

**IMPORTÂNCIA DO USO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS  
ELECTROMAGNÉTICOS  
VERY LOW FREQUENCY ELECTROMAGNETICS (VLF-EM) E RADIO  
MAGNETOTELLURIC – RESISTIVITY (RMT-R) NO ESTUDO DE  
AQUÍFEROS CÁRSICOS DO ALENTEJO E DO ALGARVE.**

Amélia de CARVALHO DILL<sup>1</sup>; Imre MÜLLER<sup>2</sup>; Augusto MARQUES DA COSTA<sup>3</sup>;  
José Paulo MONTEIRO<sup>4</sup>

**RESUMO**

Os aquíferos cársicos caracterizam-se pela existência de uma rede de condutas cársicas interconectadas de condutividade hidráulica elevada, rodeada por blocos de calcários fracturados, de baixa permeabilidade. Para além do carácter heterogéneo inerente ao comportamento hidráulico dessas formações, o hidrogeólogo que pretenda simular matematicamente esses aquíferos, defronta-se sempre com a inexistência ou falta de dados que lhe permitam estabelecer um modelo conceptual geométrico, que seja minimamente próximo da realidade.

Os métodos geofísicos electromagnéticos realçam as anomalias existentes e permitem a identificação de diaclases, fracturas e cavidades cársicas, constituindo a ferramenta indispensável para a compreensão do funcionamento dos aquíferos.

Com esta comunicação pretende-se apresentar os princípios dos métodos VLF-EM e RMT-R e alguns exemplos ilustrativos da sua aplicação em aquíferos cársicos do Sul de Portugal, nas regiões do Alentejo e do Algarve.

**Palavras-chave:** geofísica electromagnética – meio cársico – fracturação – hidrogeologia

---

<sup>1</sup>Doutora em Hidrogeologia pela Universidade de Neuchâtel e Professora Auxiliar na Universidade do Algarve, UCTRA, Campus de Gambelas 8000 Faro; Investigadora do Centro de Valorização de Recursos Minerais do Instituto Superior Técnico de Lisboa. Email : adill@mozart.si.ualg.pt.

<sup>2</sup>Doutor em Geologia e Professor Associado do Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, R. Emile Argand, 2007 Neuchâtel.

<sup>3</sup>Geólogo, licenciado pela Faculdade de Ciências de Lisboa, Assessor do Instituto Geológico e Mineiro, Estrada da Portela – Zambujal, Apartado 7586,2720 Alfragide.

<sup>4</sup>Mestre em Geologia Aplicada pela Faculdade de Ciências de Lisboa e Assistente da Universidade do Algarve, UCTRA, Campus de Gambelas 8000 Faro.

## 1 - INTRODUÇÃO

O estudo da fracturação nos maciços rochosos fissurados e carsificados, é fundamental para a avaliação da recarga dos aquíferos. No entanto, é frequente os maciços calcários do Sul de Portugal apresentarem espessa camada de terrenos de cobertura e/ou de alteração, o que impossibilita a caracterização directa da fracturação e torna difícil a delimitação das fronteiras do aquífero.

Torna-se necessário recorrer a métodos indirectos de prospecção que, por um lado, sejam de rápida utilização e de baixo custo e, por outro, permitam realçar as anomalias existentes: presença de falhas, identificação de zonas de diaclases, fracturas, condutas, cavidades cársticas e contactos laterais entre formações distintas.

Os métodos geofísicos electromagnéticos (VLF-EM e RMT-R) desenvolvidos no Centro de Hidrogeologia da Universidade de Neuchâtel (Suíça) foram especialmente concebidos no sentido de fornecer ao hidrogeólogo a informação que necessita:

- permitem verificar o modelo geológico de base;
- fornecem a informação necessária para a implantação das infraestruturas de observação hidrogeológica.

Ambos os métodos utilizam o mesmo tipo de energia, presente em todo o mundo, - as ondas de rádio de baixa a muito baixa frequência, que são emitidas por antenas muito potentes na banda dos 12 aos 300 kHz, mas distinguem-se entre si nos processos de medição.

Essas ondas de rádio, também se propagam pelas rochas, sendo a profundidade de penetração no subsolo (ou seja a profundidade de penetração do campo primário) dependente da frequência do emissor e da resistividade da rocha, como se pode ver a partir da seguinte equação (1):

$$P = 503 \sqrt{\frac{\rho_a}{F}} \quad (1)$$

em que:

P = profundidade de penetração em metros (Skin depth)

$\rho_a$  = resistividade aparente em ohm.m

F = frequência das ondas utilizadas em Herz.

As ondas de rádio originam nas rochas um campo electromagnético secundário que depende da natureza das rochas e, que pode ser detectado à superfície. Assim o campo total resultante será a soma do campo secundário e do campo primário, distinguindo-se do primário na intensidade, na fase e na direcção.

Os dispositivos de medida utilizados apresentam características diferentes dos comercializados no mercado - sendo este aspecto de fundamental importância para a hidrogeologia.

## 2 - MÉTODO VERY LOW FREQUENCY – ELECTROMAGNETIC (VLF-EM)

Este método mede a intensidade do campo magnético primário ( $H_p$ ) através de uma bobine de eixo horizontal e detecta as componentes verticais ( $H_s$ ) por intermédio de outra bobine de eixo vertical. As componentes verticais encontram-se em fase (in-phase) ou em quadratura (out-of-phase) em relação com o campo primário. Os resultados exprimem-se sob a forma de uma relação entre as intensidades de ambos campos e em percentagem ( $H_s/H_p$  %) como se exemplifica na figura 1.

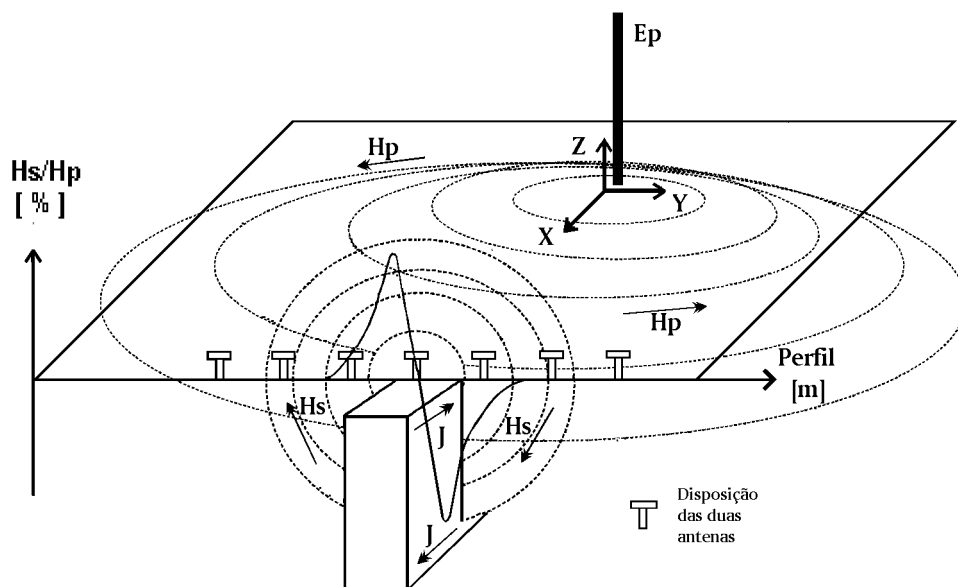


Figura 1 - Princípio do método VLF-EM, adaptado de TURBERG e MÜLLER (1992).

Para além de detectar a presença de corpos condutores (como por exemplo falhas preenchidas por minerais argilosos), este método é igualmente muito sensível a mudanças laterais de fácies (contactos litológicos bem distintos).

O aparelho utilizado é um protótipo, desenvolvido pelo Imre Müller, professor do Centro de Hidrogeologia da Universidade de Neuchâtel, na Suíça. Distingue-se dos aparelhos VLF comerciais, porque regista em contínuo a variação do sinal. Através da utilização simultânea de um Data-Logger e de um aparelho GPS diferencial programado ao segundo com o primeiro, correlaciona-se o tempo com a distância percorrida, permitindo-nos localizar exactamente as anomalias encontradas.

A vantagem deste método é não necessitar de contacto com o solo, podendo ser empregue manualmente ou ser instalado em veículos automóveis. A orientação da antena faz-se automaticamente, permitindo a realização de perfis à escala quilométrica.

Como a frequência de recepção varia dos 12 aos 300 kHz, é possível registar o mesmo perfil em diferentes frequências, obtendo-se informação a várias profundidades - aspecto essencial para a modelação.

Actualmente, e como resultado da tese de doutoramento recentemente finalizada de Wilhelm Stiefelshagen, já é possível converter os valores obtidos de  $H_s/H_p$  [%] em valores de resistividade aparente.

### 3 - RADIO-MAGNETOTELURIC- RESISTIVITY (RMT-R)

Como o nome indica, trata-se de um método magnetotelúrico artificial que utiliza as ondas de rádio de 12 a 300 kHz.

O campo electromagnético resultante a medir tem duas componentes : a componente magnética e a componente eléctrica. A componente eléctrica mede-se através de dois eléctrodos enterrados no solo, orientados em direcção ao emissor e a 5 metros de distância um do outro. A intensidade do campo magnético primário é medida através de uma bobine, colocada de modo a que o seu eixo horizontal se encontre perpendicularmente em relação ao emissor.

Obtêm-se assim valores de:

#### 1. resistividade aparente ( $\rho_a$ ) :

$$r_a = \left( \frac{E_x}{H_y} \right)^2 \cdot \frac{1}{2\pi F \mu_0} , \quad (2)$$

em que:

$E_x$  componente eléctrica do campo resultante em Volt/metro

$H_y$  componente magnética em amperes/metro

$\mu_0$  permeabilidade electromagnética do vácuo em henry/metro.

2. e de **desfasagem** entre as componentes magnética e eléctrica (\*). Esta fornece a informação estratigráfica do local em estudo, FISCHER (1985) e FISCHER et al (1983):

- quando a diferença de fases (\*) iguala  $45^\circ$ , pode-se considerar o subsolo como homogéneo;

- Se \* for menor que  $45^\circ$ , está-se em presença de uma camada condutora sobre uma mais resistiva ;

- quando \* é maior que  $45^\circ$ , a situação é contrária à anterior : uma camada mais resistiva sobre uma camada condutora.

O dispositivo utilizado, também um protótipo desenvolvido por I. Müller, tem a vantagem de permitir a medição simultânea em 4 frequências, fornecendo informações de 4 profundidades (figura 2). Através de um programa de computador (FITVLF2), que se baseia num modelo de inversão é possível calcular as espessuras e as resistividades reais das camadas, correspondendo cada medição a uma sondagem com 5 metros de diâmetro.

Trata-se de um método extremamente rápido, que nos permite a execução de perfis paralelos numa rede bastante apertada (de 5 em 5 metros), permitindo a cobertura ideal para futuras interpolações. As heterogeneidades são deste modo detectadas e cartografadas e o hidrogeólogo pode, a partir dos valores de resistividade, inferir sobre a permeabilidade das formações.

É possível a realização de sondagens multidireccionais, indicadoras da anisotropia do sinal, permitindo assim a detecção da orientação do escoamento principal.

Princípio do método electromagnético  
RMT-R multifrequência (12 - 240 kHz)

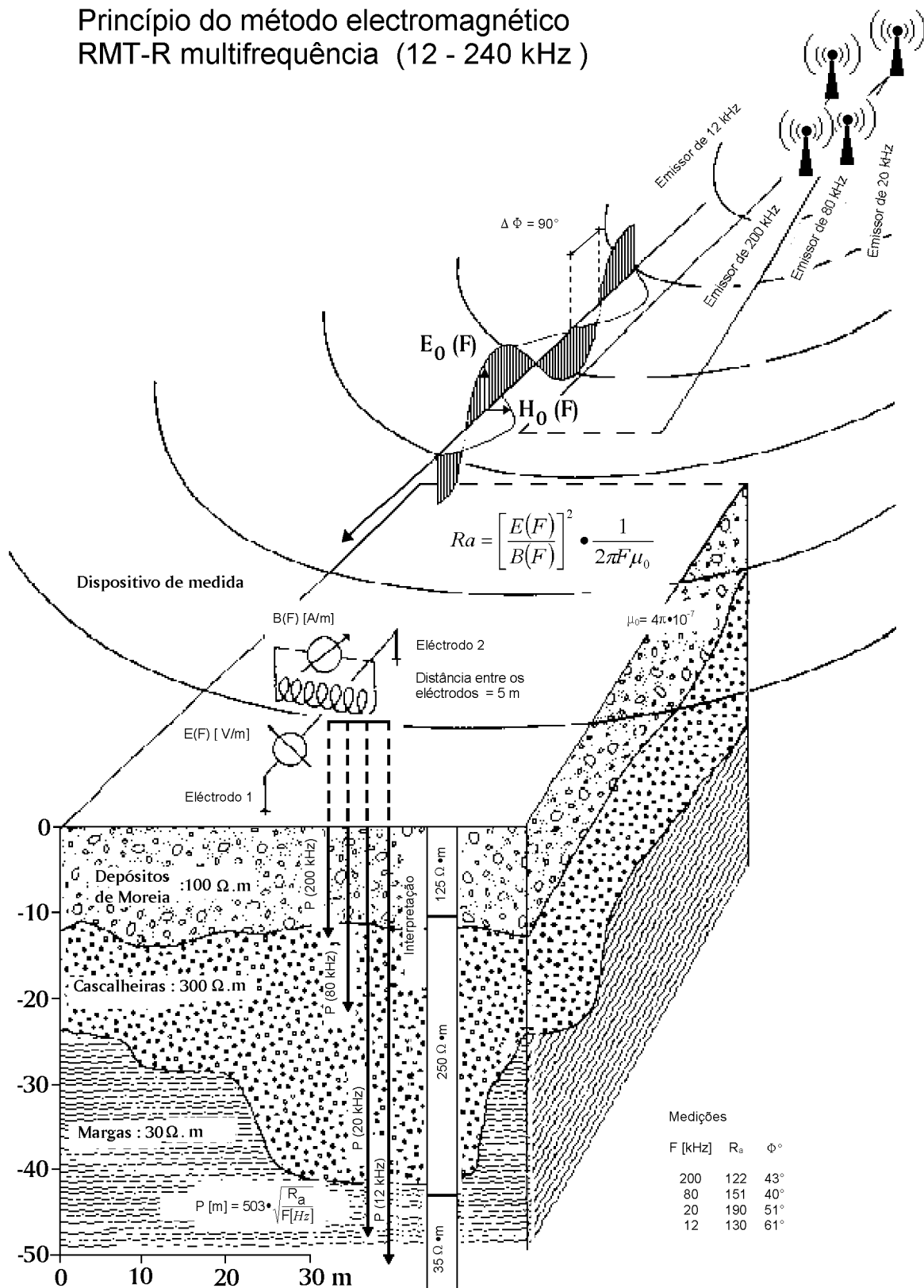


Figura 2 - Princípio do método electromagnético RMT-R multifrequência adaptado de THIERRIN e MÜLLER (1988)

#### 4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Estes métodos foram utilizados para a cartografia de falhas, fracturas e detecção de contactos litológicos, em três aquíferos cársicos: de Tavira (Aquífero do Malhão), Moura (Aquífero Carbonatado de Moura-Ficalho) e Castelo de Vide (Sistema Aquífero de Castelo de Vide-Marvão). A descrição pormenorizada dos trabalhos, que estão a ser executados na região alentejana, será feita nas conferências seguintes, visto inserirem-se em dois projectos distintos e que estão sendo levados a cabo, pelo Instituto Geológico e Mineiro e pela Faculdade de Ciências de Lisboa.

No entanto apresentam-se alguns resultados obtidos naquelas regiões, como exemplos ilustrativos da informação obténivel.

##### 4.1 - Tavira – Aquífero do Malhão

Malhão é o nome do sistema aquífero que abastece a cidade de Tavira. É constituído sobretudo por calcários do Jurássico: dolomitos do Sinemuriano, calcários oolíticos do Bajociano e calcários e margas do Caloviano, muito fracturados e fallhados.

Foram executados alguns perfis de VLF-EM Profile recentemente, integrados num estudo da fracturação em redor das pedreiras. A informação obtida com os perfis, embora de carácter qualitativo, foi extremamente didáctica, dado que foi frequentemente possível comparar os registos com as observações de campo.

A figura 3 mostra um exemplo típico da resposta obtida pela presença de uma dolina no sinal de out-of-phase. Ilustra igualmente o efeito provocado por um fio condutor de electricidade.

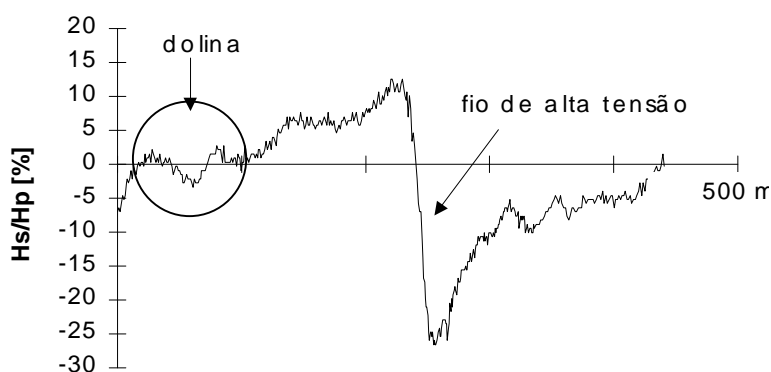


Figura 3 - Influência de fio de alta tensão na curva de Out-of-phase e anomalia típica provocada por uma dolina.

A figura 4, mostra o contacto litológico entre margas e calcários, claramente definidos pela presença de dois patamares.

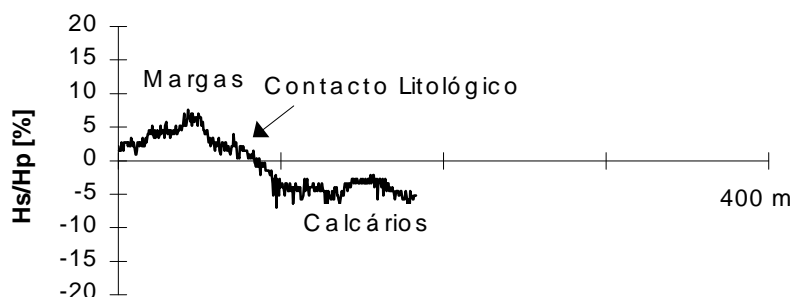


Figura 4 - Contacto litológico entre margas (patamar positivo) e calcários (patamar negativo)

Foram igualmente detectadas inúmeras falhas não cartografadas. Assinalou-se um sistema de falhas tipo graben (representadas na figura 5, por linhas a tracejado), que parece corresponder à conhecida falha regional de Santo Estevão.

#### Dolina (1) e Sistema de Falhas Tipo Graben (2)

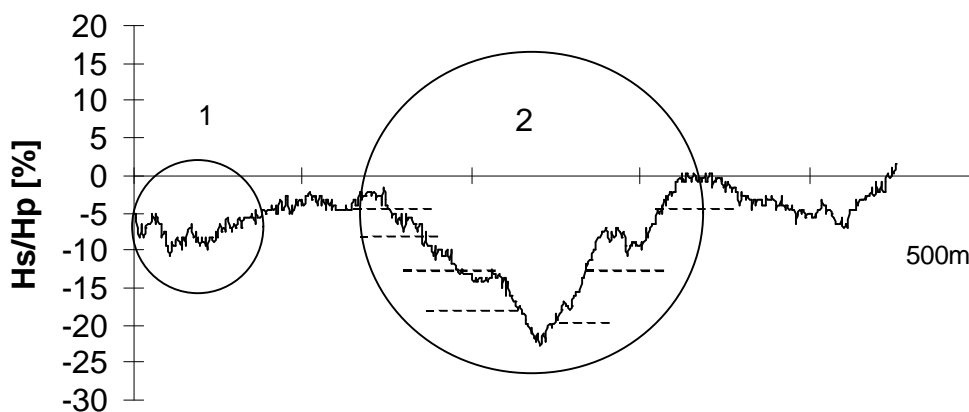


Figura 5 - Curva de out-of-phase assinalando o sistema de falhas tipo "Graben"(2) e a presença de dolina

#### 4.2 - Aquífero Carbonatado de Moura-Ficalho

Na região de Moura utilizaram-se os métodos VLF-EM e de RMT-R em diversas áreas. Escolheram-se, para exemplificar, dois perfis de RMT-R, realizados nas áreas de Fonte da Telha e de Vila Ruiva.

Os perfis VLF realizados na área de Fonte da Telha, encontram-se referidos, com mais pormenor, no artigo: "Monitorização dos aquíferos da região de Moura Ficalho. Sondagens, construção e equipamento de piezómetros" ,de COSTA et al. , inserido no mesmo Congresso. A figura 6 representa um perfil RMT-R realizado na área da Fonte da Telha.

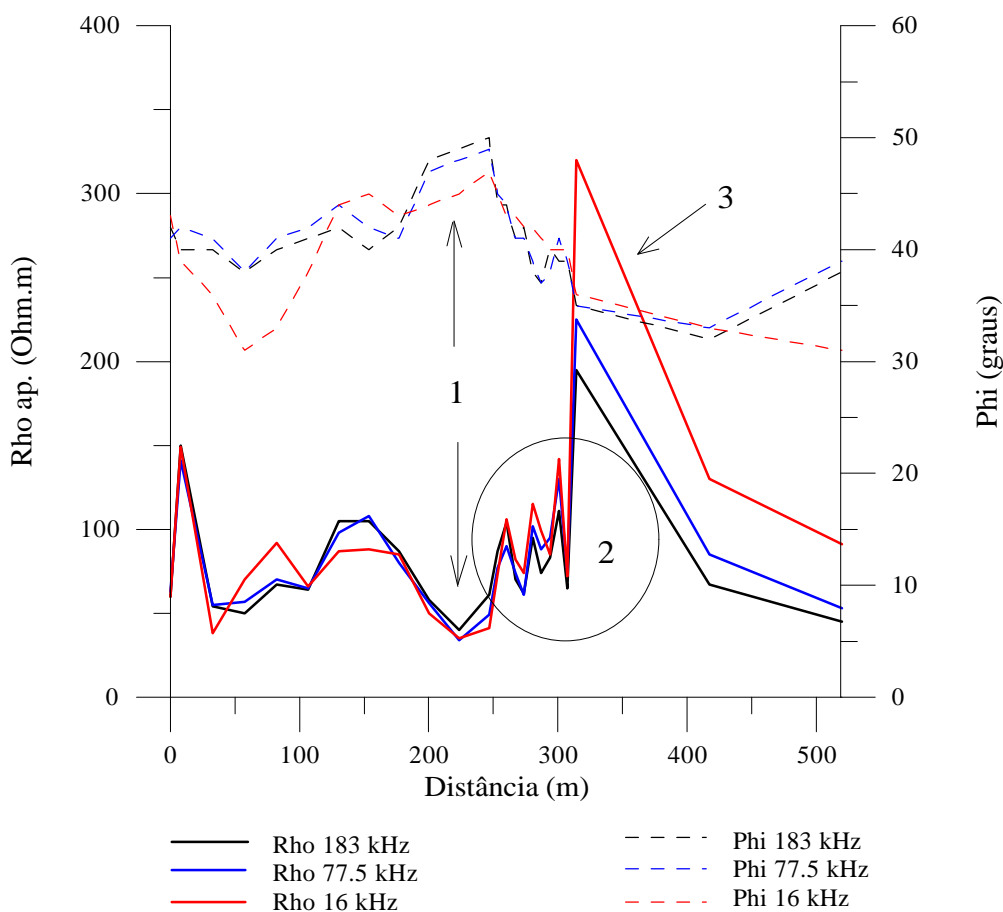


Figura 6 – Perfil de RMT-R, representando as curvas de resistividade aparente (traço mais cheio) e os valores da defasagem (traço mais fino), obtido com as frequências de 183, 77.5 e 16 kHz.

No perfil estão assinalados a existência de uma falha importante (1) [em polarização H – abaixamento da resistividade e aumento da fase], seguida de mudança litológica (3) (aumento dos valores de resistividade) e aumento da camada de cobertura (valores de resistividade de 183 kHz < que os de 16 kHz). Assinala-se a intensa fracturação nas imediações da falha (2), zona provável de escoamento preferencial.

A figura 7, apresenta o perfil realizado na zona de Vila Ruiva, onde é possível observar dolomias (1) (Dolomias de Ficalho do Câmbrio inferior) intensamente carsificadas, apresentando-se as cavidades preenchidas por argilas, óxidos de ferro, zinco e chumbo. Este



tipo de preenchimento provoca os abaixamentos dos valores de resistividade aparente, observados na figura em (2).

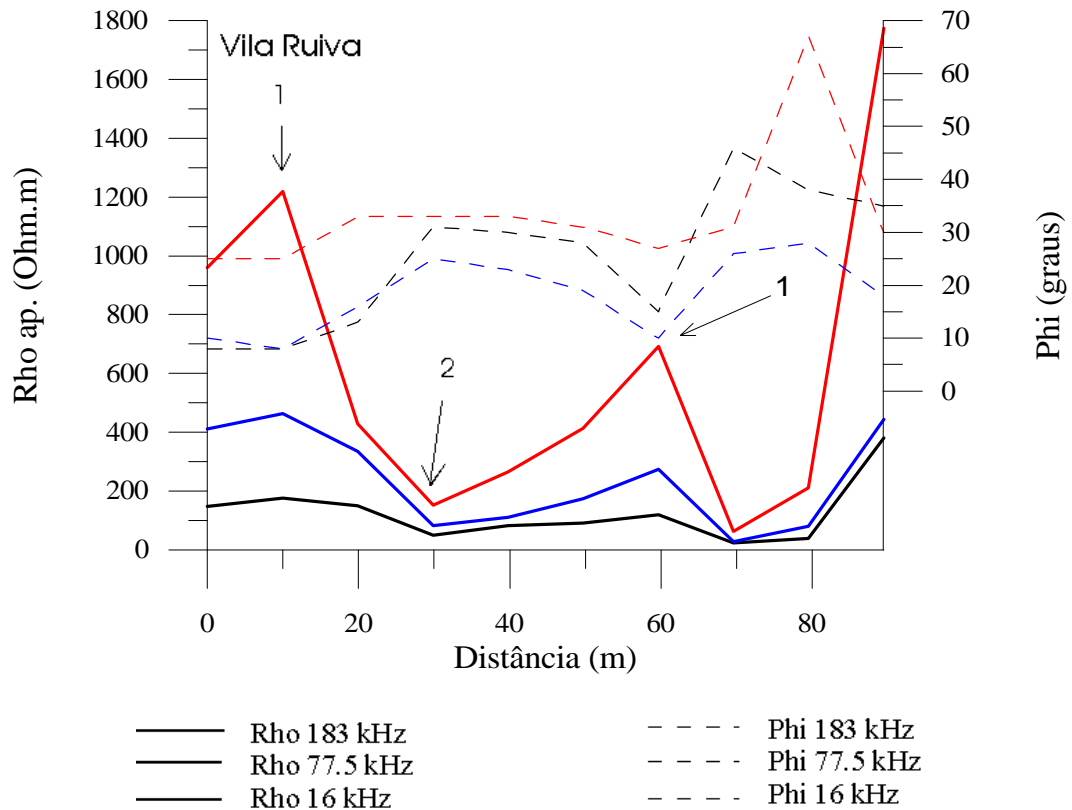


Figura 7 - Perfil RMT-R realizado na área de Vila Ruiva, região de dolomias muito carsificadas.

## 5 - CONCLUSÕES

Procurou-se exemplificar a informação obténível com os métodos electromagnéticos VLF-EM e RMT-R e demonstrar as suas vantagens :

- a fonte de energia que utilizam é permanente e acessível em qualquer ponto do mundo;

- realçam as heterogeneidades existentes (presença de falhas, condutas cársicas, contactos litológicos, etc);

- são rápidos e de fácil utilização ;

- permitem observações em rede muito apertada (RMT-R) ou registos contínuos (VLF-EM), o que facilita a interpolação de valores nos meios heterogéneos;

- fornecem indicações sobre a natureza, estrutura e geometria dos aquíferos.

As limitações que apresentam são:

- profundidade de penetração pequena quando o subsolo é muito condutor (VLF-EM e RMT-R).

- sensibilidade a ruídos industriais, fios eléctricos e telefónicos.

## **SIMBOLOGIA**

P - profundidade de penetração em metros (Skin depth)

$\rho_a$  - resistividade aparente em ohm.m

F - frequência das ondas utilizadas em Herz (Hz)

Ex - componente eléctrica do campo resultante em Volt/metro

Hy - componente magnética em amperes/metro

$\mu_0$  - permeabilidade electromagnética do vácuo em henry/metro.

## **AGRADECIMENTOS:**

Os trabalhos realizados foram executados graças ao apoio do Centro de Valorização dos Recursos Minerais (IST), da Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT) e do Instituto Geológico e Mineiro (IGM).

## **BIBLIOGRAFIA**

FISCHER, G.; LE QUANG, B.V.; MÜLLER, I. – “VLF Ground Surveys, a powerful tool for the study of shallow two dimensional structures”. *Geophysical Prospecting*, **31**, 1983, pp. 977-991.

FISCHER, G. – “Some remarks on the behavior of the magnetotelluric phase. *Geophysical Prospecting*”, **33**, 1985, pp. 716-722.

GRETILLAT, P.A.; BOUYER, Y.; MÜLLER, I. – “Un exemple d'utilisation de la géophysique electromagnétique (VLF et Bipole) pour l'étude de la fracturation au nord de la source karstique de la Noiraigue (Jura Neuchâtelois)”. *Bull. Centre d'hydrogéologie* **7**, 1987, pp. 335-345.

MÜLLER, I. – “Anisotropic properties of rocks detected with electro-magnetic VLF [Very Low Frequency]”. *International Symposium on Field measurements in Geomechanics*. Zurique, (Suíça), 5 - 8 Set, 1983.- special publ., pp. 273-282.

MÜLLER, I.; CARVALHO DILL, A. – “Advances on electromagnetic prospecting to survey shallow aquifers and contaminated sites” in *International Congress on Environment and Climate*, Roma (Itália), 4 - 8 Mar. 1996.

THIERRIN, J.; MÜLLER, I. – “La méthode VLF-Résistivité multifréquence, un exemple d'exploration hydrogéologique dans un synclinal crétacé à la Brévine (Jura neuchâtelois)” in *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Memoire Hors de Série, n° 6*, Quatrième Colloque d'Hydrogéologie en pays calcaire, Besançon (França), 29 Set – 1 Out 1988, pp. 17-25.

THIERRIN, J. – Contribution a l'étude des eaux souterraines de la Region de Fribourg (Suisse Occidental), Thèse, Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel (Suíça), 1992.

TURBERG, P.; MÜLLER, I. – “La méthode inductive VLF-EM pour la prospection hydrogéologique en continu du milieu fissuré” in *Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, Memoire Hors de Série, n° 11*, Cinquième Colloque d'Hydrogéologie en pays calcaire et en milieu fissuré, Neuchâtel (Suíça), 16-18 Out 1992, pp. 207-214.

TURBERG, P. – Apport de la cartographie radiomagnetotellurique a l'hydrogéologie des milieux fracturés. Thèse. Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie, 1993.