrico) instalada directamente sobre o solo, ou um pouco acima deste, ou mesmo aerotransportada. A antena receptora pode ser independente ou a própria antena emissora, dependendo da geometria usada na prospecção. Habitualmente, a antena é uma, ou várias, espiras quadradas, cujos lados podem ter desde alguns metros até centenas de metros de comprimento. O sinal eléctrico emitido é periódico consistindo numa onda quadrada simétrica modificada, em que a corrente contínua é abruptamente reduzida a zero e depois invertida em sentido (*on-time*). O valor da intensidade da corrente contínua da onda quadrada

varia entre um ampere a várias dezenas de ampere, consoante a potência do equipamento. A medição da diferença de potencial aos terminais da antena receptora é efectuada após o corte na corrente – durante o período de corrente nula (*off-time*) (Fig. 1). Este processo cíclico é repetido centenas ou milhares de vezes, durante alguns minutos, de modo a melhorar a razão sinal/ruído do registo.

Quando a corrente eléctrica é abruptamente desligada (a designação *transiente* advém deste efeito), a intensidade do campo magnético gerado, dito primário, diminui igualmente. Esta variação (muito rápida) induz, de acordo com a lei de Faraday, uma corrente no solo condutor contíguo à antena. A intensidade desta corrente induzida vai decair no tempo, devido à resistividade finita do solo. Este processo de decaimento vai continuar a induzir, via variação do seu próprio campo magnético, correntes cada vez mais afastadas da antena e a maior profundidade. Estas correntes horizontais, induzidas no solo difundem-se verticalmente e são conhecidas como *ring smoke*, ou seja, anel de fumo (apenas devido à semelhança geométrica). É a variação do campo magnético, dito secundário, destas correntes *ring smoke* em decaimento, que é registada na antena receptora (Fig. 2). A cada ciclo, a tensão induzida nesta antena é amostrada em intervalos de tempo sucessivamente maiores, pois de início a variação é rápida e no final o sinal é de menor intensidade e de variação mais lenta. Os valores de tensão registados nos intervalos de amostragem correspondem a profundidades sucessivamente maiores, e resultam das respectivas correntes que são, por sua vez, função da condutividade eléctrica a essas profundidades.

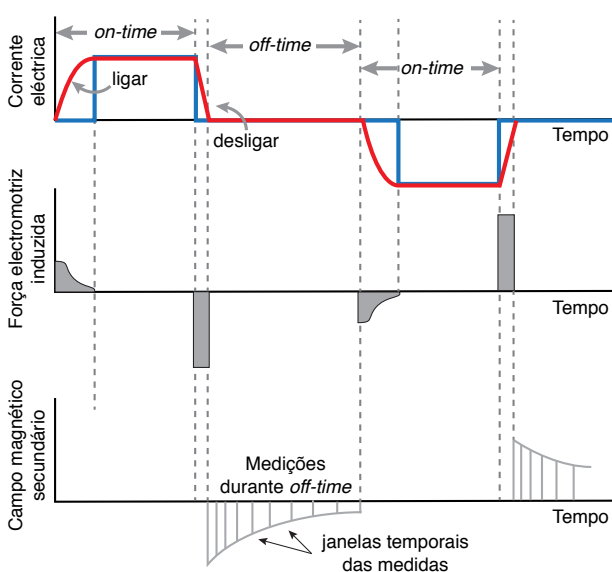


Fig. 1 – O princípio básico de funcionamento do método TEM. Onda quadrada teórica de corrente (azul) e corrente real (vermelha), as respectivas induções geradas no solo e a resposta registada, ao longo de cada ciclo de emissão e recepção. (Adaptado de Christiansen, 2006).

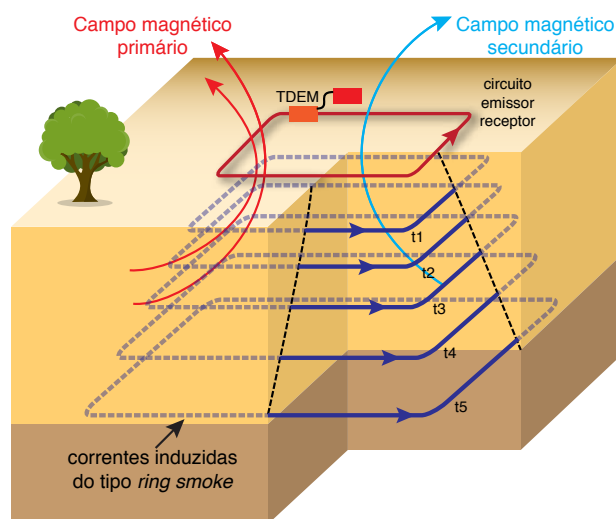


Fig. 2 – Propagação das correntes induzidas nos sucessivos instantes ( $t_1$ ,  $t_2$ , tempos iniciais,  $t_5$ , ... tempos finais). (Adaptado de Gonçalves, 2012).

Nas condições práticas de aplicação, e como os equipamentos funcionam a baixas frequências de emissão do sinal electromagnético (100 Hz a 1 MHz) ou seja perturbações entre 1  $\mu$ s a 10 ms, nas equações de onda de Maxwell:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (1b)$$

onde  $\mathbf{E}$  é o vector campo eléctrico [ $\text{V m}^{-1}$ ],  $\mathbf{H}$  é o vector campo magnético [ $\text{A m}^{-1}$ ],  $\sigma$  a condutividade eléctrica [ $\text{S m}^{-1}$ ],  $\epsilon$  a permissividade eléctrica [ $\text{F m}^{-1}$ ],  $\mu$  a permeabilidade magnética [ $\text{H m}^{-1}$ ], e  $t$  o tempo [s]. O termo de dissipação energética é várias ordens de grandeza superior ao termo da energia. Nesse caso, as equações representam então equações de difusão – o método TDEM é estritamente um método associado a um fenómeno de difusão, o que é verdade nestes intervalos de tempo e para condutividades eléctricas superiores a 0,0001  $\text{S m}^{-1}$ . Assim, as equações (1) podem escrever-se como,

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (2a)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2b)$$

Para a análise dos dados, várias simplificações são assumidas de início: que o meio em estudo é linear, isotrópico e homogéneo e que as propriedades eléctricas não variam no tempo e são independentes da temperatura e da pressão. Assume-se, ainda, que o valor da permeabilidade magnética é igual ao do vazio,  $\mu = \mu_0$  (o que pode não ser uma boa aproximação se se estiver em presença de formações geológicas eruptivas).

As profundidades de investigação dependem dos valores dos parâmetros eléctricos do solo, do equipamento, nomeadamente do seu momento magnético aplicado (intensi-

dade da corrente  $\times$  área da antena) e do ruído electromagnético instrumental e ambiental. No máximo a profundidade atingida pode ser três vezes o comprimento do lado da antena, na geometria quadrada e usando a mesma antena como emissor/receptor, com uma razão sinal/ruído pequena.

O cálculo da solução geral da equação de difusão (2b), aplicando as respectivas condições de fronteira, dará a resposta (dita transiente) da distribuição da condutividade eléctrica (modelo geoelectrico), em função do tempo de amostragem (profundidade)<sup>1</sup>. A Figura 3 mostra a resposta da componente magnética vertical e da sua derivada, pois esta direcção é a que é registada na antena colocada horizontalmente sobre o solo. Verificamos que o decaimento é praticamente constante após uns  $\mu$ s, intervalo que apelidamos de *late stage* (os equipamentos TDEM obtêm registos num intervalo de tempo cuja largura varia de  $\mu$ s a dezenas de ms). Nesta faixa *late stage* os declives da componente vertical do campo magnético e da sua derivada temporal são respectivamente,  $-3/2$  e  $-5/2$ .

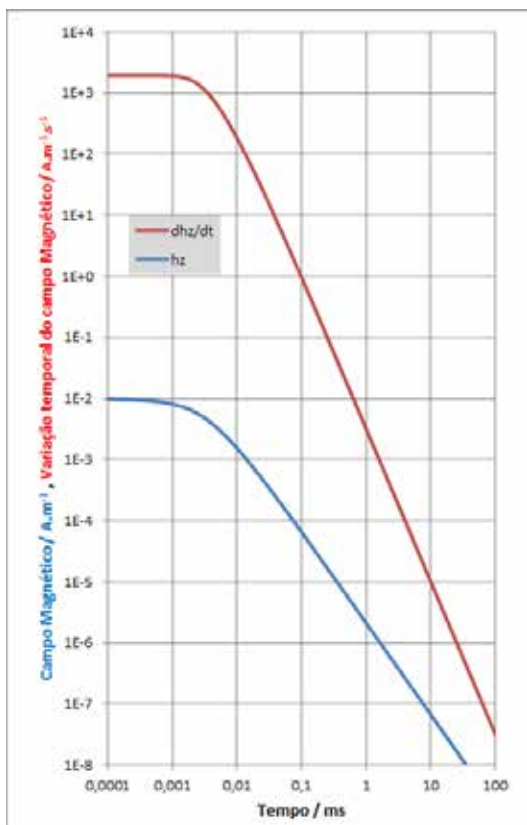


Fig. 3 – Comportamento do campo magnético vertical e da sua derivada temporal, ao longo do tempo, no centro de uma antena circular com 50 m de raio, sobre um meio homogéneo com 100  $\Omega$ .m de resistividade. A corrente aplicada é de 1 A, desligada no instante  $t = 0$  s. (Adaptado de Ward e Hohmann, 1988).

Na prática, em prospecção geoelectrica e electromagnética, o parâmetro usado é a resistividade eléctrica ( $\rho$ ), sendo os dados de campo obtidos expressos em termos da resistividade aparente ( $\rho_a$ ). A expressão que se obtém para a  $\rho_a$  a partir da tensão induzida na antena receptora na faixa temporal *late stage* é dada por:

<sup>1</sup> A formulação físico-matemática detalhada da solução para o caso de um modelo 1D, pode ser encontrada em manuais de geofísica, como Ward e Hohmann, 1988

$$\rho_a \approx \left( \frac{Ia^2}{20 \frac{\partial b_z}{\partial t}} \right)^{2/3} \frac{\mu_0^{5/3}}{\pi^{1/3}} t^{-5/3}$$

onde  $b_z$  é a componente vertical do vector indução magnético [T],  $I$  é a intensidade da corrente na antena [A], e  $a$  é o comprimento da aresta da antena [m].

Neste método verificamos uma diferença relativamente ao método de prospecção conhecido por resistividade. Na resistividade, a tensão medida varia linearmente com a resistividade do meio. No TDEM, a tensão medida varia com a condutividade elevada a 3/2, o que indica ser o método TDEM mais sensível a pequenas variações na condutividade do meio.

### Sondagem TDEM

Feita a amostragem num local, obtemos então valores da  $\rho_a$  versus tempo, o que designamos como sondagem, pois os valores da resistividade correspondem a profundidades sucessivamente maiores (Fig. 4). A modelação mais simples corresponde a considerar o meio em estudo como unidimensional (1D), (Fig. 5). Significa que não há variações laterais da resistividade, apenas estratificação horizontal. Esta aproximação de modelação é bastante razoável, mesmo com estratificação sub-horizontal. A sondagem TDEM amostra basicamente o volume sob e nas imediações da antena. Em campanhas de prospecção e em especial nos locais com variações laterais, 2D e 3D, a solução será sempre realizar muitas sondagens em linha (perfis) ou em malha. Em locais com grandes variações laterais, as sondagens em linha devem ser obtidas contiguamente, por vezes com sobreposição da área amostrada. A modelação dos dados de cada sondagem, nestes casos de dimensionalidade 2D e 3D é bastante mais complexa (exigindo bastante mais capacidade de cálculo e tempo).

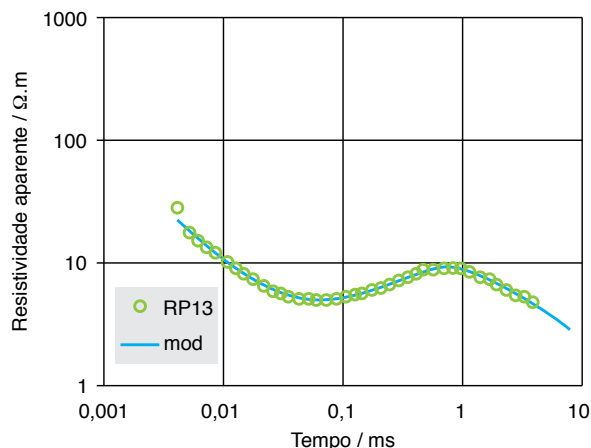


Fig. 4 – Resistividade aparente versus tempo de uma sondagem TDEM (círculos – dados de campo, linha contínua – resposta do modelo 1D). (Gonçalves, 2012).