



## Perfilagem indução eletromagnética e radiação gama natural em poços de monitoramento

Alex F. Ribeiro<sup>1</sup>, Carlos A. Mendonça<sup>1</sup>, Álvaro B. Buoro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geofísica, IAG/USP, <sup>2</sup>EQUINOCIO Soluções Criativas

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent 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

Monitoring wells are basic devices to site characterization and remediation of contaminated areas. They allow groundwater sampling under different flow regimes, determination of the static level, and for a set of nearby wells, the groundwater flow direction. Samples retrieved from perforation can outline a geological section, despite missing thin geological features or subtle variations in composition. Measurements of physical properties with well-logging probes provide additional information, better resolving the geological section. We present results from a field test in which induction and gamma-natural probes were used to complement information from wells, illustrating advantages and possible drawbacks in using geophysical logs in standard monitoring wells.

### Introdução

Perfis geofísicos são rotineiramente utilizados em poços de petróleo e de água subterrânea para caracterizar as unidades perfuradas quanto ao seu potencial como reservatório ou aquífero. A perfilagem geofísica consiste no emprego de sondas que descem dentro do poço, registrando propriedades e grandezas físicas em função da profundidade (Ellis & Singer, 2008). Unidades geológicas com propriedades distintas são assim identificadas e caracterizadas em termos de composição, aspectos texturais e conteúdo em fluídos. Poços abertos, não revestidos por tubos de aço ou geomecânicos, permitem a aplicação de diversas sondas (elétricas, acústicas, caliper, etc).

A perfilagem em poços de monitoramento apresenta um cenário particular, primeiramente por tratar de poços inteiramente revestidos com tubos geomecânicos (não-metálicos), que impedem o contato direto da sonda com as unidades atravessadas pelo poço. Apenas sondas baseadas no princípio da indução eletromagnética (IL- *Induction Log*) ou medindo radiações gama (GN- *Gamma Natural*, por exemplo) podem ser utilizadas. Por outro lado, essas sondas permitem que a perfilagem seja feita em poços não preenchidos por água, apropriados para medições acima do nível freático, comum em investigações ambientais. Outro fator que compromete o desempenho da perfilagem em poços de monitoramento decorre do comprimento da sonda (normalmente entre 1-

2 m), relativamente longa se comparada com a profundidade dos poços (10-15 m em média). Isso impede que os sensores da sonda percorram toda a extensão do poço. Um intervalo proporcional ao comprimento da sonda é perdido nos extremos da seção, o que pode totalizar 15 ou 20% da extensão do poço, considerando profundidades médias de 10 m. O diâmetro reduzido dos poços de monitoramento (2" em geral) exige sondas especialmente projetadas.

Outros aspectos construtivos também comprometem a interpretação dos perfis em poços de monitoramento. Por exemplo, a instalação de selos de bentonita logo acima dos pontos de amostragem com filtro e pré-filtro composto por areias (Fig.1), construção padrão nas investigações ambientais (CETESB, 1999). Por causa da proximidade com a sonda, essa variação de composição gera respostas que podem ser confundidas com aquelas causadas pelo meio, tanto nos perfis de condutividade quanto nos de radiação gama. A instalação de filtros com elementos metálicos em especial compromete as medidas com indução eletromagnética. Outro fator decorre da descentralização do tubo geomecânico, fazendo com que feições espúrias apareçam à medida que a distância da sonda em relação à parede do poço varia.

O presente trabalho apresenta resultados de testes realizados em uma área de passivo ambiental, que embora investigada por uma dezena de poços de monitoramento, tinha base de dados bastante incompleta em termos de perfis litológicos representativos. Em parte, as limitações resultaram de serviços com diferentes especificações técnicas, agravadas pela geologia local com litologias argilosas e variações discretas nas frações arenosas. Essas limitações dificultam o desenvolvimento de um modelo conceitual para a caracterização do terreno. A aplicação de perfis geofísicos teve como objetivo verificar se um quadro geológico melhor definido seria obtido se informações incompletas (e imprecisas) de poço fossem analisadas com base na perfilagem.

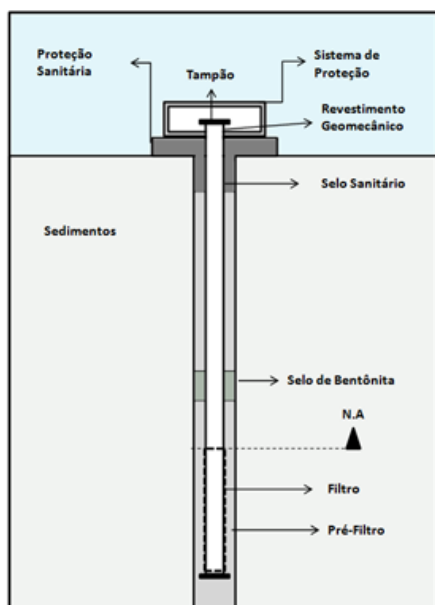


Figura 1- Os aspectos construtivos de um poço de monitoramento segundo norma 6410 da CETESB (1999), Representação ilustrativa, sem escala.

### Perfilagem de poço: Aspectos gerais

A perfilagem geofísica em poços revestidos exige sondas específicas, de indução eletromagnética e radiação gama natural.

A sonda de indução baseia-se no princípio da indução eletromagnética (Lei de Faraday), que prevê a geração de correntes induzidas em meios condutivos na vizinhança de um campo magnético variante no tempo. As sondas IL (*Induction Log*) utilizadas na perfilagem empregam duas bobinas coaxiais, uma gerando o campo indutor, a outra medindo a força eletromotriz (fem) estabelecida em resposta. Para frequências baixas, a resposta do meio pode ser representada por anéis radiais de corrente, com raios crescentes em relação ao eixo do poço (Doll, 1949). O sinal medido expressa a contribuição de todos os anéis de corrente, recebendo contribuições de diferentes materiais, inclusive os situados no intervalo com areia (pré-filtro) ou bentonita.

A utilização de duas bobinas receptoras permite que diferentes raios de investigação, em relação ao eixo do poço. A profundidade de investigação tem máxima contribuição no raio correspondente à metade do espaçamento, no entanto alcançando profundidades radiais de investigação entre 1.0 e 1.5 vezes a separação das bobinas. Sua operação é feita em regime de número de indução baixo, no qual se observa uma dependência linear entre a força eletromotriz medida na bobina e a condutividade do meio. Para algumas sondas, essa relação deixa de ser válida para meios com resistividade acima de 100 ohm.m, aproximadamente (Scott et al., 1986). Quando isso ocorre, apenas variações relativas entre unidades contrastantes podem ser detectadas, mas a determinação da condutividade elétrica fica comprometida. As medidas de condutividade são

expressas em  $\text{mS.m}^{-1}$ . O par de bobinas com maior separação fornece o ILD (*long*); o par com menor separação o ILM (*short*), cada um investigando profundidades diferentes (Keys, 1989; Schulberger, 1998).

Perfis GN, ou gama-natural, registram a intensidade de radiação gama emitida por solos e rochas atravessados pelo poço. Os elementos fontes dessa radiação são isótopos resultantes do decaimento radioativo do U, Th, e K. O perfil GN é considerado um “perfil litológico”, pois traz informações a respeito da composição mineral, principalmente em termos do seu conteúdo em argila. Sondagens para estudos ambientais expressam as medidas em CPS (*counts per second*), com valores mais altos frente a materiais argilosos. Os perfis GN auxiliam a correlação poço-a-poço especialmente em sedimentos com alternância de arenitos e argilitos (Luthi, 2001).

### Área de teste

Os perfis IL e GN foram obtidos em poços de monitoramento instalados em uma área agora ocupada por um depósito logístico na cidade de Barueri. Anteriormente funcionava no local uma fábrica de tintas que, em 2010, foi parcialmente destruída por um incêndio de grandes proporções. O incêndio comprometeu as instalações da fábrica, permitindo o vazamento de contaminantes do tipo DNAPL (*Dense Nonaqueous Phase Liquid*), que gerou o passivo ambiental. Informações geológicas por poços de monitoramento mostram uma camada de aterro argilo-arenosa (1.5 a 4.0 m de espessura), sobre sedimentos aluvionares do Quaternário, por sua vez assentados sobre saprólito argiloso de rochas graníticas. A camada de aterro é essencialmente argilo-arenosa, por vezes com fragmentos de granito. Os sedimentos aluvionares são compostos por argila plástica com restos vegetais e argilas arenosas de cor marrom.

### Operações de perfilagem

O equipamento utilizado (Robertson Geologging/UK), sendo este composto por uma sonda DUN10290, tripé com transdutor de profundidade (*encoder*) e guincho elétrico, conectados a um registrador Micrologger gerenciado pelo programa Winlogger (versão 1.5). A sonda utilizada tem comprimento de 225 cm, com duas bobinas receptoras para perfis de indução, uma situada a 47 cm da base (onde a bobina transmissora fica instalada), outra a 80 cm. O sensor de radiação gama, situado a 35 cm do topo da sonda, é composto por um cintilômetro. O cristal que compõe esse sensor, quando exposto aos raios gama, emite fótons de luz que são amplificados e convertidos em pulso elétrico para registros na forma de contagem (número de pulsos).

A medição de perfis geofísicos pode ser feita tanto na descida da sonda (*down hole*) quanto na subida (*up hole*). A repetição dos dados obtidos nas duas operações determina a qualidade dos dados e os erros de medida. Na descida, o topo da sonda é utilizado como referência de profundidade já, na subida, a referência é a base

sonda. Essa mudança de referências é compensada pelo programa de aquisição, não afetando a análise das medidas obtidas em operações distintas, mas comprometendo o recobrimento da seção. Para o sensor de radiação gama, por exemplo, situado a 35 cm do topo da sonda, os registros começam na profundidade de 45 cm, pois normalmente se estabelece o zero quando o topo da sonda fica ao nível do solo. Um recobrimento também diferente ocorre com as sondas ILD e ILM.

Por causa do posicionamento dos sensores, o perfil GN é melhor recoberto na descida e os de indução na subida. Para os perfis GN foram então usados os dados obtidos na descida, enquanto que nos perfis de indução foram utilizados os obtidos na subida. Essa configuração fornece a maior cobertura para cada um dos perfis.

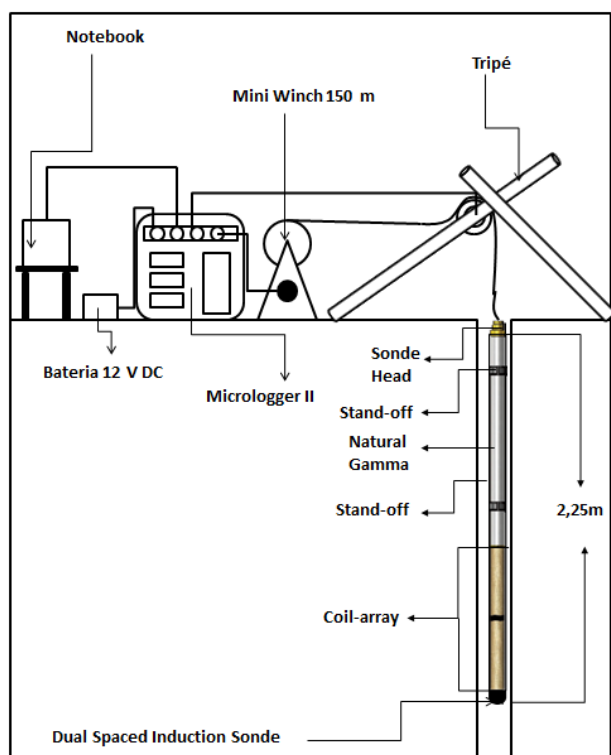


Figura 2 – Sistema de Aquisição com a Dual Spaced Induction Sonde, da Robertson Geologging a) Micrologger II; b) Dual Spaced Induction Sonde; c) Mini Winch 150 m; d) Roldana e tripé; e) Elementos adicionais (Baterias 12 V e Notebook). Imagem sem escala.

## Resultados

Para efeito de testes, cinco poços de monitoramento foram perfilados, totalizando 41 m de perfilagem. Dois poços apresentaram profundidades menores que 6 m, atravessando assim apenas a camada de aterro, no máximo atingindo o topo dos sedimentos quaternários.

A análise dos resultados primeiramente aborda um caso em que um perfil litológico aparentemente muito homogêneo foi reinterpretado com base nos perfis. O segundo caso mostra resultados em dois poços com

separação de 1.5 m, mas com valores de condutividade muito diferentes, interpretados como decorrentes de aspectos construtivos dos poços.

## Reinterpretação de um perfil geológico

A Figura 3 mostra resultados de perfilagem e de interpretação geológica em um dos poços mais profundos identificados na área. O perfil geológico com base na perfuração (Fig. 3a) mostra um terreno muito homogêneo, não condizente com descrições de poços vizinhos. Os resultados da perfilagem (Fig. 3b e 3c) foram então interpretados utilizando espessuras médias das unidades existentes no local, identificando seis horizontes, Z1 a Z6 (Fig. 3).

O perfil de condutividade mostra três intervalos: um até o nível Z2 com condutividade praticamente constante ( $35 \text{ mS.m}^{-1}$ ), o segundo de Z2 a Z6 com condutividade mais irregular ( $\sim 20 \text{ mS.m}^{-1}$ ) e o terceiro abaixo de Z6 com condutividade alta. De forma não tão bem definida, esses intervalos também são observados no perfil GN: o intervalo superior com radiação entre 150 e 200 cps, o intermediário com variações na faixa de 150 cps, e o inferior com contagem por volta de 200 cps.

O intervalo entre Z2 e Z6 pode ser subdividido segundo as variações nos perfis. Entre Z3 e Z4 observa-se um aumento concomitante de radiação gama e de condutividade, o que é compatível com a existência de uma camada mais argilosa. Resposta semelhante, porém não tão bem definida no perfil GN, é observada no intervalo Z5-Z6. Abaixo do nível Z6, além do aumento da contagem gama, o meio é mais condutivo, com variações abruptas de condutividade. Esse tipo de resposta tem sido observada em terrenos com embasamento alterado.

A incorporação dos horizontes Z1 a Z6 no perfil litológico (Fig. 3d) gera um perfil litológico com maior diversidade que aquele originalmente descrito apenas com dados da perfuração. Isso se deve à relativa monotonicidade dos materiais cortados pelo poço, de um modo geral muito argilosos. O quadro definido pelo perfil reinterpretado é mais realista e fornece elementos mais detalhados para a elaboração do modelo geológico conceitual. A existência de camadas argilosas, por exemplo, podem servir como selantes no fluxo descendente de contaminantes densos não aquosos, sua detecção sendo importante tanto nos estudos de caracterização e, eventualmente, nos trabalhos de remediação.

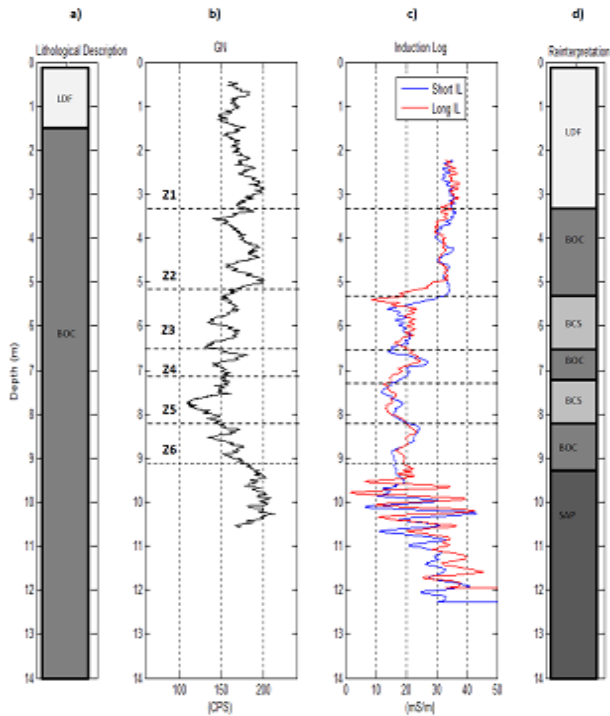


Figura 3 – a) Perfil litológico com base em informações de poço; b) perfil gama natural; c) perfis IL short e long, d) perfil litológico reinterpretado. LDF=aterro, BOC=Argila marrom com restos vegetais, BCS=Argila arenosa, SAP=Saprólito.

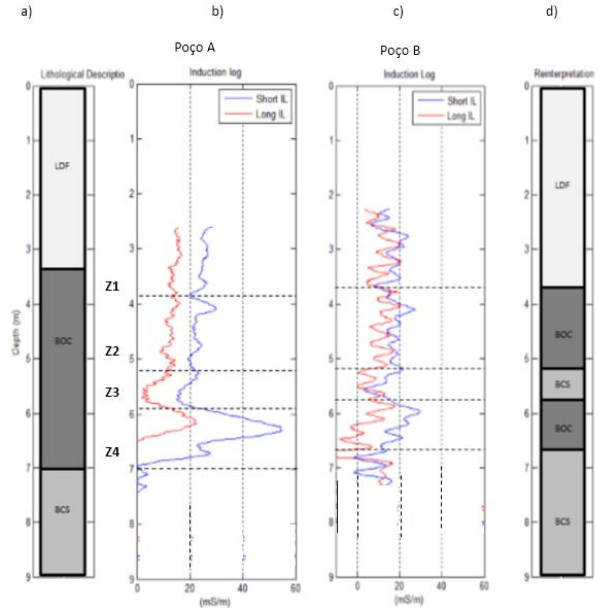


Figura 4 – (a) Descrição litológica do poço onde LDF=aterro, BOC=Argila Marrom com restos vegetais, BCS=Argila arenosa, SAP=Saprólito. b) Perfil de indução eletromagnética em mS/m, sendo representados pelas as cores azul e vermelho, respectivamente, os perfis short IL e long IL. c) Perfil de indução eletromagnética em mS/m, sendo representados pelas as cores azul e vermelho, respectivamente, os perfis short IL e long IL. d) Reinterpretação dos perfis litológicos. As linhas pontilhadas auxiliam na localização de variações em profundidade.

**Distorções em poços adjacentes**

A figura 4 mostra os perfis IL para dois poços situados a 1,5 m de distância, onde perfis GN respostas semelhantes as apresentas na figura 3, sendo portanto omitidas nesta figura. Os poços A (fig. 4b) e B (fig. 4c) apresentam valores de condutividade semelhantes até a profundidade Z3.

Entretanto abaixo do limite Z3, a condutividade do poço A é muito maior que a apresentada no poço B. Abaixo do limite Z4 a condutividade aparente medida no poço A torna-se negativa (não aparecendo no perfil), enquanto que no poço B os valores apenas diminuem. Essa diferença nos valores de condutividade dos poços A e B pode ser justificadas por aspectos construtivos diferentes, como o diâmetro total da perfuração (área do filtro e pré-filtro), além do uso de materiais metálicos na construção do poço (guia centralizadora, por exemplo). Distorções desse tipo podem levar a erros de interpretação, levando o intérprete a inferir variações das fácies geológicas quando o que está em jogo são aspectos construtivos utilizados em poços com diferentes especificações.

**Conclusões**

Os perfis de indução e radiação gama natural, mostraram que podem ser efetivos na caracterização ambiental, pois possibilitaram a discriminação de diferentes horizontes onde as descrições litológicas mostravam um cenário de homogeneidade entre as fácies. Entretanto o interprete deve considerar os aspectos construtivos dos poços, pois poços com diferentes tipos de construção podem levar a interpretações errôneas dificultando processo de formação de um modelo geológico conceitual da área.

**Agradecimentos**

Esse trabalho recebeu apoio do CNPQ (bolsa AFB) e da FAPESP (Processo 2013/22912-1). Agradecimentos especiais a Lídia Fernandez e Sergio Ogihara da ASACON, por propiciar os testes de campo e a análise dos resultados.

**Referências**

Companhia de Tecnologia Ambiental- CETESB,1999, Amostragem e Monitoramento de Águas Subterrâneas – Norma CETESB, 1988. (Atualizado, 1999). São Paulo. (Disponível em <[http:// www.cetesb.gov.br](http://www.cetesb.gov.br)>. Acesso em: 27 de março de 2015).

Doll, H., G., 1949. Introduction to induction logging and application to logging of well drilled with oil mase mud. Journal of petroleum technology, 1: 148-162 p.

Ellis, D.V. and Singer, J.M, 2008, Well Logging For Earth Scientists, ed. Elsevier, Vol. 4.

Keys, W. S., 1989, Borehole Geophysics Applied to Ground-water Investigations: National Water Well Association.

Luthi, S., M., 2001, Geological Well Logs: Use in Reservoir Modeling, ed. Springer, ed. 1.

Schlumberger, 1998, Log Interpretation, Volume II, Aplications: Schulumberger Ltd, New York, 116 p.

Scott, J. H., Petersen, J. K., Osterkamp, T. E., Kawasaki, K., 1986, Interpretation of Geophysical Well Logs in Permafrost. U.S. Departament of Energy, 130 p.