

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

Alex Fortunato Ribeiro

Perfis geofísicos em poços revestidos: aplicações
em hidrogeologia, meio ambiente e geotecnia

São Paulo
2016

Alex Fortunato Ribeiro

Perfis Geofísicos em poços revestidos: aplicações em hidrogeologia, meio ambiente e geotecnia

Dissertação apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Geofísica aplicada
Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Carlos Alberto Mendonça

Agradecimentos

Primeiramente de expressar os meus sinceros a todas pessoas que colaboraram e apoiaram esse presente estudo de forma direta e indireta.

Principalmente, gostaria de agradecer ao Professor Dr. Carlos Alberto Mendonça, meu orientador, por acreditar em mim e pela a sua conduta exemplar, pelo o constante apoio e dedicação dispensada, sem medir esforços no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela bolsa de estudos fornecida no período de 2014 a 2016.

Aos pesquisadores do IPT Otávio Coaracy Gandolfo pelo apoio durante estudos para fundações e Carlos Alberto Birelli por me ensinar a operar o equipamento utilizado nesse trabalho.

A Lídia Fernandez e Sergio Ogihara da ASACON, por propiciar os testes de campo e a análise dos resultados em Barueri.

Ao Aluno de doutorado e funcionário da American Tower do Brasil, Tiago de Jesus Souza pela ajuda nos estudos fundações e proporcionar a parceria entre IAG, IPT e American Tower.

A American Tower do Brasil, por propiciar os testes de campo e análise dos resultados em Barueri.

Aos meus amigos e colegas de IAG-USP, Eduardo Marcos, Luan Saraiva, Marta Jacomo, André Kowalski, Renata Constantino, Oscar Patroni, Edgar, Cassiano Bortolozzo e Irfan Ullah, entre outros, por toda a juda e paciência em conviverem comigo durante todas as fases do meu trabalho.

As minha amiga Linda Mulero por estar sempre do meu lado, mesmo que a distância, principalmente nessa última fase do trabalho.

E por fim a minha família, principalmente, minha mãe, avó e irmãos, pois sem o apoio deles durante todo esse trabalho.

Resumo

Estudos de perfilagem geofísica em poços revestidos são desafiadores, pois estes não permitem o contato direto da sonda com as unidades atravessadas pelo poço. Apenas as sondas que utilizam o princípio da indução eletromagnética (IL-*Induction Log*) ou de radiação gama (GN- *Gamma Natural*) podem ser utilizadas. Este trabalho aplica as sondas IL e GN em poços tubulares (para captação de água subterrânea), poços de monitoramento e furos geotécnicos. Os resultados são utilizados para complementar informações geológicas em estudos ambientais, hidrogeológicos além de estudos em fundações de torres de telefonia, mostrando assim um leque de aplicabilidade para a perfilagem geofísica em poços revestidos.

Palavras chave: perfilagem de indução eletromagnética, perfilagem de radiação gama natural, poços de monitoramento, furos geotécnicos, fundações, DNAPL, quaternário e biogás.

Abstract

Studies of geophysical logging in cased wells are challenging, as these does not allow direct contact of the probe with the geologic units traversed by the well. Only probes that use the principle of electromagnetic induction (IL-Induction Logging) or gamma radiation (GN-Natural Gamma) may be used. This work applies the IL and GN probes in the cased wells for groundwater catchment, monitoring wells for environmental investigations and geotechnical drill holes. The results were used to complement geological information in environmental and hydrogeological studies and to characterize foundation properties of phone cell towers. Our results illustrate a wide range of applicability to borehole logging in shallow cased holes.

Keywords: induction logging, gamma ray logging, monitoring wells, tube wells, geotechnical holes, foundation, DNAPL, quaternary e biogas

Sumário

Introdução	11
Capítulo 1	14
Perfilagem Geofísica de poço.....	14
1.1- Perfilagem de Indução Eletromagnética (IL-Induction Log).....	14
1.1.1- Propriedades elétricas	14
1.1.2- Características gerais dos perfis IL	17
1.1.3 – Determinação da Condutividade Aparente.....	19
1.1.4 – Fator Geométrico.....	21
1.1.5 – Sondas IL com múltiplas bobinas	22
1.2 - Perfilagem de radiação gama natural (GN – <i>natural gamma ray</i>).....	23
1.2.1 - Propriedades Radioativas.....	23
1.2.2 – Radioatividade nos minerais e rochas	24
1.2.3 - Princípio de funcionamento da sonda GN	25
Capítulo 2	27
Procedimentos de campo	27
2.1 – Equipamento utilizado	27
2.1- Programa de aquisição de dados.....	30
2.3- Calibração da Sonda IL.....	33
Capítulo 3	38
Perfilagem em poços tubulares.....	38
3.1- Descrição dos poços e área teste.....	40
3.2- Dados de perfilagem.....	41
3.3- Resultados Obtidos.....	42

3.3.1- Perfilagem na seção revestida	42
3.3.2- Perfilagem em poço aberto	45
3.4 – Discussão dos resultados	47
Capítulo 4	51
Perfilagem em poços de monitoramento: Área contaminada por DNAPL.....	51
4.1 – Descrições dos poços e da área teste.....	53
4.2- Aquisição de dados	55
4.3- Resultados Obtidos.....	55
4.3.1- Caso 1: Reinterpretação de um perfil litológico.....	56
4.3.2- Caso 2: Distorção em poços adjacentes	58
4.4- Discussão dos resultados.....	59
Capítulo 5	60
Perfilagem em poços de monitoramento: Área com acumulação natural de metano.....	60
5.1- Acumulações de biogás em sedimentos orgânicos.....	61
5.2 – Aspectos históricos e descrição da área teste	63
5.3 –Aspectos geológicos.....	64
5.4 –Dados de perfilagem	67
5.5 – Resultados obtidos	69
5.7-Discussão dos resultados.....	70
Capítulo 6	73
Perfilagem em furos geotécnicos	73
6.1 - Descrição dos Furos	74
6.2 - Dados de perfilagem.....	75
6.3- Resultados Obtidos.....	75

7- Conclusão	84
8- Referências Bibliográficas	86
9 -ANEXOS	90

Introdução

A perfilagem geofísica é definida como um conjunto de métodos de investigação indireta utilizados em poços ou furos de sondagem, com o objetivo de mensurar as propriedades físicas de diferentes unidades geológicas atravessadas pela perfuração (Keys, 1989). Geralmente os poços ou furos de sondagem são instalados nas fases iniciais de estudos exploratórios para recursos naturais (petróleo, gás, minerais em geral), investigação do meio ambiente e estudos de geotecnia. As informações obtidas na perfuração são pontuais e muitas vezes com amostragem comprometida fazendo com que os dados obtidos de forma indireta, com a perfilagem geofísica, complementem tais informações. Furos com testemunhagem contínua são raros e de difícil obtenção em terrenos inconsolidados, aumentando a importância da perfilagem geofísica.

Medidas de propriedades físicas em poços são relatadas desde o século XIX, a introdução da técnica de perfilagem geofísica sendo atribuída a Conrad Schlumberger em 1927. O então professor de física da *Ecole de Mine de Paris*, França, realizou medidas de resistividade elétrica com eletrodos de corrente e potencial em um poço, no campo petrolífero de Pechelbronn. Suas medidas foram anotadas a cada metro e representadas em gráficos nos quais os valores de resistividades foram atribuídos ao eixo das abscissas e a profundidade ao eixo das ordenadas, com valores positivos para baixo (Allud *et al.*, 1977). Esta representação de perfis geofísicos vigora até hoje, configurando a forma padrão de ser representar a variação de propriedades físicas ao longo de poços e furos de sondagem.

Desde a sua introdução no contexto da indústria do petróleo, a perfilagem geofísica experimentou avanços tecnológicos e encontrou outras áreas de aplicação. Ellis & Singer (2008) mostrou que as técnicas de perfilagem geofísica com aplicações na exploração de petróleo e gás fornecem parâmetros petrofísicos de interesse na caracterização de recursos hídricos subterrâneos, tais como: porosidade, permeabilidade e saturação (quantidade de fluido nos poros das rochas), dentre outras propriedades. Hunter *et al.* (2010) utilizaram perfis geofísicos em poços de exploração de hidratos de gás, em sedimentos marinhos mostrando que os níveis com gás são caracterizados nos perfis de radiação gama e de resistividade elétrica.

As aplicações da perfilagem geofísica em problemas ambientais e de exploração de água subterrânea – geralmente enquadrados na área de “geofísica rasa” (*near surface*

geophysics) – teve início em 1948 quando da produção do primeiro perfilador de poço (*logger*) pelo USGS (*United States Geological Survey*), com especificações para poços de água subterrânea. Jones e Skibitzke (1956) escreveram o primeiro livro-texto sobre perfilagem aplicada à exploração de águas subterrâneas. Esse livro apresenta fundamentos e casos de aplicação, envolvendo perfis elétricos, radiométricos, de temperatura e calíper e serviu como referência para pesquisadores e profissionais na área de hidrogeologia. Kent (1993) apresentou um histórico sobre a transição da perfilagem geofísica utilizada na indústria do petróleo para problemas de investigação rasa. Essa mudança ocorreu, principalmente, devido à necessidade de se localizar com maior precisão os horizontes aquíferos dentro de um poço. Fato importante nessa transição foi a miniaturização dos dispositivos eletrônicos, introdução de tecnologia digital e de computação, gerando equipamentos confiáveis, leves e de menor custo.

De um modo geral, a perfilagem geofísica em poços utilizados em hidrogeologia e/ou captação de águas subterrâneas têm como objetivo, complementar estudos geofísicos realizados em superfície. Fitterman *et al.* (1991) utilizaram perfis de indução eletromagnética para determinar modelos geofísicos compostos por camadas para auxiliar na interpretação de sondagens eletromagnéticas no domínio do tempo (TDEM) e de caminhamento eletromagnético de separação constante (TCM) em terrenos sedimentares. Nesse estudo, a correlação lateral dos modelos de camada e a interpretação integrada dos dados das sondagens TDEM e TCM possibilitaram mapear zonas condutivas no interior de paleocanais aluvionares, que condicionavam a recarga do aquífero subjacente. Paine *et al.* (1998) utilizaram perfis de indução eletromagnética e de gama natural para auxiliar a interpretação de sondagens TDEM em terrenos sedimentares e cristalinos com alto grau de fraturamento. A análise dos dados mostrou que a condutividade elétrica depende da saturação (quantidade fracional de água nos poros e fissuras) e da quantidade de argilas, a resposta nas fraturas dependendo mais da concentração de sais dissolvidos na água.

Atualmente a perfilagem geofísica tem encontrado novos nichos de aplicação. Zechun *et al.*, (1999), por exemplo, observaram que contagens altas de radiação gama associavam-se a sedimentos depositados em período interglacial e contagens baixas em período glacial, permitindo caracterizar as variações de clima seco e úmido em estudos sobre variações climáticas. Conyears (2000) empregou perfis de indução eletromagnética e de

radiação gama natural para mapear um paleocanal em um sítio arqueológico pré-histórico; a constatação que o paleocanal migrou lateralmente forneceu subsídios para a interpretação arqueológica.

Essa Dissertação tem como objetivo experimentar métodos de perfilagem geofísica em poços revestidos, com aplicações em estudos de contaminação ambiental, furos de sondagem utilizados em geotecnia e poços para a captação de água subterrânea. Nosso objetivo é verificar se um mesmo conjunto de perfis geofísicos, adquiridos com sondas que podem ser utilizadas em poços e furos revestidos, é capaz de fornecer informações relevantes a cada um dos problemas investigados. Nosso estudo não tem a pretensão de investigar cada caso com a profundidade de um estudo específico, mas ao contrário, verificar se a utilização da perfilagem geofísica acrescenta informações relevantes aos problemas investigados.

A presente Dissertação está organizada em seis capítulos. O primeiro Capítulo discute aspectos metodológicos da perfilagem geofísica com sondas de indução eletromagnética e de radiação natural, que podem ser utilizadas em poços revestidos. Não se apresenta uma revisão geral dos métodos geofísicos de perfilagem, tal como pode ser encontrada em livros-texto sobre o assunto. O Capítulo 2 descreve as especificações das sondas utilizadas, as características do equipamento empregado, parâmetros de aquisição e de calibração e os procedimentos de campo. Os capítulos seguintes descrevem “histórias de caso”, a se iniciar com a aplicação da perfilagem em poços tubulares tais como usados na captação de água (Capítulo 3). O Capítulo 4 apresenta aplicações em uma área de passivo ambiental contaminada por DNAPL (*Dense Non-Aqueous Phase Liquid*) na qual as descrições dos perfis litológicos não permitiam uma caracterização adequada das unidades geológicas atravessadas pelos poços. O Capítulo 5 descreve outra aplicação em poços de monitoramento, envolvendo um problema de acumulação de metano em sedimentos quaternários orgânicos da Bacia de São Paulo. O Capítulo 6, por fim, apresenta testes de perfilagem em furos geotécnicos para determinar a profundidade de fundações metálicas em torres de telefonia.

Capítulo 1

Perfilagem Geofísica de poço

1.1- Perfilagem de Indução Eletromagnética (IL-Induction Log)

1.1.1- Propriedades elétricas

A condutividade elétrica é a capacidade que os materiais têm de transmitirem corrente elétrica, sendo definida pela lei de Ohm (Ohm, 1927). A condutividade elétrica quantifica a relação de proporcionalidade, assumida constante dentro de uma faixa de operação, entre o campo elétrico \vec{E} e a densidade de corrente \vec{j} num dado volume de material. A unidade de medida da condutividade elétrica (SI) é Siemens por metro (Sm^{-1}).

Os tipos de condução elétrica podem ser definidos de acordo com o mecanismo que o material permite a passagem da corrente elétrica. A condução elétrica nos materiais geológicos (solos e rochas) são divididos em três diferentes tipos: a condução eletrônica, semicondutor e eletrolítica.

A condução eletrônica é o mecanismo de condução elétrica que ocorre nos metais. A teoria de Drude (Perez, 2000) mostra que uma nuvem de elétrons em movimento constante e caótico, quando colocados na presença de um campo elétrico a nuvem eletrônica adquire um movimento organizado, originando uma corrente elétrica. O movimento organizado dos elétrons pode ser eventualmente perturbado por choques dos mesmos com os núcleos átomos da rede metálica. O tempo médio entre os choques de um dado elétron denomina-se tempo de relaxação (τ). A condutividade elétrica dos metais é dada por:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (1.1)$$

Sendo n o número de elétrons livres por unidade de volume, e a carga elementar do elétron e m a massa do elétron.

Na condução em semicondutores os elétrons da camada de valência só podem ser liberados através de energia térmica, onde os elétrons liberados causam instabilidades na camada de valência criando lacunas que são preenchidas por outros elétrons. Esse movimento de preenchimento da camada de valência gera uma corrente elétrica que depende da temperatura. O número de elétrons livres na camada de valência aumenta conforme a lei de Stefan-

Boltzmann ($n_s = c \exp\left(\frac{-E}{kT}\right)$ (1.2), sendo c uma constante de proporcionalidade, K a constante Boltzmann e E a energia de ativação inerente ao material. Substituindo (1.2) em (1.1) obtém-se a condutividade em um semicondutor segundo:

$$\sigma = \frac{ce\tau}{m} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \quad (1.3)$$

Minerais de óxidos e sulfetos comportam-se como semicondutores na condução de corrente elétrica. Por apresentarem energia de ativação baixa, alguns minerais de sulfeto (pirita, calcopirita, etc) ou óxidos (magnetita em especial) são denominados “condutores” (e não semi-condutores) nos trabalhos de geofísica.

A condução elétrica em soluções eletrolíticas aquosas é a mais comum nas rochas da parte superior da crosta terrestre. Rochas saturadas por soluções aquosas são compostas por duas fases contendo uma fase mineral sólida e a outra contendo uma rede de poros que são saturados por eletrólitos. Essas duas fases definem um regime de interface no qual a propriedade elétrica é diferente de cada fase em particular. Os fenômenos de interface são descritos por modelos de dupla camada elétrica, o modelo de Stern, ilustrado na Figura 1.1, sendo um dos mais utilizados em geofísica.

Como a maioria dos minerais que compõem a fase sólida das rochas possuem condutividades muito baixas (quando comparadas com a condutividade da fase líquida), apenas os sulfetos condutivos e grafita (raros são os casos de magnetita) contribuem para condutividade. Na maioria dos casos a condutividade da rocha é condicionada pela configuração do arcabouço mineral (porosidade, tortuosidade), propriedades do fluido (condutividade e saturação) e propriedades da interface fluido-mineral que forma a dupla camada elétrica (Revil et al., 2012).

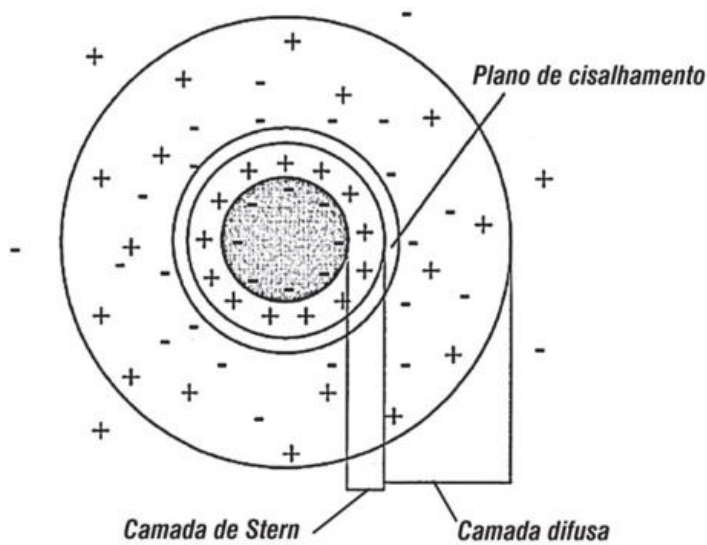


Figura 1.1 – Representação esquemática da dupla camada elétrica. Adaptado de Revil et al., (2012).

A condutividade elétrica para uma rocha parcialmente saturada é dada por:

$$\sigma_0 = \frac{S_w^n}{F} (\sigma_w + \beta_{(+)} \frac{Q_v}{S_w}) \quad (1.4)$$

tal que

$$\overline{Q_v} = (1 - f) Q_v \quad (1.5)$$

$$Q_v = \rho_s \frac{(1-\phi)}{\phi} CEC \quad (1.6)$$

sendo

S_w o coeficiente de saturação

σ_w a condutividade devida aos sais (Sm^{-1}).

$\beta_{(+)}$ um fator que indica a mobilidade dos cátions em poro de água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{V}^{-1}$).

Q_v e $\overline{Q_v}$ são densidades de carga (Cm^{-3}) nas partes difusa fixa (ou de Stern) da dupla camada elétrica.

f a fração de íons positivos na camada de Stern (em comparação com a camada difusa)

F o fator de formação elétrica (adimensional) dado pela lei de Archie, $F = \phi^{-m}$.

CEC

ρ_s a densidade (kg m^3) da fase sólida.

m o fator de cimentação (primeiro expoente de Archie).

n o expoente de saturação.

A Figura 1.2 mostra a resistividade dos diferentes tipos de sedimentos e rochas. Como mostra a figura, a faixa de resistividade das rochas é ampla. Na prática, porém, utilizando sondas de indução, materiais com resistividades acima de 100 ohm.m não fornecem respostas distintas. Assim, apesar da existência de contrastes, as sondas usuais de perfilagem com indução eletromagnética consegue distinguir materiais com resistividades na faixa de folhelhos, argilas, aluviões e arenitos, tal como na Figura 1.2. Essa limitação para a sonda de indução é observada também em sondas de resistividade elétrica, no caso com dificuldade em discriminar materiais condutivos.

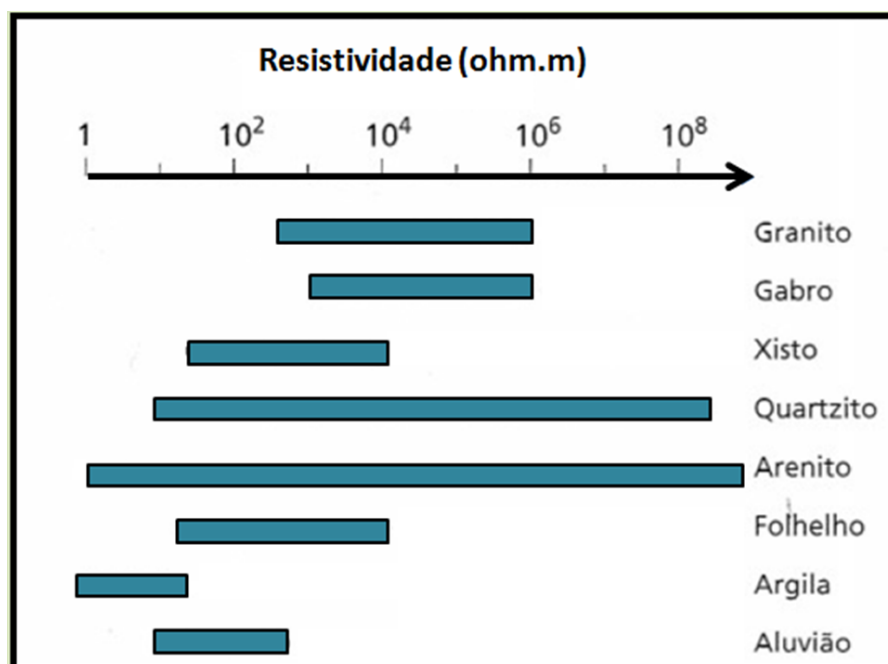


Figura 1.2 – Tabela com a resistividade de rochas e sedimentos em ohm.m. Adaptado de Kearey et al., (2008)

1.1.2– Características gerais dos perfis IL

O período pós segunda guerra mundial foi de grande importância para o desenvolvimento da geofísica, pois foram desenvolvidos diversos equipamentos observacionais e de defesa durante esse período. Dentro desse contexto, instrumentos baseados na no princípio da indução eletromagnética (IL- induction log) foram projetados para detecção de minas explosivas (Crain, 2001).

Durante as décadas de 20 e 30 perfis de resistividade foram largamente empregados na indústria petrolífera. Entretanto, muitos poços perfurados na prospecção de petróleo

empregavam lama com base de óleo (eletricamente resistiva), situação que impede o contato elétrico com a formação, impossibilitando a determinação da resistividade da mesma. Doll (1949) utilizou pela primeira vez uma sonda de indução (Figura 1.1) para medir a resistividade da zona virgem, onde as medições dessas resistividades permitiram quantificar a saturação em água da formação, em poços com lama a base de óleo.

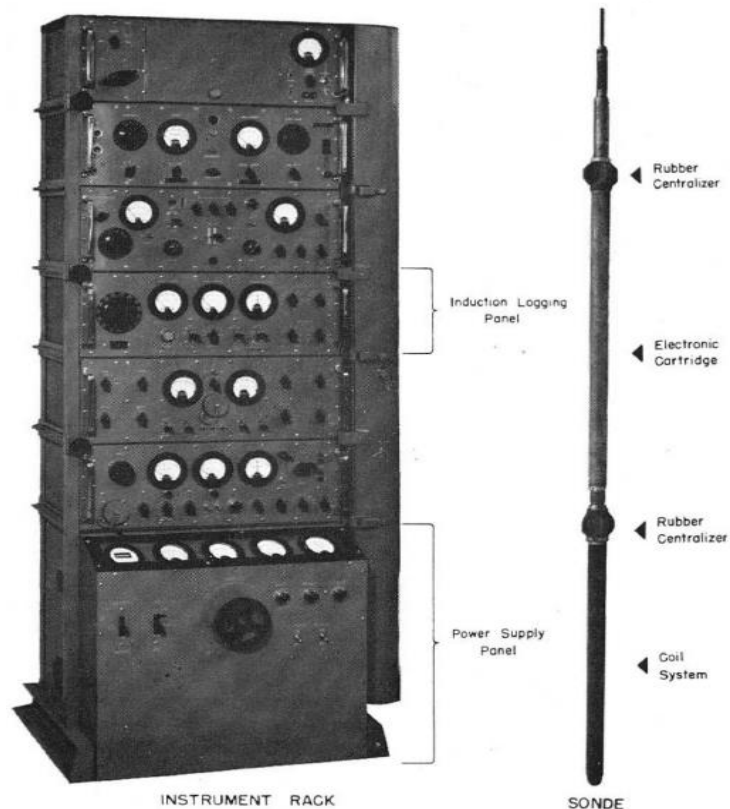


Figura 1.3-Primeiro instrumento na realização de perfis IL, Doll (1949).

Sondas atuais de indução podem apresentar um conjunto de até sete bobinas, podendo existir, em alguns casos, até três pares de bobinas transmissoras e receptoras. Uma simplificação para um par de bobinas simplifica a compreensão do funcionamento da sonda IL.

Bobinas transmissoras e receptoras possuem, respectivamente, um oscilador e um amplificador (Figura 1.2). O oscilador gera correntes alternadas com intensidade constante e, por consequência, um campo eletromagnético também constante e na mesma frequência. O campo magnético gerado pelas bobinas transmissoras penetra radialmente na parede do poço gerando correntes induzidas nas formações vizinhas ao poço, especialmente nas unidades mais condutivas.

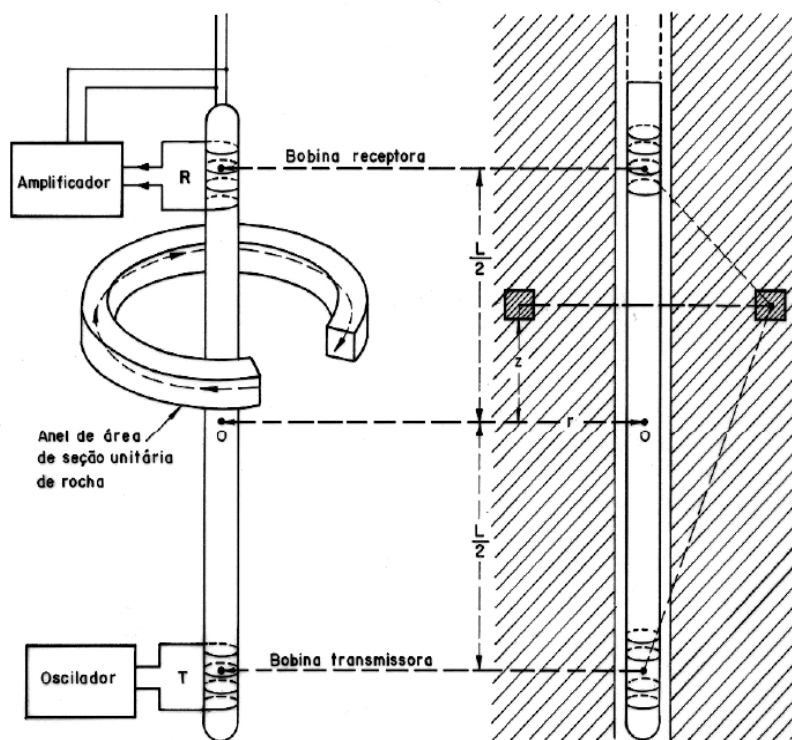


Figura 1.4- Princípio de funcionamento de funcionamento da sonda de Indução para um par de bobinas. Adaptado de Carvalho (1993).

As correntes induzidas fluem na forma de *loops* circulares, defasadas em 90° em relação às correntes geradas nas bobinas. Essas correntes criam um campo magnético secundário, que induz uma força eletromotriz na bobina receptora. As magnitudes das tensões geradas na bobina receptora são proporcionais à condutividade elétrica do meio (Schlumberger, 1998). Essa característica permite que a sonda de indução eletromagnética meça a condutividade do meio sem contato direto com as formações existentes na vizinhança do poço. Este tipo de sonda pode então ser utilizado em poços revestidos com tubos não metálicos.

1.1.3 – Determinação da Condutividade Aparente

A situação esquematizada na Figura 1.2 mostra uma sonda IL com um par de bobinas sendo utilizada para determinar a condutividade elétrica do meio usando a aproximação de “baixo número de indução” (Mcneill, 1986). Considerando que todo o material circundante ao ponto de medida seja homogêneo, com condutividade a força eletromotriz (f.e.m) medida na

bobina receptora, descontada do campo primário causado pelo acoplamento direto entre as bobinas, é dada por:

$$\left| \frac{V_s}{V_p} \right|_{\text{quadratura}} = \frac{2}{\mu \sigma \omega s^2} \quad (1.7)$$

permitindo determinar a condutividade segundo:

$$\sigma = \frac{2}{\mu \omega s^2} \left| \frac{V_s}{V_p} \right|_{\text{quadratura}} \quad (1.8)$$

sendo:

$\omega = 2\pi f$, com f a frequência de operação da sonda em (Hz).

μ a permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ h/m).

σ a condutividade do meio (mS/m).

s o espaçamento entre as bobinas transmissora e receptora (m).

V_s a tensão na bobina receptora.

V_p a tensão medida bobina receptora quando a sonda está no ar.

Para algumas sondas, essa relação linear entre a tensão na bobina receptora V_s e a condutividade deixa de ser válida para meios com resistividade acima de 100 ohm.m ($10 \text{ mS} \cdot \text{m}^{-1}$), aproximadamente (Scott et al., 1986).

A equação (1.8) representa o valor da condutividade num meio isotrópico e homogêneo, também conhecida como condição de semi-espaco homogêneo. Como a condutividade no meio poço não é uniforme, esta equação se aplica para camadas espessas, se comparadas com o espaçamento s . De um modo geral, a condutividade aparente medida dentro de um poço é função da distribuição de condutividade ao seu redor. Na situação da figura 1.2 temos uma distribuição de condutividade simétrica ao eixo das bobinas da sonda, nessa situação temos que condutividade aparente é dada por (Mcneill, 1986):

$$\sigma_a = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} g(r, z) \sigma(r, z) dr dz \quad (1.9)$$

sendo $g(r, z)$ uma função de ponderação, que dá a contribuição relativa do sinal resultante dos anéis de corrente que passam por r e z .

Reescrevendo a equação (1.9) assumindo n camadas com condutividades σ_i e espessuras $L_i, i=1, \dots, n$ obtemos:

$$\begin{aligned} \sigma_{an} = & \sigma_1 \int_{-L_1/2}^{+L_1/2} \int_0^{\infty} g(r, z) dr dz + \sigma_2 \int_{-L_2/2}^{+L_2/2} \int_0^{\infty} g(r, z) dr dz + \dots \\ & + \sigma_n \int_{-L_n/2}^{+L_n/2} \int_0^{\infty} g(r, z) dr dz \quad (1.10) \end{aligned}$$

Fazendo que $G_i = G_i(r, z) = \int_{-L_i/2}^{+L_i/2} \int_0^{\infty} g(r, z) dr dz$ obtemos a expressão para a condutividade aparente, tal como a utilizada por Carvalho (1993):

$$\sigma_{an} = \sigma_1 G_1 + \sigma_2 G_2 + \dots + \sigma_n G_n \quad (1.11)$$

sendo G_1, G_2, \dots, G_n , representam a taxa de contribuição de cada zona coaxial para o sinal total. Logo $G_1 + G_2 + \dots + G_n = 1$.

1.1.4 – Fator Geométrico

A Figura 1.6a mostra o fator geométrico radial $G(r)$ – *radial sensitive* - que é obtido pela a integração da componente vertical ($-\infty < z < \infty$) da função $G(r, z)$. O gráfico da função $G(r)$ possui valor máximo em $L/2$, onde L é o espaçamento entre as bobinas, logo a condutividade aparente é influenciada por zonas situadas entre $\frac{L}{2} < r < \frac{3L}{2}$. Zonas condutoras situadas a uma distância radial maior que $3L$ tem contribuição praticamente irrelevante na condutividade aparente.

A Figura 1.6b mostra o fator geométrico vertical $G(z)$ – *vertical sensitive* – que é obtido pela a integração da componente radial ($0 < r < \infty$) da função $G(r, z)$. O gráfico da função $G(z)$ mostra que anéis de corrente situados a distâncias verticais na faixa de $|z| < 0,5L$, possuem maior influência no sinal medido pela sonda. Entretanto camadas de alta condutividade mesmo que acima dessa zona de influência podem influenciar mais na condutividade aparente do que camadas de baixa condutividade no centro das bobinas.

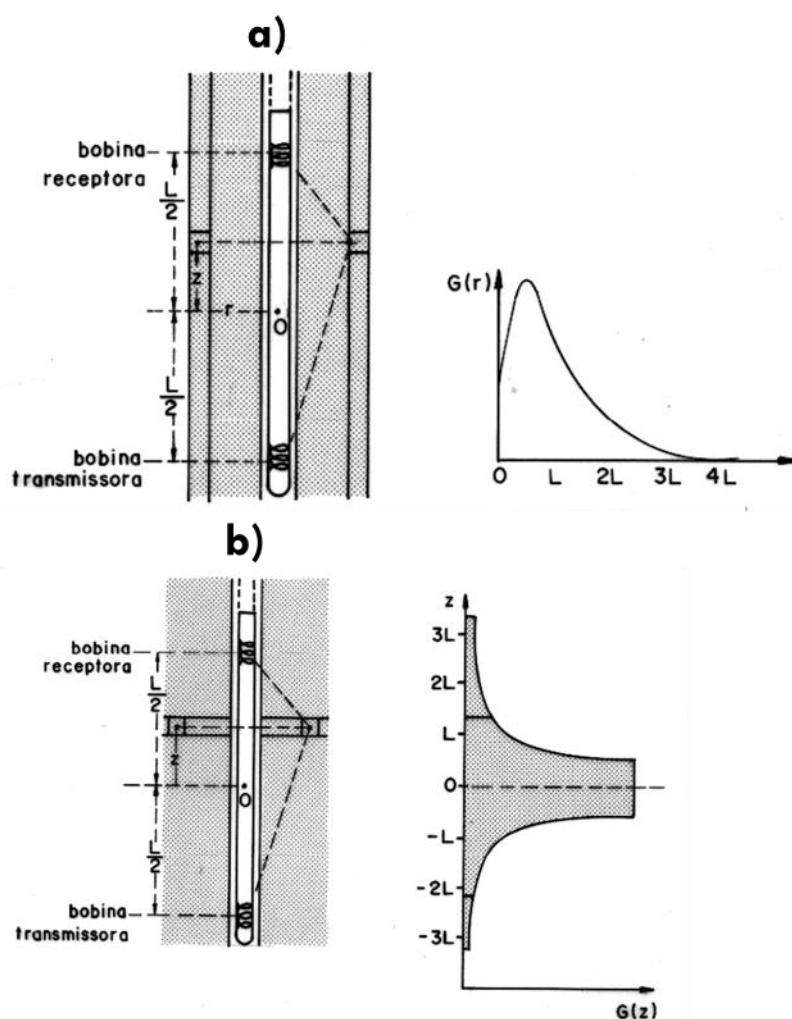


Figura 1.5- Fator Geométrico. a) Fator geométrico radial $G(r)$. b) Fator geométrico vertical $G(z)$. Adaptado de Carvalho, 1993.

1.1.5 – Sondas IL com múltiplas bobinas

As sondas atuais de indução possuem no mínimo dois pares de bobinas transmissoras e receptoras e são chamadas de *Dual Induction Sonde*, pois registram valores de condutividade aparente para pelo menos dois espaçamentos de bobinas. O par de bobinas com maior separação fornece o ILD, o termo “D” expressando “deeper”; o par com menor separação o ILM (“M” para profundidade menor), cada uma investigando profundidades diferentes (Keys, 1989).

O espaçamento entre as bobinas pode ter múltiplas distâncias, variando de acordo com o fabricante e com o tipo de aplicação que a sonda se destina. As sondas ILM possuem de 16” a 25” de espaçamento, enquanto que as sondas ILD possuem de 40” a 64”. Cabe dizer

que algumas sondas possuem bobinas adicionais focadas para reduzir a influência do furo nas medidas de condutividade.

As frequências de aquisição dessas sondas variam de 10 a 40 kHz. Sondagens que operam em diferentes frequências permitem uma melhor investigação dos alvos. Sondagens que atuam em baixas frequências são menos afetadas pelo “*skin effect*” (Schlumberger, 1998). Sondagens com maior frequência de operação são mais efetivas na resolução de camadas resistivas.

1.2 - Perfilagem de radiação gama natural (GN – *natural gamma ray*)

1.2.1 - Propriedades Radioativas

A radioatividade natural é originada a partir do decaimento espontâneo da série de isótopos instáveis dos elementos urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K). O decaimento espontâneo desses elementos gera de três tipos de partículas radioativas alfa (α), beta (β) e gama (γ). O processo de decaimento radioativo tem caráter estatístico, pois o número de átomos que desintegram por unidade de tempo é proporcional ao número de átomos presentes (Telford et al., 1990).

A partícula α é composta por núcleo de hélio (^4_2He) como tal possuindo dois prótons e dois nêutrons. A partícula β é composta por elétrons. Emitidos quando um nêutron se divide em um próton e um elétron. Durante certas desintegrações o próton mantém-se no núcleo (sem alteração na massa atômica) mas o número atômico aumenta, formando um novo elemento químico. Os raios gama (*gamma rays*) são emitidos quando um núcleo excitado decai para um estado menos excitado (Kearey et al., 2009).

As partículas α e β possuem pequena penetração nas rochas, pois a sua interação com a matéria ocorre através forças coulombianas e por consequência sua faixa de penetração é pequena, da ordem alguns milímetros no caso da partícula α e de decímetros para a partícula β . Pela baixa penetração a radiação associada a essas partículas pode ser considerada desprezível nos perfis GN (Elis & Singer, 2008). A radiação gama, porém perde pouca energia quando ultrapassa pacotes de rocha, sendo tal maneira a principal fonte de radiação em estudos de radiometria em superfície e nos perfis de poço.

A radiação gama é considerada como uma onda eletromagnética ou uma partícula de energia (fótons). A radiação gama possui frequência entre 10^{19} e 10^{21} Hz, o que equivale a comprimentos de onda entre 10^{-9} e 10^{-11} cm. As energias medidas para a radiação gama são da ordem de keV e MeV¹ (Luthi, 2001).

1.2.2 – Radioatividade nos minerais e rochas

A radioatividade natural medida em levantamentos geofísicos basicamente é constituída por radiação gama causada pelo o decaimento radioativo de isótopos instáveis (“isótopos pai”) para elementos filhos mais estáveis. A taxa de elementos filhos é proporcional à quantidade de isótopos pai. O decaimento de isótopos instáveis é caracterizado pelo tempo de meia-vida, que é o tempo necessário para que um elemento químico sujeito a decaimento radioativo perca metade da sua massa. Nas rochas, apenas isótopos com meia vida da ordem de bilhões de anos, contribuem para a radioatividade natural, pois isótopos com meia vida curta transformaram-se em elementos filhos estáveis em um passado geológico distante (Wollenberg, 1977). Os isótopos mais relevantes para estudos de radioatividade de rochas e solos são urânio (^{238}U), tório (^{232}Th) e potássio (^{40}K).

O urânio é encontrado em rochas ígneas ácidas e sedimentos ricos em matéria orgânica, como por exemplo os folhelhos marinhos. São também encontrados em minerais de argila e silte onde muitas vezes substituem o tório no arranjo cristalino de monazita e zircão. A maior ocorrência de urânio é na forma do isótopo ^{238}U que representa 99 % de toda a ocorrência natural de urânio. Seu decaimento radioativo ao longo leva à formação de ^{206}Pb . O tempo de meia vida do ^{238}U é de 4,4 bilhões de anos.

O tório é encontrado em rochas ígneas intrusivas como por exemplo, granitos, granodioritos e sienitos. As quantidades mais expressivas desse elemento são encontradas em minerais de monazita. Sua série radioativa parte do ^{232}Th e sofre vários decaimentos até atingir a estabilidade quando decai para ^{208}Pb . O tempo de meia-vida do ^{232}Th é de 1,4 bilhões de anos.

¹Elétron-volt é definido como é a quantidade de energia cinética ganha por um único elétron quando acelerado por uma diferença de potencial elétrico de um volt, no vácuo.

A ocorrência de potássio está relacionada a minerais de argila (ilita e glauconita), mica (muscovita e biotita) e feldspatos (ortoclásio). Também são encontrados em sequências de evaporitos (silvinitas e sulfatos). O isótopo radioativo do potássio é o ^{40}K que, por emissão de partículas gama, decai para ^{40}Ar . O ^{40}K possui meia-vida de 1,3 bilhões de anos e é um elemento relativamente raro na crosta terrestre, pois menos de 1% de todo o potássio da crosta é encontrado nessa forma.

Em suma, as rochas que possuem a maior concentração de minerais radioativos são: folhelhos, arcósios e grauvacas, arenitos argilosos, sedimentos marinhos ricos em matéria orgânica, rochas ígneas ácidas, fosfatos e sais de potássio (Luthi, 2001).

1.2.3 - Princípio de funcionamento da sonda GN

O perfil de radiação gama natural (GN) foi introduzido em 1939 como sendo o primeiro perfil geofísico não elétrico. Em sedimentos e rochas sedimentares, o perfil GN expressa o conteúdo de argila das formações, isso ocorre devido ao fato de argilo-minerais acumularem frações relevantes de isótopos radioativos. Essas características fazem com que o perfil GN seja considerado um “perfil litológico”, pois traz informações do conteúdo mineral diferenciando sedimentos argilosos de arenosos.

Como já dito anteriormente o perfil GN detecta a radiação gama natural advinda do decaimento dos isótopos radioativos da série do U, Th e K. Nos isótopos radioativos apenas a diminuição da massa de um elemento instável é quantificável, porém a quantidade de desintegrações que ocorre num fenômeno radioativo é um efeito randômico, pois não é previsível. Entretanto a probabilidade de que ocorra uma desintegração num certo intervalo de tempo é previsível e pode ser expresso pela a distribuição de Poisson (Elis & Singer 2008).

$$P_x = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad (1.12)$$

sendo m é o valor médio esperado do número de decaimentos em um intervalo de tempo.

A detecção da radiação gama nos perfis GN é realizada através de um sensor composto por um cintilômetro (Figura 1.6). De um modo geral cintilômetro é composto por um cristal de iodeto de sódio (NaI) ativado por tálio. O cristal que compõe esse sensor,

quando exposto aos raios gama, emite fótons de luz que são amplificados e convertidos em pulsos elétricos através de um tubo fotomultiplicador opticamente acoplado. Este pulso é então registrado na forma de contagem (número de pulsos) por unidade de tempo. A unidade de medida da radiação gama é CPS (*counts per second*).

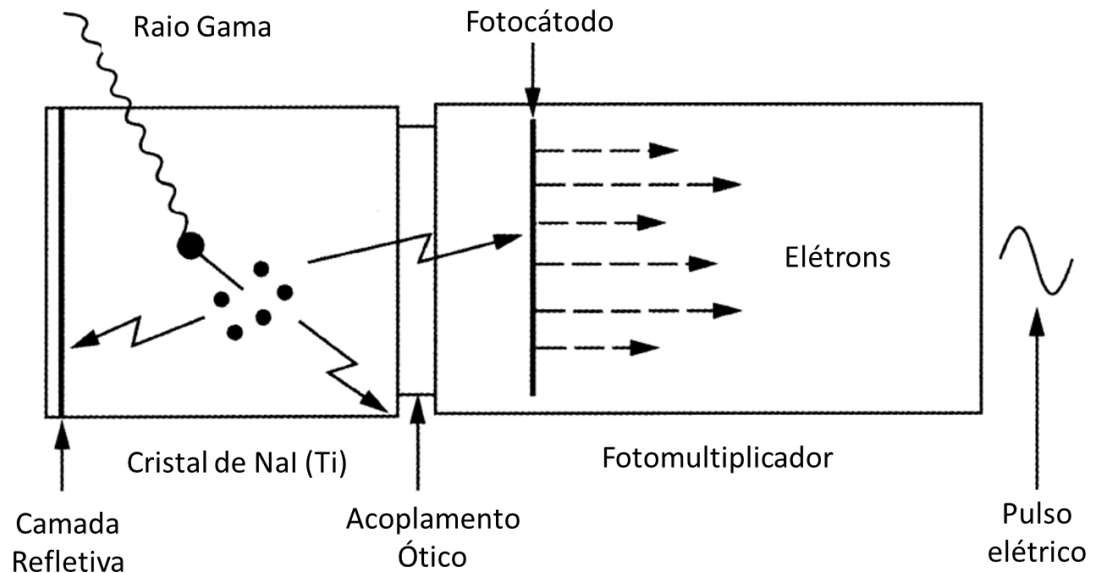


Figura 1.6- Representação esquemática de um cintilômetro (Elis & Singer 2008).

O sensor de radiação gama mede o conteúdo de argila nas proximidades do poço, frações de rochas radioativas distantes a mais não interferem nas medidas dos perfis GN. Isso ocorre devido ao pequeno raio de investigação da sonda, da ordem de 15 a 30 cm (Keys, 1989).

Capítulo 2

Procedimentos de campo

2.1 – Equipamento utilizado

O equipamento utilizado para obtenção dos perfis geofísicos nesse trabalho foi obtido em 2014, no projeto “Perfilagem geofísica em poços de monitoramento ambiental”, processo FAPESP 13/22912-1, coordenado pelo Prof^o. Dr. Carlos Alberto Mendonça, do Departamento de Geofísica do IAG-USP. O equipamento foi fabricado pela a Robertson Geologging/UK(Figura 2.1), sendo composto por uma sonda DUN10290, tripé e roldana com transdutor de profundidade (*encoder*), guincho elétrico (*Mini Winch*), conectados a um registrador *Micrologger II*, gerenciado pelo programa *Winlogger* (versão 1.5).

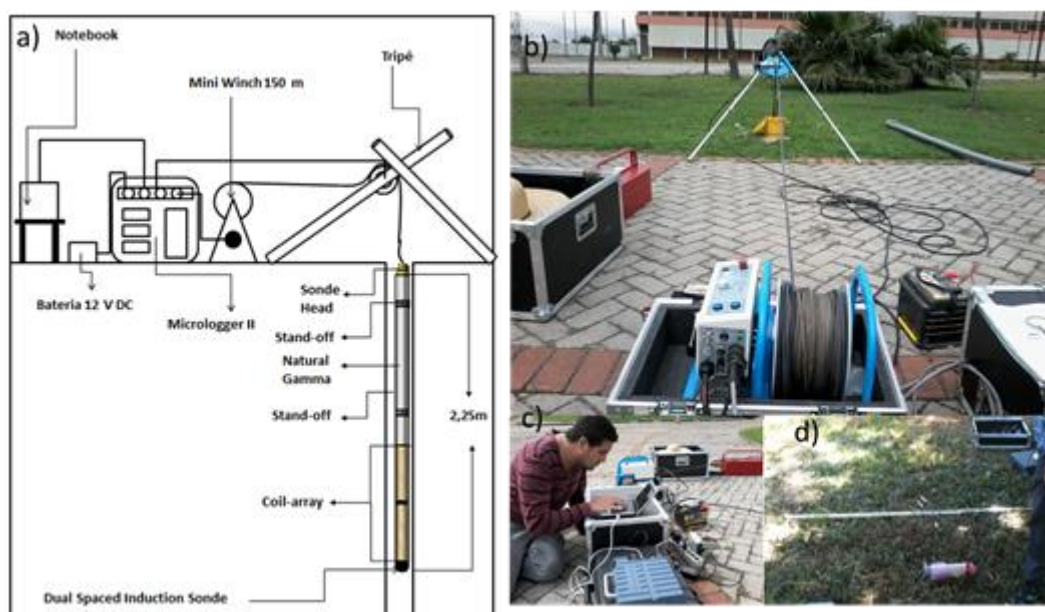


Figura 2.1 – Equipamento de perfilagem geofísica: a) representação esquemática mostrando a sonda DUN10290- *Dual Spaced Induction*- e a posição dos sensores; b) Sistema de perfilagem montado em campo com guincho (primeiro plano) e roldana e tripé (ao fundo); c) Operação do registrador *Micrologger II*; d) Sonda DUN10290. O guincho (modelo *Mini Winch*) tem cabo de 150 m. Elementos adicionais (Baterias 12 V e Notebook).

A sonda DUN10290 possui comprimento de 225 cm, diâmetro de 38 mm, e realiza simultaneamente medidas de condutividade (*Short - ILM e Long - ILD*), de radiação gama natural (perfil GN) e de temperatura. O espaçamento entre cada medida ao longo do poço é de 10 mm. Para as propriedades físicas medidas pela a sonda (condutividade, radiação gama e temperatura) o equipamento fornece duas casas decimais de precisão.

Para as medidas de indução eletromagnética a sonda possui sete bobinas, sendo dois pares de bobinas transmissoras e receptoras, com espaçamento entre as bobinas de 41 cm (16”) para sonda ILM e 163 cm (64”) para a sonda ILD e bobinas adicionais focadas para diminuir contribuição interna do furo. Uma das bobinas transmissoras (ILM) está 47 cm da base sonda e a outra (ILD) situa-se a 80 cm. A sensibilidade da sonda para medidas indução eletromagnética está entre 3-3000 mS.m⁻¹.

O sensor de radiação gama, situado a 35 cm do topo da sonda, é composto por um cintilômetro. O cristal de NaI (iodeto de sódio) ativado por tálio que compõe esse sensor, possui diâmetro de 29 mm e comprimento de 60 mm. Além das bobinas de indução eletromagnética e do sensor de radiação gama a sonda possui um sensor para medidas de temperatura, em °C, que permite medidas na faixa 0-70° C. Esse sensor situa-se na extremidade basal da sonda. Como os poços utilizados nesse trabalho não são profundos (< 80 m) as variações de temperatura medidas são da ordem 1-2° C.

O guicho elétrico (*Mini Winch*) possui um motor de 250 W que permite uma velocidade de aquisição de até 17,5 m.min⁻¹. O controle da velocidade de perfilagem (velocidade em que a sonda desce ou sobe ao longo do poço) é realizada diretamente por controle no guincho. A velocidade é mostrada na tela do programa de aquisição e registrada no arquivo de dados pelo programa de aquisição (*WinLogger*). O *Mini Winch* vem com cabo de 150 m, com revestimento nos primeiros 10 m. Esse revestimento tem como objetivo isolar as interferências do cabo nos sensores que ficam na sonda. Para o funcionamento do guincho é necessário pelo menos uma bateria de 12 V (ou duas em paralelo).

O painel de conexões do guincho (Figura 2.2) é o local onde se conecta os cabos elétricos que fazem a comunicação com a sonda e com o *Micrologger II*. Os elementos que compõem o painel de conexão elétrica do guincho são:

- ✓ *Power* – entradas para a fonte de alimentação de 12 V

- ✓ *Data* – conector de 19 pinos para o registrador (*MicroLogger*); entrada adicional para perfilagem por Videologger é conectado
- ✓ *Encoder* - conector de seis pinos para o codificador de profundidade
- ✓ *Elog Earth* - conexão para eletrodo aterrado para medidas com sonda EL (Short Normal, SP); não utilizada pela sonda DUN10290
- ✓ *Elog* – Interruptor de corrente (utilizado em sondas EL)
- ✓ *Camera System* – conexão de câmera de filmagem (para perfis VideoLogger)



Figura 2.2 – Painel com as conexões elétricas do guincho (*Mini winch 150 m*).

O conjunto roldana e tripé são responsáveis pela sustentação e centralização da sonda no poço e medições de profundidade e velocidade de perfilagem. A roldana possui 400 mm de diâmetro e está fixada uma placa de aço que possui três furos para o ajuste das três hastes do tripé. Um cabo conecta o transdutor de profundidade (*encoder*) com o *MicroLogger*, permitindo que o sistema de aquisição possa ficar distante do tripé. O tripé de sustentação deve ser instalado cuidadosamente para centralizar a sonda e com isso não danificar o cabo de perfilagem. A orientação do *encoder* (se com a face para cima ou para baixo) deve ser

compatível com o programa de aquisição; o programa acusa erro na direção de perfilagem caso o *encoder* for instalado na orientação incorreta.

O registrador (*MicroLogger II*) é responsável por interligar todo o sistema e efetivamente controlar as medidas. A Figura 2.3 mostra as conexões elétricas do *Micrologger* com as outras partes do equipamento, no caso computador (software de aquisição) e guincho. Para o seu funcionamento é necessária uma fonte de alimentação de 12 V. Ou seja: é recomendável utilizar duas baterias, uma para o guincho, outra para o *Micrologger*.



Figura 2.3- Registrador *Micrologger II* e suas conexões elétricas.

2.1- Programa de aquisição de dados

O programa de aquisição de dados - *Winlogger* (versão 1.5) - foi desenvolvido pela Robertson Geologging e acompanha o equipamento. Esse programa permite a utilização de vários tipos de sonda, apenas introduzindo o arquivo de calibração correspondente à sonda a ser utilizada. Observe que sondas de um mesmo modelo podem ter arquivos de calibração diferentes. O controle das operações de perfilagem (exceto a velocidade da sonda) é realizado em tempo real pelo *Winlogger* por meio de interface mostrada na Figura 2.4.

Antes de começar a perfilagem o programa solicita informações sobre o modelo do guincho, a profundidade inicial das medidas, a direção da corrida (se subida ou descida), o tipo de medida a ser realizada (se em função do tempo ou da profundidade). O programa solicita informações sobre a sonda a ser utilizada e seu arquivo de calibração. No modo de função em profundidade (modo de aquisição nos procedimentos de perfilagem), o registro das

medidas é realizado em função da profundidade, em intervalos designados pelo operador. O arquivo de dados é salvo no disco rígido do computador após a sonda percorrer toda a extensão do poço, na subida ou descida. Durante o registro do arquivo a operação de perfilagem é interrompida, enquanto o operador efetua o registro do arquivo. O arquivo de dados pode ser salvo em formatos específicos do Winlogger (.HED e .LOG) ou no formato LAS (Log Ascii Standard), atualmente utilizado como padrão por empresas e instituições acadêmicas.

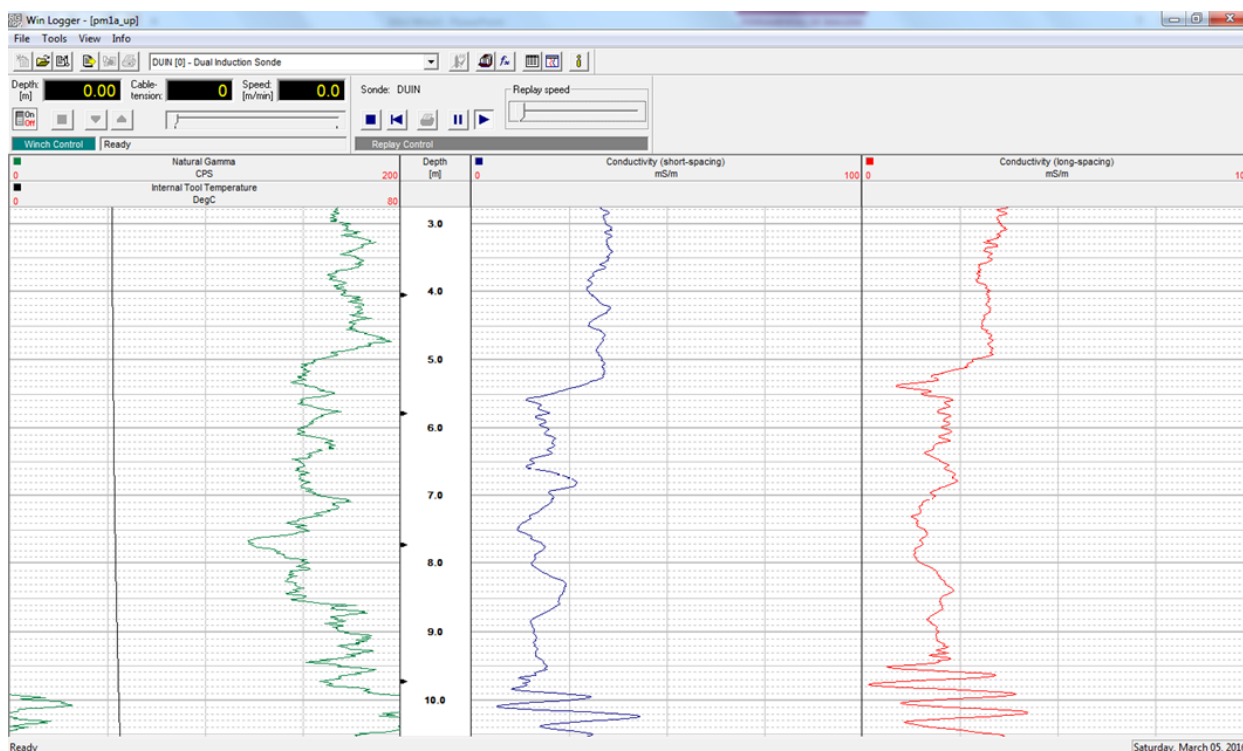


Figura 2.4 – Interface gráfica do programa *Winlogger 1.5*. A parte superior da interface possui campos para assinalar modelos de guincho e sonda bem como seu arquivo de calibração. A interface mostra em tempo real a tensão de alimentação, a profundidade da sonda, a velocidade de perfilagem e os parâmetros medidos pela sonda (gráficos).

Inicialmente através da janela de controle são realizados testes de conectividade para verificar se a sonda está funcionando corretamente. O primeiro teste consiste em verificar a tensão de alimentação que deve estar entre valores recomendáveis. No caso da DUN10290, a tensão e corrente de funcionamento são respectivamente 90V e 48 mA (Figura 2.5 a). O segundo teste *-sonde utility test-* serve para verificar se as seis entradas do *encoder* estão

funcionando corretamente (Figura 2.5 b). O último teste - *test cable IF* – verifica o sinal advindo do cabo. A Figura 2.5 ilustra as operações descritas acima.

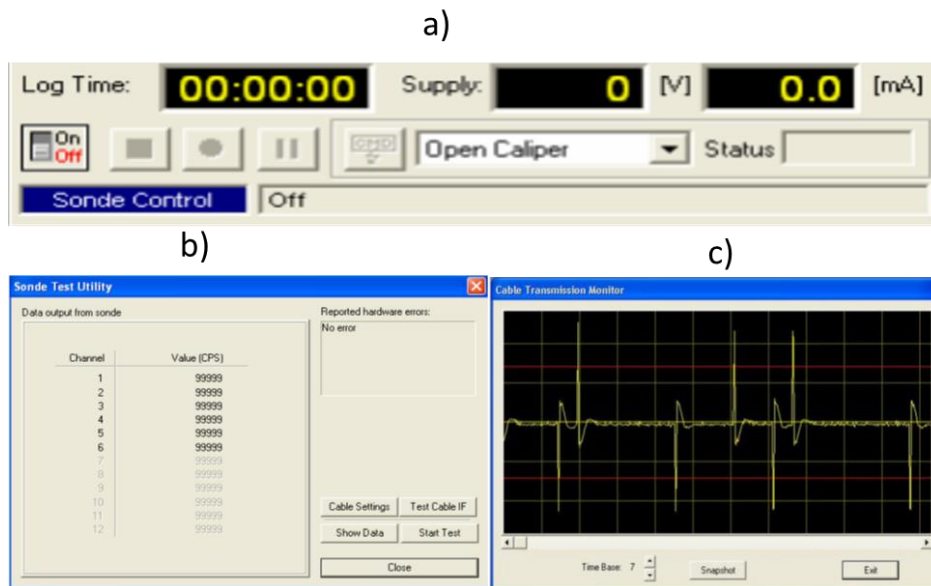


Figura 2.5 – Teste de conectividade no *Winlogger* antes do início da perfilagem; a) teste de tensão e corrente após ligar a sonda. b) *utility test sonde*. c) teste do sinal advindo do cabo (*test Cable IF*).

Tendo passado pelos testes de conectividade, os seguintes parâmetros devem ser definidos: modelo de medida (se em tempo ou profundidade), sentido da perfilagem (subida ou descida), profundidade inicial, sistema de medida (metros ou pés) e a seleção do arquivo de calibração da sonda (Figura 2.6). Durante as medidas é possível visualizar a profundidade da sonda e a velocidade da mesma no poço (Figura 2.7), porém o controle da velocidade é feito no guincho.

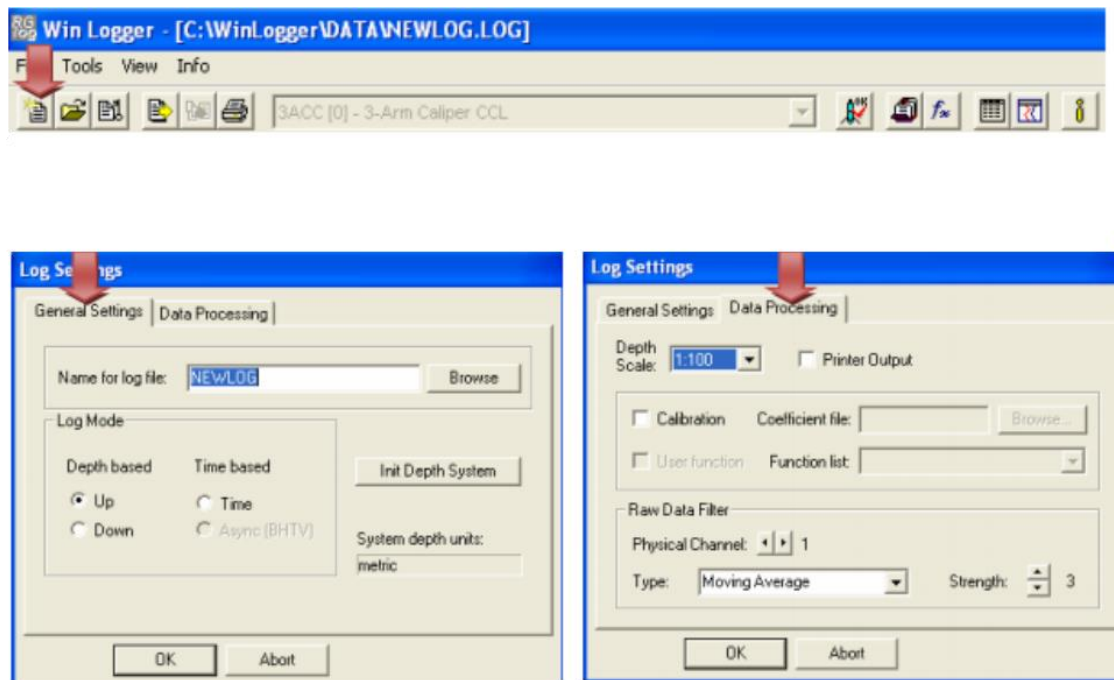


Figura 2.6 – Seleção dos parâmetros de aquisição no *Winlogger*.



Figura 2.7 – Parâmetros de aquisição em tempo real: profundidade, velocidade, tempo de aquisição, parâmetros de alimentação (tensão e corrente).

2.3- Calibração da Sonda IL

O programa Winlogger tem opção para determinar o arquivo de calibração de sondas IL, a sonda DUN10290 em particular. A recalibração da sonda é necessária, pois o arquivo fornecido pelo fabricante deixa de ser representativo com o uso continuado da sonda. Quando não devidamente calibrada a sonda fornece medidas oscilantes (ruidosas) em leituras repetidas.

Para calibrar a sonda é necessário utilizar uma bobina de calibração (espira com área e número de voltas conhecido), que é fornecida pelo o fabricante (Figura 2.8). Seleciona-se

então o modo de “medida em tempo” no programa de aquisição e posteriormente passa-se a bobina ao longo da sonda. Quando a bobina aproxima-se de um dos sensores da sonda IL observa-se um máximo na resposta da sonda. Após essa etapa realiza-se uma nova medida de calibração, agora acoplar a bobina de calibração na sonda. Essa medida serve para definir a correção de acoplamento direto das bobinas, importante para determinação do patamar de zero nas medidas de condutividade. Se não corrigida deste fator, a sonda fornece condutividade negativa quando imersa em um meio isolante (o ar, por exemplo). Essa medida é feita tanto para o sensor ILM quanto para o ILD, o valor máximo da condutividade para o sensor ILM é de 1650 mS.m^{-1} , enquanto que para o sensor ILD esse valor é 3300 mS.m^{-1} .

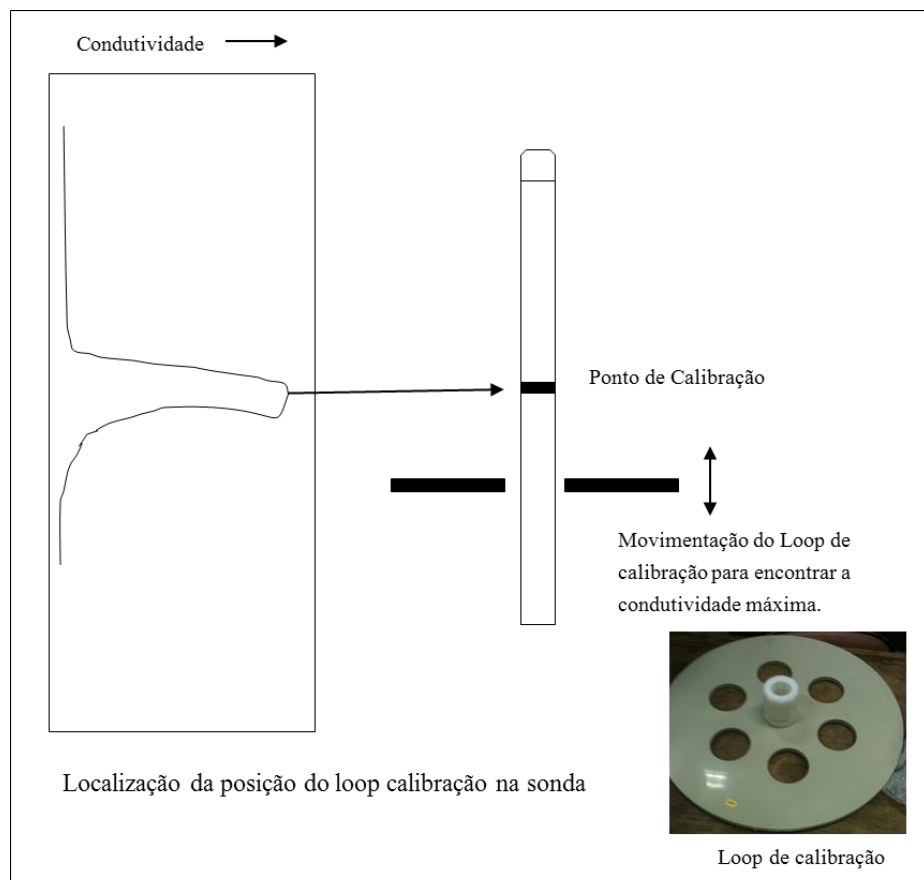


Figura 2.8 – Esquema de calibração para a sonda IL.

2.4 –Aquisição de Dados

A aquisição de perfis geofísicos envolve procedimentos básicos que devem ser realizados visando a segurança das operações e a qualidade das medidas. Testes de estabilidade do tripé e guincho são importantes para evitar quedas durante as operações de descida e subida da sonda. Em alguns casos é necessário ancorar o guincho (peso extra ou pinos de fixação) para evitar seu tombamento em resposta à tração aplicada pela sonda. Deve-se verificar o alinhamento da roldana e centralização da sonda para evitar que o cabo de perfilagem sofra atrito com a parede do poço.

A medição de perfis geofísicos com as sondas IL e GN 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. A Figura 2.9, por exemplo, mostra perfis repetidos, obtidos durante a descida e a subida da sonda. Na descida, o topo do solo é utilizado como referência de profundidade. Na subida, entretanto, conforme instruções do programa de aquisição, a referência fica na base do poço. Para comparar os dois resultados soma-se do perfil de descida o tamanho correspondente à sonda (2,25 m para a sonda DUN10290).

Essa mudança de referência é compensada pelo programa de aquisição, não afetando a análise das medidas obtidas em operações distintas, porém 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 (Figura 2.10). Um recobrimento diferente ocorre com as sondas ILD e ILM. Devido ao posicionamento dos sensores, o perfil GN tem maior recobrimento na descida (Figura 2.10) e os de indução na subida (Figura 2.11). Para os perfis GN recomenda-se, assim, utilizar os dados obtidos na descida, enquanto que nos perfis de indução os dados obtidos na subida. Essa configuração fornece a maior cobertura para cada um dos perfis.

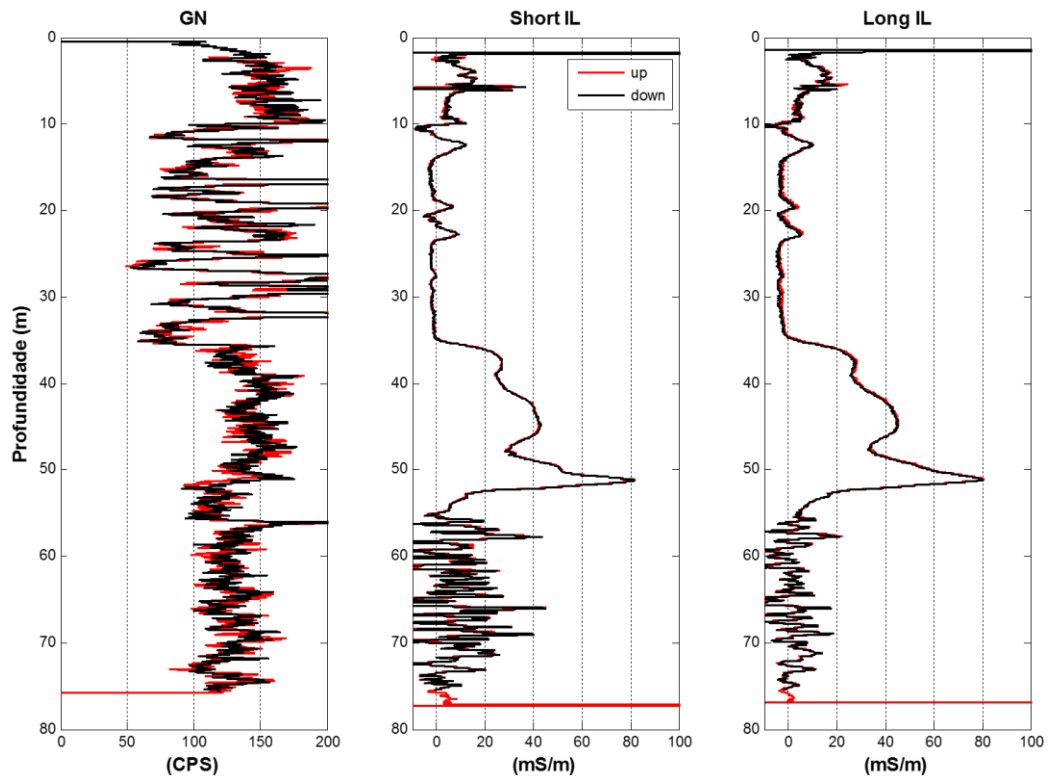
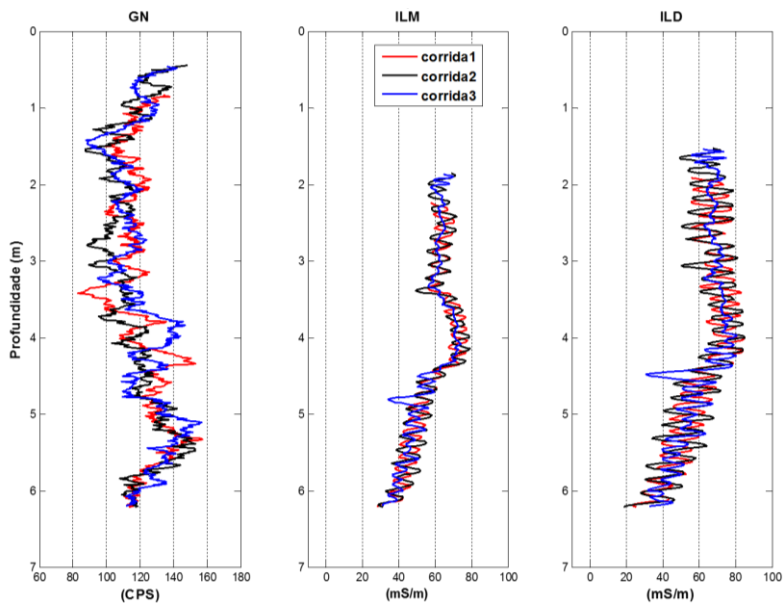
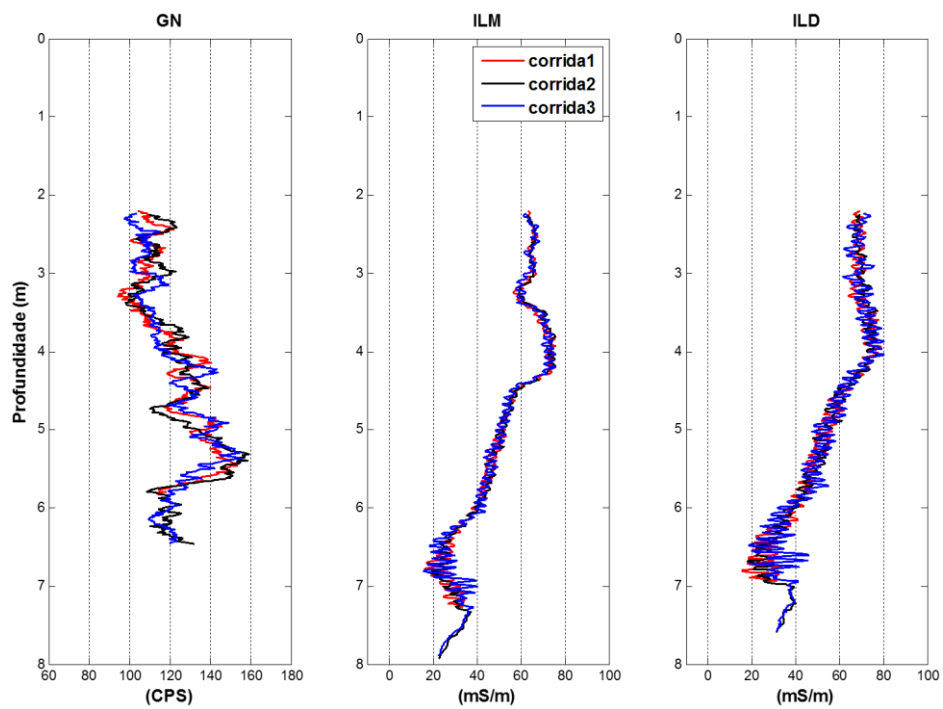


Figura 2.9 – Repetição de perfis geofísicos em operações de descida e subida da sonda. Perfis GN, ILM, ILD. Teste de campo no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG-USP.



Figuras 2.10 – Perfis repetidos (GN, ILM, ILD) em operações de descida da sonda (poço em área de teste na EACH-USP).



Figuras 2.11 – Perfis repetidos (GN, ILM, ILD) em operações de subida da sonda (poço em área de teste na EACH-USP).

Capítulo 3

Perfilagem em poços tubulares

Poços tubulares, popularmente conhecidos por “poços artesianos” ou “semi-artesianos”, são instalados para a captação de água subterrânea e secundariamente para determinar parâmetros físicos do aquífero como, por exemplo, nível estático (NE), nível dinâmico, vazão e rebaixamento. Os dados de perfuração, perfis litológicos em especial, fornecem informações sobre a geologia da área, sendo, em muitos casos, a única fonte de informação geológica detalhada para um determinado local. Existem três tipos de poços tubulares, cuja classificação leva em consideração as características geológicas do local de perfuração, com especificações para rochas cristalinas, sedimentares (consolidadas ou não) e terrenos com litologia mista (Figura 3.1). A construção de um poço tubular requer licença do DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) e as normas construtivas são definidas pela NBR-12244 (ABNT, 1992).

Os poços tubulares em rochas cristalinas, geralmente, não possuem revestimento, pois a entrada da água subterrânea no poço se dá por fraturas existentes no meio. Poços tubulares em rochas sedimentares ou inconsolidadas, por outro lado, apresentam revestimento com tubos metálicos ou geomecânicos, para evitar o colapso das paredes do poço. Esses poços possuem uma zona de filtragem, composta por filtro e pré-filtro. O pré-filtro é o espaço entre o tubo e meio perfurado, geralmente preenchido por cascalho quartzoso fino. O filtro é composto por um tubo ranhurado, cujas finalidades são: permitir que a água entre no poço sem perda excessiva carga, impedir a passagem de material fino durante o bombeamento e servir como suporte estrutural (CPRM, 1988). Os poços tubulares mistos apresentam revestimento no intervalo com rochas sedimentares e não possuem revestimento (condição de “poço aberto”) na parte cristalina. Outra situação em que os poços com revestimento parcial são utilizados é quando existem riscos de contaminação a partir das unidades de cobertura. Nesse caso o revestimento é utilizado para evitar que a contaminação superficial atinja níveis mais profundos do aquífero.

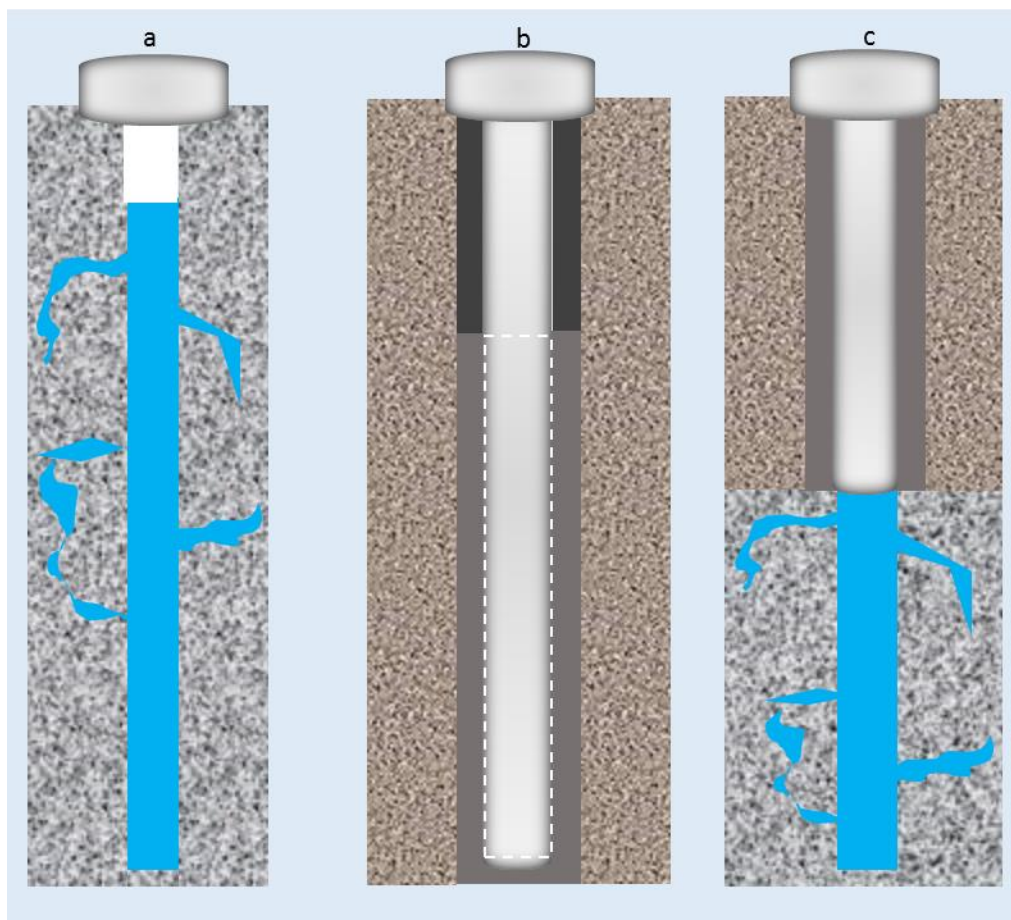


Figura 3.1 – Tipos de poços tubulares. a) Poço tubular em rochas cristalinas. b) Poço tubular em rochas sedimentares, ou inconsolidadas. Aspectos construtivos deste tipo de poço: revestimento (cinza claro), pré-filtro (cinza) e filtro (linha branca pontilhada). c) Poços tubulares mistos, com revestimento (cinza claro) e preenchimento do poço (cinza). Figura sem escala. Modificado de http://www.abas.org/educacao_pocos.php, acessado em 28/01/2016.

A perfilagem em poços tubulares apresenta características únicas, pois métodos de perfilagem para poço aberto (elétricos, acústicos, cáliper, etc) têm seu uso limitado. No caso de poços tubulares mistos, a aplicação desses perfis fica limitada à parte não revestida do poço. Como o revestimento impede o contato direto da sonda com as unidades atravessadas pelo poço, um número reduzido de sondas são aplicáveis nessas condições. Basicamente são utilizadas sondas de condutividade elétrica baseadas no princípio da indução eletromagnética (IL- *induction log*) e sondas que medem a radiação gama (GN – *Natural Gamma Ray*), naturalmente emitida pelas unidades geológicas.

Dentro desse contexto mostramos nesse Capítulo que as sondas IL e GN, são aplicáveis em poços de tubulares com revestimento parcial, com boa repetição tanto na parte revestida quanto na parte aberta do poço. Os perfis IL e GN apresentados nesse Capítulo foram obtidos em dois poços tubulares mistos situados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SGCR) do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP). Foram realizados testes comparativos entre perfis elétricos (EL – *Electrical Log*) e GN obtidos em poço aberto pelo o IPT - Instituto de Pesquisa Tecnológicas - ainda quando da perfuração dos poços, com os perfis IL e GN nas condições atuais de revestimento parcial. Mostramos também a viabilidade de se utilizar perfis IL e GN em poços revestidos para correlacionar estratos sedimentares atravessados por poços vizinhos.

3.1- Descrição dos poços e área teste

A área de estudo foi instalada em 1997, no projeto “Investigações Geofísicas de Superfície e de Poço na borda da Bacia da São Paulo”, processo FAPESP 99/12215-2, coordenado pelo Prof^o. Dr. Jorge Luís Porsani, do Departamento de Geofísica do IAG-USP. Esse projeto montou o SCGR (Sítio Controlado de Geofísica Rasa) que funciona como laboratório para pesquisas e aulas práticas do curso de Geofísica. Diversos levantamentos de superfície foram realizados para descrever os sedimentos e a topografia do embasamento cristalino (Borges 2002; Borges & Porsani, 2003; Porsani, et., al 2004). Alguns dos métodos (métodos elétricos e eletromagnéticos) utilizados antes da perfuração mostraram ambiguidade na caracterização das unidades geológicas e a utilização de poços teve como objetivo complementar a interpretação até então obtida. Foram instalados três poços tubulares com 4” de diâmetro e 80 m de profundidade, com testemunhagem completa na parte cristalina e descrição de amostras de calha na parte sedimentar. Posteriormente à perfuração foram realizadas perfilagens de poço aberto com as sondas EL e GN, pelo o IPT. Os perfis nos poços adjacentes foram correlacionados permitindo inferir a continuidade lateral das camadas sedimentares e a topografia do topo rochoso. O modelo geológico assim obtido serviu como base para analisar os resultados dos levantamentos em superfície e, com isso, resolver ambiguidades identificadas nos ensaios de superfície (Porsani, et., al 2004).

Os poços do SCGR foram revestidos na parte sedimentar com tubos geomecânicos, porém mantidos na condição de poço aberto no embasamento cristalino, caracterizando assim

poços tubulares mistos. Atualmente, apenas um dos poços encontra-se sem obstrução até a profundidade original, como tal, adequado à perfilagem. Um dos poços foi obstruído por colapso abaixo da parte revestida, sendo possível realizar medidas na parte revestida e na porção superior do cristalino, até 61 m de profundidade. O outro poço foi obstruído por vandalismo (descarte de material desconhecido). O poço com obstrução parcial é denominado nesse trabalho de “Poço 1”, e o poço sem obstrução de “Poço 2”. Estes poços estão separados por 15 m de distância.

O SCGR situa-se na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo que no local apresenta predominância de sedimentos argilo-arenosos das Formações Resende e São Paulo, sobrepostas ao embasamento cristalino composto augen-gnaisses de idade pré-cambriana (Ricomini, 1989). As informações litológicas a partir dos poços mostram inicialmente uma camada de aterro argilo-arenosa predominantemente escura, por vezes com matéria orgânica, com espessura variável entre 4,5 e 6 m. As unidades sedimentares da Formação Resende possuem dois níveis. O superior é constituído por intercalações de argila siltosa com areias de granulação média a grossa, com espessura variando entre 11 a 14,5 m. O inferior é constituído por unidades arenosas sobrepostas a um horizonte argiloso, com espessura entre 29 e 32 m, sendo que a camada arenosa possui 18 m de espessura e a camada argilosa 13 m de espessura. O embasamento cristalino é composto por augen-gnaisses com cristais de feldspato. A parte superior do embasamento apresenta estágios mais avançados de alteração antes de atingir a “rocha sã” a 54-55 m de profundidade, conforme descrição dos testemunhos.

3.2- Dados de perfilagem

A aquisição de dados pelo IPT foi realizada em duas etapas, inicialmente na parte sedimentar e, posteriormente, na parte cristalina depois que a parte sedimentar foi revestida. Os perfis EL possuem medidas a cada 1cm, nos modos de Normal Curta (16”) e Normal Longa (64”). As medidas na parte sedimentar foram realizadas até a profundidade de 45 m, exceto no Poço 1, onde atingiu aproximadamente 50 m. As medidas no embasamento foram realizadas a partir de 53 m.

No presente trabalho foram realizadas seis “corridas” com as sondas IL e GN, cinco delas no Poço 2. Como “corrida” entendemos a aquisição de um perfil ao longo de toda a extensão do poço, tanto na subida quanto na descida da sonda. As medidas foram

classificadas como: medidas de aprendizagem, testes de calibração e testes de repetição. As medidas de aprendizagem serviram para familiarização com a operação do equipamento e identificação de problemas de aquisição. Um problema identificado nessa etapa foram ruídos de alta frequência nas medidas com a sonda IL, então atribuídos ao motor do guincho. Entramos em contato com o fabricante que recomendou re-calibrar a sonda, resolvendo o problema. Os testes de repetição (três corridas) resultaram nos dados apresentados nesse Capítulo. Inicialmente os testes foram realizados para verificar a concordância entre os dados obtidos na subida e na descida da sonda, tanto no Poço 2 (inicialmente) quanto depois no Poço 1 (uma corrida). Testes de repetição, conhecidos nas companhias de perfilagem como “perfis repetidos”, servem para verificar a consistência dos resultados e integridade do equipamento. Basicamente os testes de repetição incorporam a idéia que seria muito improvável obter um perfil repetido caso o sistema de perfilagem não estivesse funcionando adequadamente. Na prática, apenas um trecho do poço (normalmente a critério do cliente) é utilizado no teste. No presente estudo repetimos integralmente as corridas. Para os poços do SCGR, a obtenção do perfil de poço levou em média 2h e 30 min de trabalho, incluindo a montagem e desmontagem do equipamento, com tempo médio da corrida (subida e descida) de 1h e 30 min.

3.3- Resultados Obtidos

Apresentamos os resultados obtidos no SCGR, no Poço 2 em especial, abordando duas situações diferentes. Na primeira comparamos perfis EL e GN, realizados pelo IPT antes do revestimento da parte sedimentar do poço, com os perfis IL e GN obtidos no presente trabalho, após o revestimento. Na segunda situação comparamos os resultados obtidos na parte sem revestimento, utilizando perfis EL obtidos pelo IPT e perfis IL obtidos no presente trabalho.

3.3.1- Perfilagem na seção revestida

A Figura 3.1 mostra a descrição litológica e os perfis geofísicos obtidos na parte atualmente revestida do poço. Os perfis GN mostram variações médias nas contagens de radiação gama entre 100 e 200 CPS com alguns picos de radiação gama, observados em ambos os perfis, que podem chegar a 500 CPS. Comparando os perfis obtidos nesse trabalho e

com o obtido antes do poço ser revestido percebemos que as respostas nos perfis são semelhantes, assinalando as mesmas variações de litologia. Ocorre, entretanto um deslocamento da ordem 40 CPS nos perfis GN, provavelmente devido ao fato das sondagens terem sido feitas com equipamentos diferentes em termos de sensibilidade e calibração.

O perfil de condutividade ILM mostra variações de condutividade desde valores praticamente nulos até 80 mS.m^{-1} . No caso do perfil ILD as condutividades apresentam um deslocamento de 20 mS.m^{-1} em relação ao perfil ILM. Esse deslocamento decorre de uma correção aplicada aos dados por conta das baixas condutividades apresentadas nos intervalos muito resistivos do poço. Nestes intervalos a condutividade fica abaixo da faixa de operação do equipamento (de 3 a 3000 mS.m^{-1}), chegando a assumir valores negativos (sem significado) de condutividade. Para corrigir esse efeito atribuímos os valores resistividade do perfil EL para a parte negativa do perfil de condutividade. O valor médio de resistividade na parte que perfil IL apresentava esse efeito foi de 700 ohm.m ($1,4 \text{ mS.m}^{-1}$). A fórmula de correção foi $\sigma(h) = \sigma_0(h) - \sigma_{\text{med}} + 1,4$, sendo $\sigma_{\text{med}} = -3,0 \text{ mS.m}^{-1}$ o valor médio no intervalo de 24 a 35 m do perfil ILM. Os perfis IL foram convertidos de condutividade em mS.m^{-1} para resistividade em ohm.m , utilizando a relação: $\sigma = 1000\rho^{-1}$.

A comparação dos perfis de resistividade obtidos a partir da conversão dos perfis IL com os perfis de EL (Figuras 3.1c e 3.1d) mostram curvas de resistividades com respostas parecidas, porém valores diferentes. Os valores dos perfis IL convertidos para resistividade variam de 10 ohm.m a pouco mais de 500 ohm.m , enquanto que nos perfis EL essa variação ocorre entre 25 ohm.m e 700 ohm.m .

Apesar dos perfis IL não recuperarem os valores de resistividade observados nos perfis EL, especialmente nos pacotes mais resistivos (0 a 35 m de profundidade), as variações com a profundidade são preservadas. Isso significa que os perfis IL identificam os pacotes arenosos mais resistivos, mas não determinam efetivamente seus valores de resistividade. Nas camadas com resistividade mais baixa (de 35 a 55 m de profundidade) os perfis IL praticamente não apresentam modulação por ruídos. Nesse intervalo, entretanto, os perfis EL apresentam valores muito oscilantes. O perfil EL torna-se ruidoso em frente da camada condutiva porque a fonte de corrente empregada pela sonda não é ajustável. Isso faz com que a resposta do sinal, na forma de um potencial elétrico, fique praticamente no limiar de ruído. Os perfis EL são, assim, mais efetivos em camadas resistivas, ao contrário dos perfis IL mais

efetivos em camadas condutivas (baixa resistividade). É importante ressaltar que a mesma sonda pode ter respostas distintas ao longo de um mesmo perfil, dependendo de sua faixa de operação e das propriedades do meio.

A comparação dos resultados com as sondas IL e EL mostra que seus perfis percebem as mesmas variações de litologia, mostrando que os perfis obtidos após o revestimento do poço não prejudicaram a identificação das camadas. Consideramos este resultado importante, pois mostra que poços nessas condições podem ser utilizados em estudos geológicos.

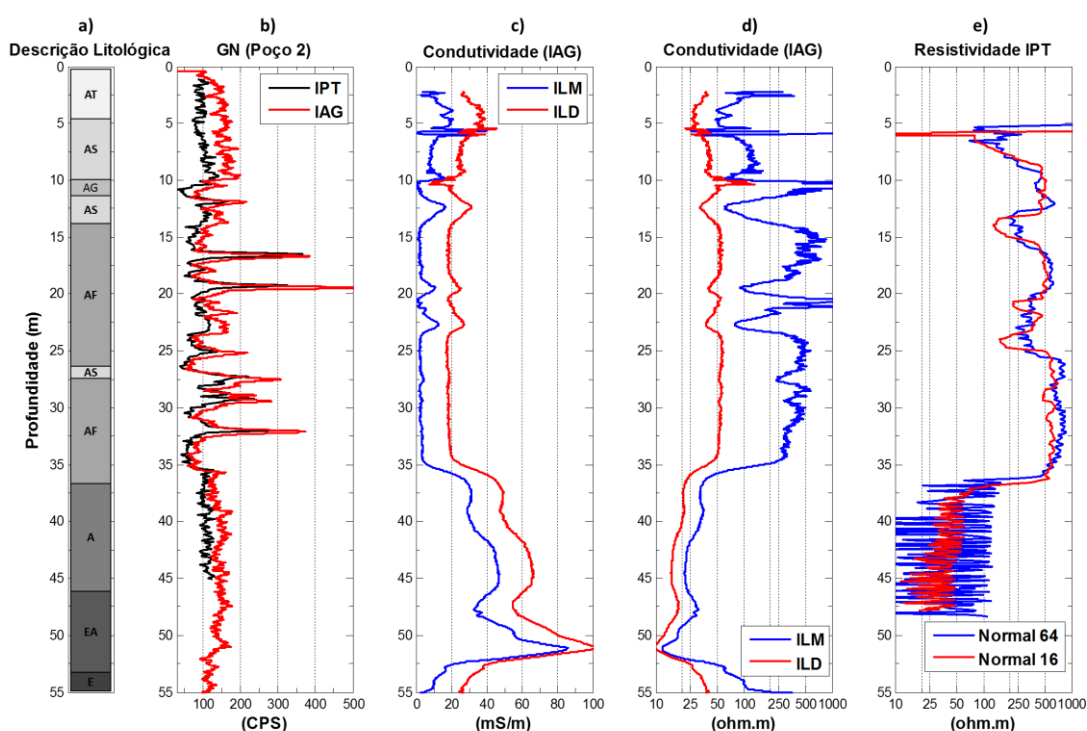


Figura 3.1 – Perfis Geofísicos na parte revestida do Poço 2. a) Perfil Litológico composto por: aterro argilo-arenoso (AT), argila siltosa (AS), areia grossa (AG), areia fina (AF), argilito siltoso com areia fina (A), granito-gnaiss alterado (EA), granito-gnaiss inalterado (E). Adaptado de Borges & Porsani (2003). b) Perfis GN realizados pelo IPT (preto) e nesse trabalho (vermelho). c) Perfis de condutividade ILM e ILD. d) Condutividade ILM e ILD convertida em resistividade. e) Perfis de resistividade EL obtidos pelo IPT. Os perfis EL e GN obtidos pelo IPT foram obtidos antes do poço ser revestido.

3.3.2- Perfilagem em poço aberto

A Figura 3.2 mostra os perfis IL, GN e EL obtidos na parte aberta do poço (abaixo de 54 m). Os perfis GN apresentam o mesmo deslocamento entre as curvas da ordem de 40 CPS apresentados na porção revestida. As respostas nos perfis IL e EL, entretanto, são substancialmente diferentes. Os perfis EL apresentam variações de resistividade entre 1000 e 3000 ohm.m, enquanto nos perfis IL essas variações apresentam incursões negativas e positivas com amplitude aproximada de até 40 mS.m⁻¹. Esses picos de condutividade se repetem de forma sistemática nos perfis ILM e ILD, conforme mostra a Figura 3.3. Por passarem no teste de repetição, fica evidente que as respostas obtidas nos perfis IL (Figuras 3.2 e 3.3) não podem ser consideradas como decorrente de ruídos, tais como os observados em unidades muito resistivas, nas quais o sinal de indução é muito baixo. Como mostra a Figura 3.3 a repetição das medidas é praticamente perfeita. Consideramos, então, a possibilidade desse padrão de resposta da sonda IL constituir uma assinatura do embasamento cristalino, se não em geral pelo menos para o local de estudo. O efeito de negativos e positivos, por exemplo, é compatível com o obtido por sondas de indução quando na presença de condutores laminares. Uma possibilidade é que fraturas existentes no meio estejam se comportando como condutores laminares. Como a resposta eletromagnética de lâminas finas depende da condutância da lâmina (produto da espessura pela condutividade elétrica), o problema em representar uma fratura por este modelo é que sua condutividade deveria ser muito elevada, o que não acontece. Seja como for, um perfeito entendimento desse tipo de resposta no embasamento deve ser objeto de estudos futuros.

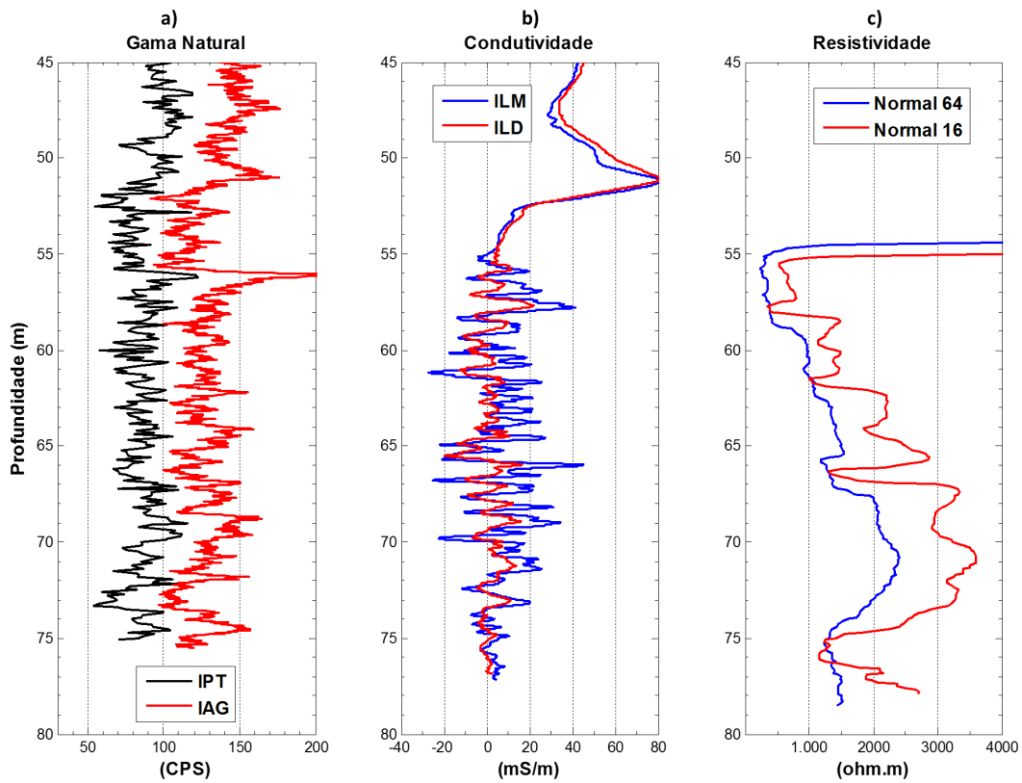


Figura 3.2– Perfis Geofísicos no poço aberto (Poço 2). A) Perfil GN, em CPS. Medidas realizadas pelo IPT (preto) antes do revestimento do poço e medidas realizadas nesse trabalho (vermelho). B) Perfil IL, em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. Medidas com a sonda ILM (azul) e Medidas com a sonda ILD (vermelho). C) Perfis de Resistividade obtidos pelo IPT, em ohm. Resistividade Normal 64 (azul) e Resistividade Normal 16 (vermelho).

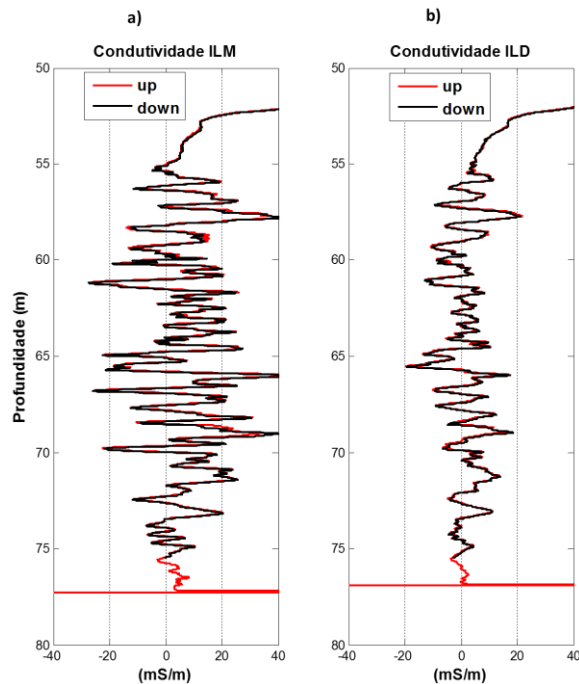


Figura 3.3- Corridas na parte revestida do Poço 2. a) Perfil ILM, medidas na subida (vermelho) e descida (preto). b) Perfil ILD na subida (vermelho) e descida (preto). Notar valores praticamente coincidentes na subida e na descida, o que descarta a possibilidade das oscilações serem associadas a erros instrumentais ou interferências.

3.4 – Discussão dos resultados

A análise dos perfis geofísicos nas partes revestida e aberta dos poços mostra que os perfis IL e GN percebem variações de litologia em ambas as partes dos poços, sem perda expressiva de informação geológica. Nosso objetivo nessa seção é ilustrar que essas características permitem utilizar os perfis geofísicos em poços tubulares para inferir variações geológicas que dificilmente poderiam ser obtidas apenas com os dados de perfuração. Nosso ponto de partida é considerar os resultados na Figura 3.4 com a identificação de níveis característicos, denominados de Z1 a Z6 nos dois poços. A porção acima de Z1 apresenta condutividades da ordem de 20 mS.m^{-1} e contagens de radiação gama da ordem de 150 CPS. O intervalo entre Z1 e Z2 apresenta condutividade baixa e radiação gama praticamente constante ($\sim 150 \text{ CPS}$), atributos que são compatíveis com sedimentos arenosos. O intervalo entre Z2 e Z3 apresenta dois picos de radiação gama com máximo de 500 CPS, com condutividades em geral baixas com valores mais elevados ($\sim 30 \text{ mS.m}^{-1}$) em níveis

localizados. Nota-se que o aumento de condutividade não coincide com o aumento de radiação gama, não se tratando assim de unidades compostas por argilitos. Esse padrão de resposta é observado de forma mais evidente no intervalo entre Z3 e Z4, embora com condutividade ainda menor e contagens GN acima de 300 CPS. Utilizando a descrição litológica do Poço 2 (Figura 3.1) nota-se que as porções mais radioativas estão associadas a arenitos de composição fina a média da Formação Resende. Arenitos com esse padrão de resposta são descritos em outros locais da Bacia de São Paulo (Neri & Macari, 2014; Silva, 1999) e também em arenitos da Formação Resende da Bacia de Taubaté (Souza Filho, 2013). Tais arenitos “radioativos” ocupam a porção superior dos sedimentos neogênicos da Bacia de São Paulo, e apresentam um tipo de assinatura geofísica que parece ser bem regular na bacia.

No intervalo entre Z4 e Z5 observa-se um aumento de condutividade, com valores de atingindo 110 mS.m^{-1} no Poço 1 e 80 mS.m^{-1} no Poço 2. Embora os valores de condutividade não se repitam nos dois poços, a variação da condutividade com a profundidade segue um mesmo padrão, permitindo a correlação. A condutividade alta neste intervalo é causada por uma espessa camada de argilito. Os perfis GN não apresentam variações expressivas, com contagens permanecendo na casa dos 150 CPS. Curiosamente, essa camada de argilito apresenta baixos níveis de radiação gama. O intervalo entre Z5-Z6 apresenta uma diminuição da condutividade associada a uma leve, porém perceptível, diminuição nos valores da radiação gama. O topo do embasamento cristalino está na profundidade Z6.

Os marcadores Z1 a Z6, por serem identificados nos dois poços permitem inferir a continuidade lateral das unidades (Figura 3.5) e estabelecer a seguinte correspondência com unidades antropogênicas e geológicas: aterro argilo-arenoso (Z1), sedimentos quaternários (Z1-Z2), arenito superior (Z2-Z3), arenito inferior (Z3-Z4), argilito (Z4-Z5), embasamento alterado (Z5-Z6) e embasamento (Z6).

Deve-se destacar que o modelo geológico obtido a partir dos perfis geofísicos define com clareza os limites entre as principais unidades que compõem o pacote sedimentar, reconhecendo transições abruptas e suaves entre as unidades que, no geral, permitem a correlação entre os poços.

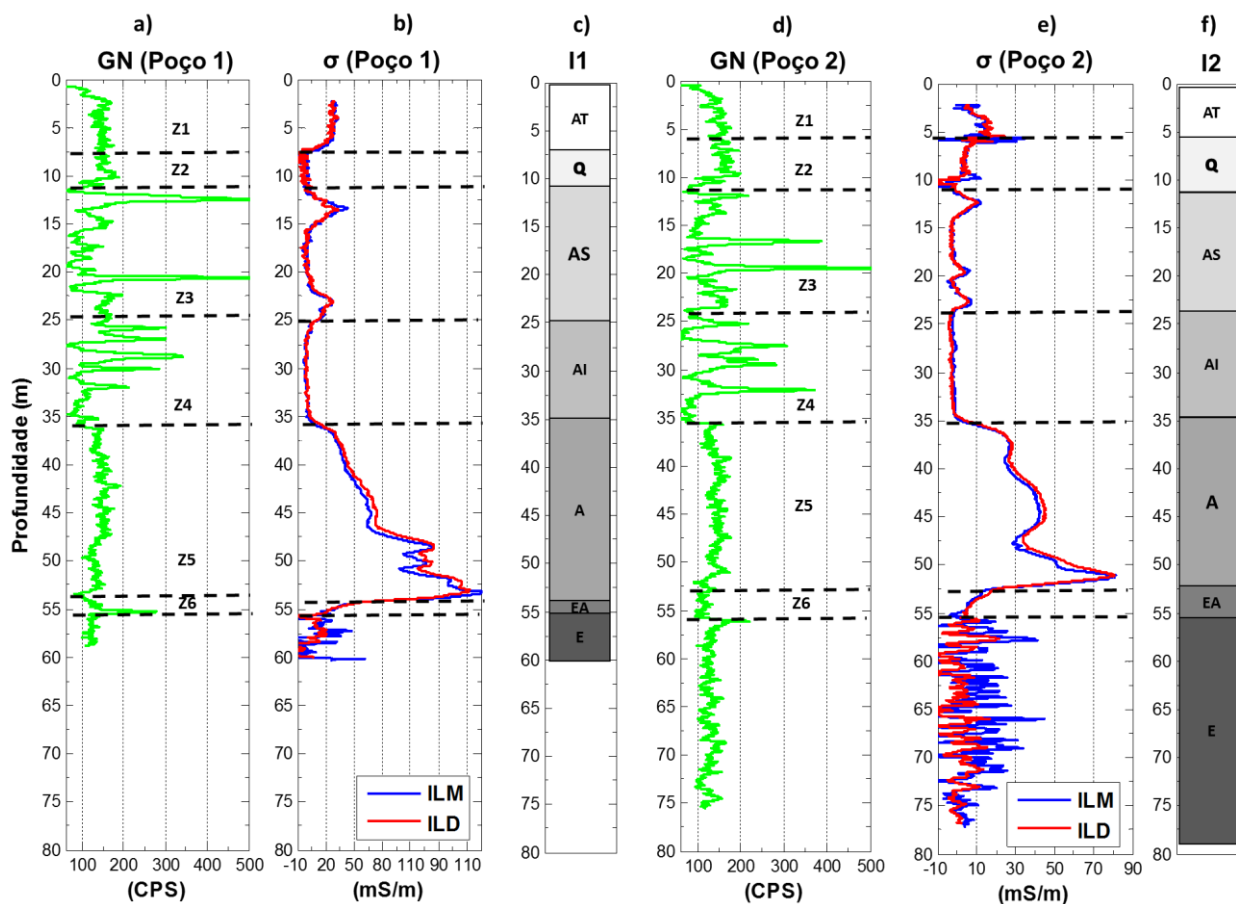


Figura 3.4 – Interpretação litológica a partir de perfis geofísicos. a) Perfil GN (Poço 1), em CPS. b) Perfil IL (Poço 1), em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. c) Interpretação litológica a partir de perfis geofísicos (Poço 1). Onde os horizontes determinados são dados por: aterro (A), sedimentos quaternários (Q), Arenito Superior (AS), Arenito Inferior (AI), Argilito (A), embasamento alterado (EA), embasamento (E). d) Perfil GN (Poço 2), em CPS. e) Perfil IL (Poço 2), em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. c) Interpretação litológica a partir de perfis geofísicos (Poço 1). Onde os horizontes determinados são dados por: aterro (A), sedimentos quaternários (Q), Arenito Superior (AS), Arenito Inferior (AI), Argilito (A), embasamento alterado (EA), embasamento (E).

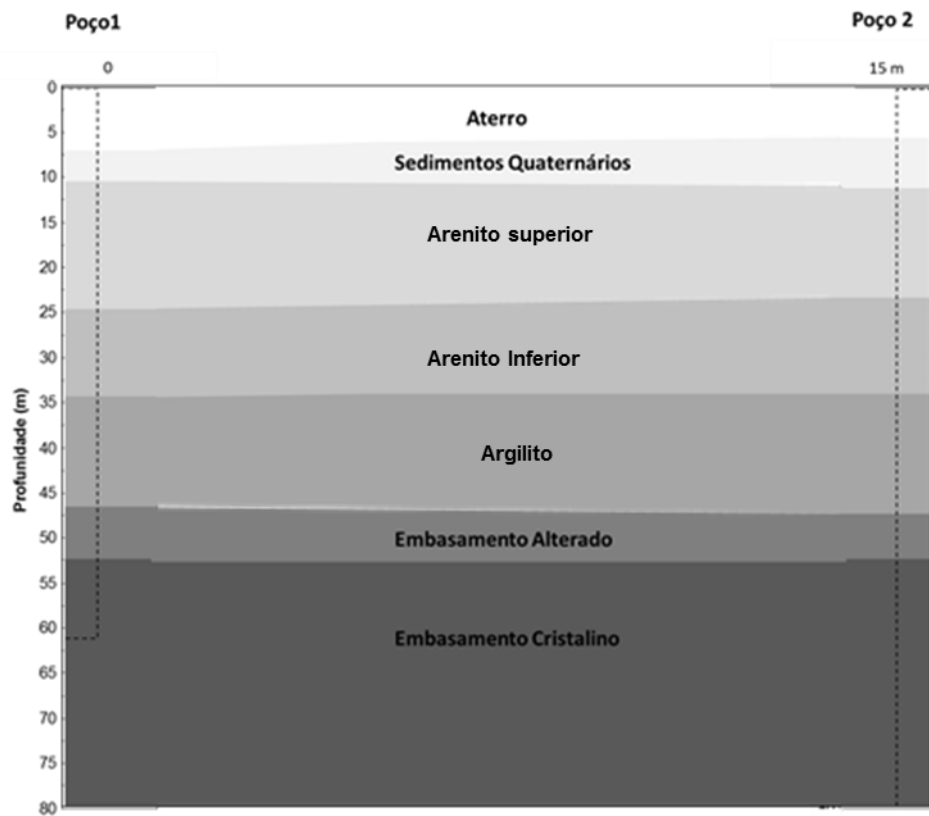


Figura 3.5 – Modelo Geológico obtido a partir dos perfis IL e GN. O polígono pontilhado representa a localização e profundidade dos poços.

Capítulo 4

Perfilagem em poços de monitoramento: Área contaminada por DNAPL

Poços de monitoramento são instalados em áreas contaminadas para coletar amostras da água subterrânea e avaliar os parâmetros físicos e químicos que expressam sua qualidade. Esses poços são instalados criteriosamente para determinar a distribuição dos contaminantes em uma determinada área, com poços a montante e a jusante do fluxo da água subterrânea. Os poços a montante servem como referência para o controle da qualidade da água e os poços a jusante acusam o alcance dos contaminantes ao longo do fluxo da água subterrânea. Poços de monitoramento possuem características específicas de construção como, por exemplo: revestimento com tubos geomecânicos (não metálicos) e zona de filtragem composta por filtro e pré-filtro (Figura 4.1). Essas e outras recomendações construtivas são determinadas pela a NBR 13895 (ABNT, 1997).

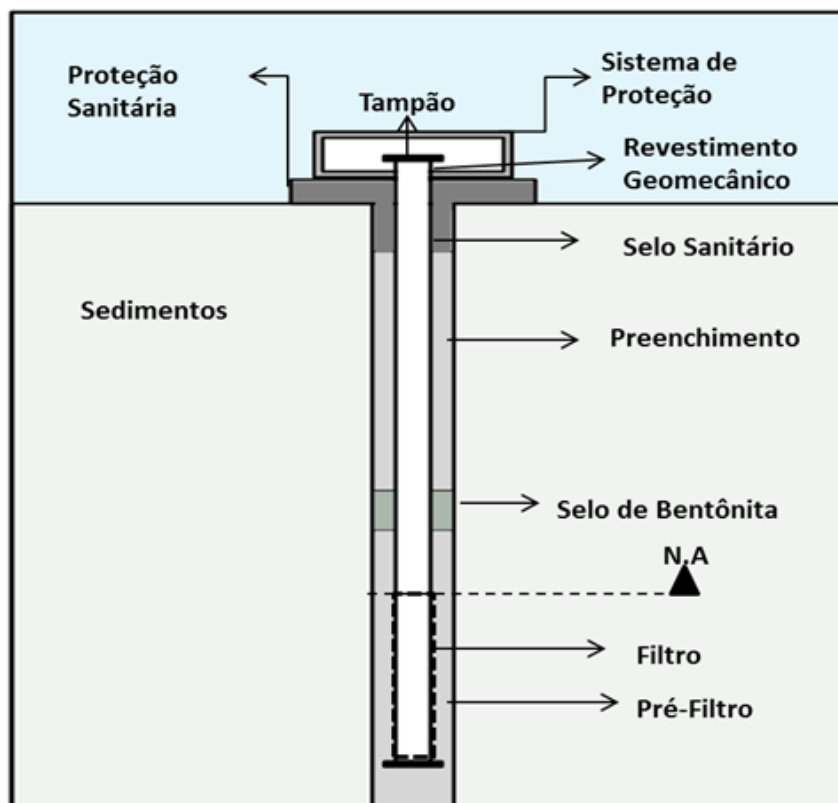


Figura 4.1- Os aspectos construtivos de um poço de monitoramento CETESB (1999). Representação ilustrativa, sem escala.

A perfilagem geofísica em poços de monitoramento apresenta um cenário particular, por tratar de poços inteiramente revestidos que impedem o contato direto da sonda com as unidades atravessadas pelo poço. Apenas sondas que não requerem contato direto com os materiais (solos ou rochas) circundantes ao poço podem ser utilizadas. Sondagens que se baseiam nos princípios da indução eletromagnética (*IL-Induction Log*) ou das radiações gama (*GN-Gamma Natural*) são as mais utilizadas em poços de monitoramento.

A utilização de perfis IL e GN em poços de monitoramento pode contribuir na investigação ambiental, embora com limitações. Uma das vantagens é que essas sondas podem ser usadas em poços não preenchidos por água, compatível com medições acima do nível freático que é comum em investigações ambientais. Aspectos construtivos dos poços e da própria sonda também devem ser levados em consideração. Por exemplo, o diâmetro reduzido dos poços de monitoramento (2” em geral) exige sondas especialmente projetadas, genericamente denominadas de *slimhole*. Outro aspecto que compromete a perfilagem em poços de monitoramento decorre do comprimento da sonda, normalmente entre 1 e 2 m, relativamente grande se comparado com a profundidade dos poços (10-15 m em média). O tamanho da sonda impede que seus sensores percorram toda a extensão do poço. Um intervalo proporcional ao comprimento da sonda é perdido nos extremos da seção, o que pode totalizar algo entre 15 e 20% da extensão do poço, considerando profundidades médias de 10 m. Essa limitação impede o acoplamento de sondas com vários sensores, procedimento comum na perfilagem para petróleo e gás, exploração mineral ou mesmo para água subterrânea. Alguns fabricantes (GEONICS, por exemplo) optam por não acoplar sensores e fornecem modelos de sonda IL e GN não acopláveis, o que praticamente duplica o preço do equipamento.

Aspectos construtivos inerentes aos poços de monitoramento também podem comprometer a interpretação dos perfis, como por exemplo, a instalação de selos de bentonita logo acima dos pontos de amostragem com filtro e pré-filtro. Por causa da proximidade com a sonda, a variação de composição associada ao selo gera uma resposta que pode ser confundida com aquelas causadas pelo meio, tanto nos perfis IL quanto nos perfis GN. A instalação de filtros com elementos metálicos, em especial, compromete as medidas com indução eletromagnética.

Nesse Capítulo apresentamos resultados de testes realizados em três poços de monitoramento em uma área de passivo ambiental, localizada no município de Barueri-SP.

Esta área embora investigada por uma dezena de poços de monitoramento apresentava uma base de dados incompleta na descrição dos perfis litológicos. Em parte, as limitações resultaram de serviços com diferentes especificações técnicas, realizados por diferentes empresas e projetos, agravadas pela geologia local com variações sutis nas frações argilo-arenosas de sedimentos quaternários e do manto de alteração nas rochas do embasamento. Essas limitações dificultaram a elaboração de um modelo conceitual para a caracterização do terreno, quando os estudos foram retomados em uma nova fase do projeto. A aplicação de perfis geofísicos teve como objetivo verificar se um quadro geológico melhor definido poderia ser obtido caso as informações incompletas e imprecisas dos perfis litológicos fossem reinterpretadas com base nos perfis geofísicos. A título de esclarecimento, destacamos que a detecção direta dos horizontes contaminados não se colocou como foco principal no presente trabalho, dada a falta de informações sobre a área.

Os resultados apresentados nesse Capítulo integram um resumo expandido apresentado no 15st SISBGf. O resumo e o pôster apresentado no evento encontram-se no Anexo 1.

4.1 – Descrições dos poços e da área teste

Os perfis IL e GN foram obtidos em poços de monitoramento instalados em uma área agora ocupada por um centro de distribuição, de uma rede nacional de material para escritório e papelaria, na cidade de Barueri-SP (Figura 4.2). Anteriormente, funcionava no local uma fábrica de tintas que, em 2010, foi parcialmente destruída por um incêndio². O incêndio comprometeu as instalações da fábrica, ocasionando o vazamento de contaminantes do tipo DNAPL (*Dense Non-aqueous Phase Liquid*).

DNAPLs são contaminantes organoclorados, imiscíveis e mais densos que água, largamente utilizados na indústria como solventes. Quando liberadas no meio ambiente essas substâncias atuam como contaminantes podendo se encontrar em fase dissolvida e em fase livre. Por serem mais densos que a água, esses contaminantes transpassam o nível freático e unidades permeáveis até se acumularem sobre unidades com menor permeabilidade, geralmente argilas, saprólitos ou rochas cristalinas (Kueper et al., 1993; Quinn et al., 2005). Por serem quimicamente estáveis, as acumulações em fase livre nos níveis mais profundos

² Incêndio ocorrido no dia 26/08/2010. Fonte: <http://oglobo.globo.com/brasil/incendio-destroi-fabrica-de-tintas-em-jandira-na-grande-sp-2959842>, acessado dia 25/01/2016 às 20:55.

persistem como fonte de contaminação e devem ser identificadas quando o projeto de remediação é dimensionado.

Informações geológicas disponíveis na área de estudo (estudos prévios com poços de monitoramento) mostram uma camada de aterro argilo-arenosa (1,5 a 4,0 m de espessura), depositada 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. A camada de saprólito não é identificada em todas as descrições litológicas de poços, sendo reconhecida em apenas um poço, o que pode indicar a existência de descontinuidades na profundidade do topo rochoso, ou simplesmente procedimentos distintos empregados na descrição do material de perfuração.

Como mostra a Figura 4.2, os poços de monitoramento estão localizados no estacionamento do depósito. Toda a área tem o solo coberto por construções e asfalto, com tráfego intenso de veículos. A cobertura por pavimentação dificulta a realização de levantamentos geofísicos com arranjos em superfície, especialmente visando caracterizar profundidades da ordem de dezenas de metros como é caso.

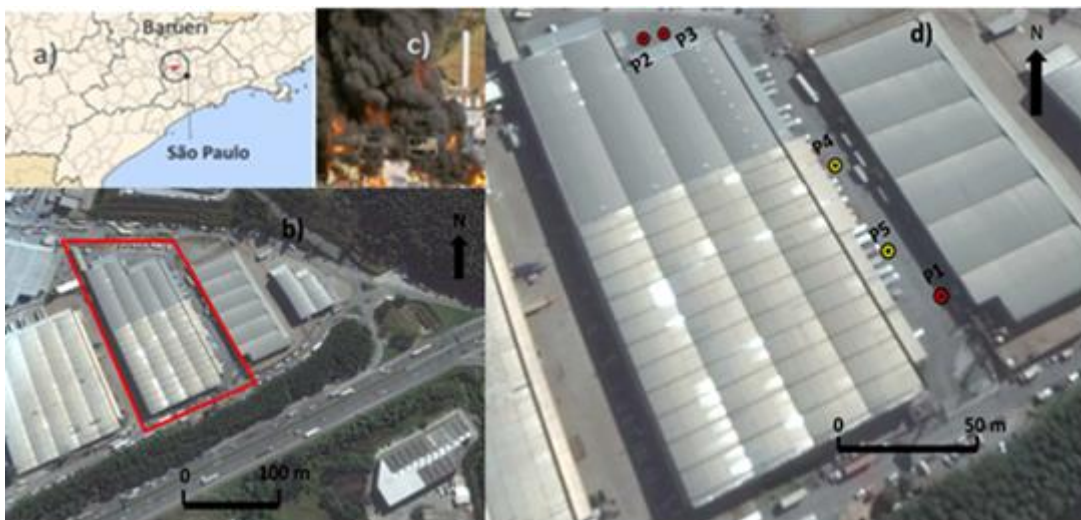


Figura 4.2 - A) Localização da cidade de Barueri no estado de São Paulo. B) Área de estudo. C) Imagem do incêndio que causou o vazamento dos contaminantes em 2010, fonte:segurancaemrisco.wordpress.com/2010/09/15/violento-incendio-em-fabrica-de-tintas-de-jandirasp-26-08-2010/, acessado em 17/02/2010. D) Disposição dos poços na área de estudo. Poços utilizados no trabalho (vermelho) e poços não utilizados (amarelo). Observação: A distância dos poços 2 e 3 estão fora de escala para facilitar a representação dos mesmos, pois a distância entre ambos é pequena (1,5 m).

4.2- Aquisição de dados

Ao todo foram perfilados cinco poços de monitoramento, totalizando 41 m de perfilagem. Dois poços apresentaram profundidades menores que 6 m, atravessando apenas a camada de aterro ou no máximo atingindo o topo dos sedimentos quaternários. Os poços muito rasos praticamente não tiveram utilidade no presente estudo, pois não forneceram uma extensão mínima que permitisse a identificação de contrastes.

Em todos os poços foram realizadas medidas com a sonda na subida e na descida para conferir a repetição e a qualidade das medidas. Como a profundidade dos poços não era conhecida, utilizamos a descida da sonda para determinar a profundidade, pois o cabo de perfilagem afrouxa quando a sonda atinge a base do poço. A profundidade efetiva para a perfilagem é obtida somando-se o tamanho da sonda (2,25 m). Nos testes em Barueri, o equipamento foi transportado entre os pontos de medida através de um veículo (*pick-up*) e o tempo gasto para a realização de todas as medidas foi de quatro horas.

4.3- Resultados Obtidos

Na análise dos resultados inicialmente abordamos uma situação em que um perfil muito homogêneo, tal como descrito nos perfis litológicos, foi reinterpretado com base nos perfis de poço (Caso 1). Em seguida apresentamos resultados obtidos em dois poços com separação de apenas 1,5 m, mas com valores de condutividade muito diferentes (Caso 2).

4.3.1- Caso 1: Reinterpretação de um perfil litológico

A Figura 4.3 mostra resultados de perfilagem e de interpretação geológica no Poço 1. O perfil geológico, tal como apresentado no relatório de perfuração (Figura 4.3a), sugere um terreno muito homogêneo, não condizente com descrições em poços vizinhos em relatórios elaborados por diferentes empresas. Os resultados da perfilagem (Figuras 4.3b e 4.3c) foram então reinterpretados utilizando espessuras médias das unidades descritas e identificando horizontes, de Z1 a Z6 nos perfis geofísicos, tal como mostra a Figura 4.3.

O perfil de condutividade elétrica mostra três intervalos: um até o nível Z2 com condutividade praticamente constante (35 mS.m^{-1}), o segundo de Z2 a Z6 com condutividade irregular ($\sim 20 \text{ mS.m}^{-1}$) e o terceiro, abaixo do nível Z6, com maior condutividade (acima de 40 mS.m^{-1}). Embora não definindo patamares perfeitos, percebem-se três faixas de condutividade, cada uma com correspondência no perfil GN. O intervalo superior (até Z2) com contagens entre 150 e 200 CPS, o intermediário (Z3) com variações na faixa de 150 CPS e o inferior com contagem por volta de 200 CPS.

O intervalo entre os níveis Z2 e Z6 pode ser subdividido segundo as variações nos perfis IL e GN. Entre Z3 e Z4 observa-se uma unidade com aumento 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 de Z5 a Z6. Abaixo do nível Z6, além do aumento da contagem gama, o meio torna-se mais condutivo, com variações abruptas de condutividade, definindo um tipo de resposta observada em terrenos com embasamento alterado. Essa resposta possui caráter semelhante à resposta obtida no embasamento cristalino do poço na área de testes do IAG-USP (Capítulo 3).

A incorporação dos horizontes Z1 a Z6 no perfil litológico (Figura 4.3d) gera um perfil litológico com maior diversidade que aquele originalmente descrito no relatório de perfuração. Isso se deve à relativa uniformidade dos materiais cortados pelo poço, de um modo geral muito argilosos, dificultando a identificação de variações de composição nas amostras retiradas na perfuração.

O quadro definido pelo perfil litológico depois de reinterpretado com base nos perfis fornece elementos mais detalhados para a elaboração do modelo geológico. A existência de camadas argilosas pode bloquear o fluxo descendente de contaminantes DNAPL, sendo assim importante identificar tais horizontes nos estudos de caracterização ambiental. Outro aspecto é

o relevo definido pelo saprólito, que pode definir micro-bacias eventualmente canalizando o fluxo dos contaminantes. O fato do topo do saprólito ter expressão marcante na perfilagem pode auxiliar o mapeamento deste horizonte a partir da perfilagem de uma rede de poços.

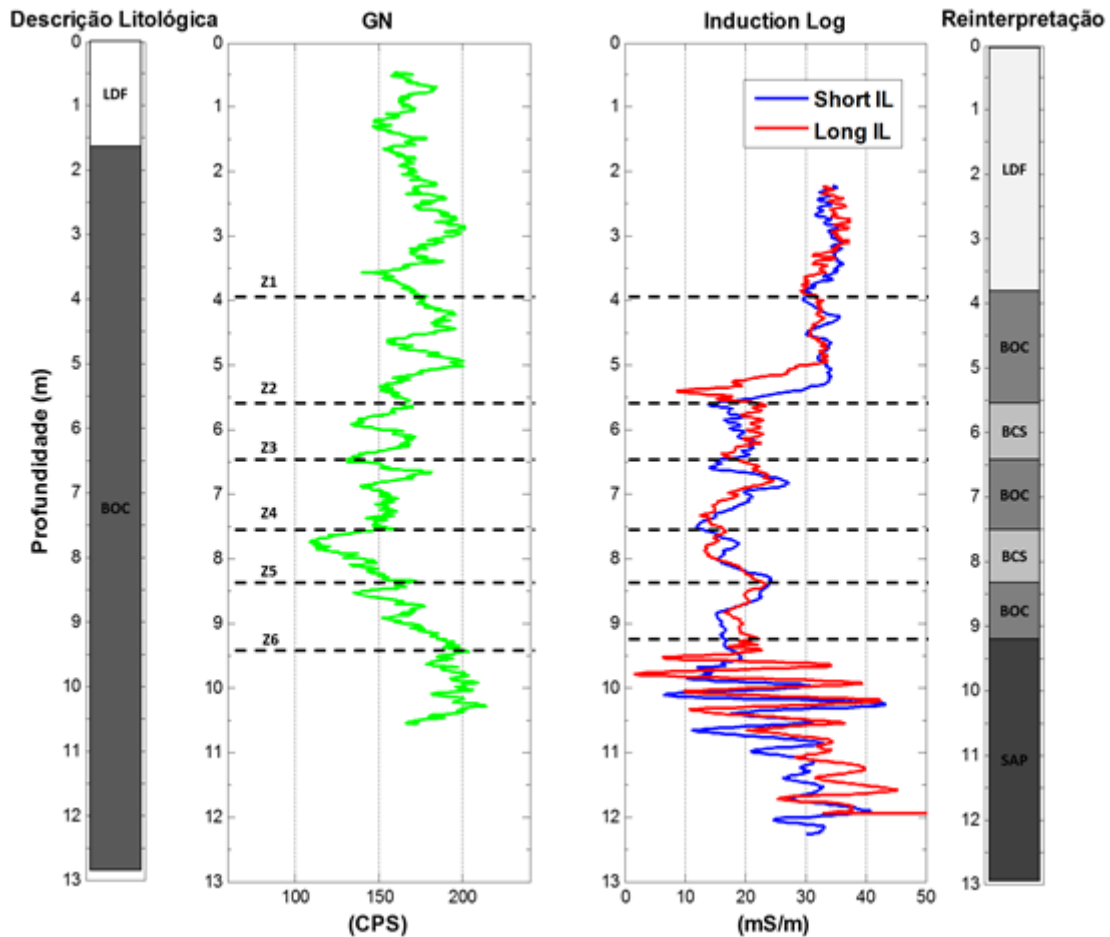


Figura 4.3 – Testes de perfilagem no Poço 1: a) perfil litológico com base em informações de poço; b) perfil gama natural; c) perfis IL short (azul) e long (vermelho), em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. d) perfil litológico reinterpretado. Elementos do perfil litológico: aterro (LDF), Argila marrom com restos vegetais (BOC), Argila arenosa (BCS), Saprólito (SAP).

4.3.2- Caso 2: Distorção em poços adjacentes

A Figura 4.4 mostra os perfis ILs para dois poços situados a 1,5 m de distância. Os perfis GN apresentam repostas semelhantes às apresentadas na Figura 4.3, sendo, portanto, omitidas na Figura 4.4.

Os poços 2 e 3 (Figura 4.4b,c) apresentam valores de condutividade semelhantes até a profundidade Z3. Abaixo da profundidade Z3, a condutividade do Poço 2 é muito maior que a apresentada no poço 3. Abaixo do limite Z4 os valores de condutividade aparente tornam-se negativos (não aparecendo no perfil devido a escala log), enquanto que no Poço 3 os valores apenas diminuem. A constatação de valores tão díspares em poços tão próximos serve para identificar poços com aspectos construtivos diferentes. Isso pode ser causado por diferentes diâmetros de perfuração ou uso de materiais metálicos na construção do poço (guia centralizadora, ou filtro metálico, por exemplo). Se não identificadas, tais distorções podem levar a erros de interpretação, levando a inferências sobre variações nas feições geológicas que na verdade são devidas a aspectos construtivos.

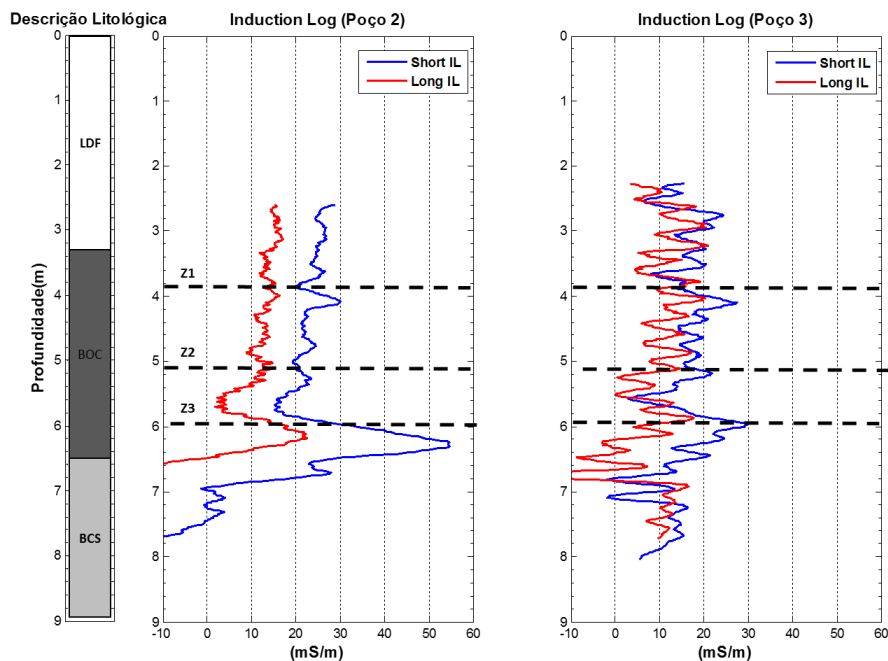


Figura 4.4 – Testes de perfilagem nos poços 2 e 3: a) Descrição litológica do poço: aterro (LDF), argila marrom com restos vegetais (BOC), argila arenosa (BCS); b) perfis IL no poço 2; c) perfis IL no poço 3. A separação dos poços: 1,5m.

4.4- Discussão dos resultados

Os perfis IL e GN na área de teste em Barueri-SP mostram que a perfilagem geofísica pode ser efetiva na caracterização de áreas contaminadas, melhorando a discriminação de diferentes unidades geológicas quando as descrições de poço sugerem terrenos homogêneos. Entretanto, para uma interpretação consistente o intérprete deve considerar aspectos construtivos dos poços e, sempre que possível, utilizar poços mais profundos. Embora a identificação dos contaminantes não tenha sido o foco principal do nosso estudo no atual estágio da investigação, podemos assinalar algumas condições que devem ser observadas para que esse problema possa ser investigado. Primeiro, é necessário que alguns poços sejam mais profundos, para determinar as propriedades do saprólito e da rocha inalterada. A rede de poços deve contar com poços também mais profundos (adentrando pelo menos 2 m no embasamento) de forma a medir com maior cobertura as propriedades nos níveis mais profundos. Isso facilita a identificação de valores de referência para as propriedades físicas e a identificação de contrastes. Segundo, é necessário definir poços para testes em branco, em áreas não contaminadas, para definir valores referenciais na determinação de anomalias. Poços de controle, entretanto, podem ser inviáveis em áreas com fontes difusas de contaminação. A combinação desses fatores pode ser de fundamental importância na identificação de horizontes contaminados com base nas medidas de condutividade elétrica em particular.

Apesar das limitações na área de teste em Barueri, os resultados da perfilagem mostraram que é possível identificar horizontes argilosos (possivelmente mais impermeáveis) que podem condicionar a acumulação e fluxo dos contaminantes. Na construção do modelo conceitual as informações de poços adjacentes, por meio da correlação lateral das camadas, podem identificar possíveis rotas de migração e acumulação. A profundidade do saprólito, por exemplo, define uma interface cujo reconhecimento é muito importante, pois pode definir “micro-bacias” para as quais o fluxo contaminante pode convergir e acumular. Não que o presente estudo tenha permitido a construção de um modelo conceitual. Apenas mostramos que, utilizando uma rede adequada de poços, parâmetros importantes na construção desse modelo podem ser determinados.

Capítulo 5

Perfilagem em poços de monitoramento: Área com acumulação natural de metano

Liberações de metano em sedimentos quaternários, embora não muito frequentes, tem sido descritas em diferentes contextos. Por exemplo, um relatório recentemente preparado (SERVMAR³, 2014) descreve que durante a perfuração de dois dos três poços de monitoramento perfurados: *“Houve bolhas de ar na água subterrânea indicando uma liberação de gás durante as sondagens ST-106 / PM-27A e ST-120 / PM-30A, ao ser atingida a profundidade aproximada de 8,0 m, na qual se observou uma argila rica em restos vegetais, de coloração preta e de origem natural. É relevante salientar que, durante a amostragem do poço PM-30A, foi constatado borbulhamento da água subterrânea, indicando a saída de gases do subsolo”*. Entretanto, apesar de constatada a emissão de metano durante a perfuração algumas questões não ficam bem definidas, por exemplo: espessura da camada com acumulação de gás e suas propriedades físicas. Tais questões devem ser respondidas, tanto para o entendimento dos processos que levam à geração e acumulação de biogás (composição de metano e dióxido de carbono) no subsolo, quanto para definir medidas de remediação.

Abreu (2012), em estudo no campus da USP-Leste, São Paulo, mostrou que para detectar essas acumulações por tomografia elétrica é necessário utilizar eletrodos também em subsuperfície. Como as camadas com acumulações de gás são finas (1,0-1,5 m no máximo) e relativamente profundas (8-9m, no seu local de estudo) a perda de resolução dos métodos de superfície impede a detecção dessas unidades. O estudo de (Abreu, 2012) mostrou também a necessidade em se utilizar poços com amostragem multi-nível para comprovar a presença do biogás. A área de teste utilizada por esses autores possui uma rede com três poços de monitoramento.

Nosso estudo na USP-Leste teve como objetivo verificar se a sequência de unidades descritas na área teste de Abreu (2012) pode ser identificada a partir da perfilagem em poços de monitoramento. A execução dessa tarefa exigiu estudos complementares, pois exatamente na área teste não havia poços de monitoramento convencionais com a profundidade adequada à perfilagem. Foi necessário um levantamento dos perfis existentes, verificando poços ainda

³Relatório de Investigação detalhada, avaliação de risco à saúde humana e plano de intervenção na AI-01 e investigação detalhada de gases. Página 134.

preservados no campo com dados disponíveis nos relatórios enviados à CETESB. Esse levantamento, além de dar contexto geológico ao poço perfurado, permitiu generalizar o modelo inicialmente proposto por Abreu (2012).

Para cobrir os diversos aspectos envolvidos neste estudo, optamos por organizar este Capítulo de maneira diferente dos anteriores. Inicialmente apresentamos um levantamento de ocorrências de metano em sedimentos quaternários mostrando que a situação observada na USP-Leste é diferente dos casos descritos. Por outro lado, mostramos que o quadro geológico observado na área teste de Abreu (2012) se repete em outros contextos brasileiros, embora sem ocorrência comprovada de acumulação de metano. Em seguida apresentamos um breve relato do problema do metano na USP-Leste, com uma re-interpretação dos perfis litológicos do Relatório Ambiental Preliminar (RAP) (Costa, 2004). Finalmente, apresentamos a perfilagem de um dos poços mostrando que elementos básicos do modelo geológico podem ser identificados nos perfis de poço.

5.1- Acumulações de biogás em sedimentos orgânicos

Acumulações de biogás em sedimentos quaternários não marinhos são descritas em poucos casos, em sua maioria associadas a sedimentos de idade Pleistocênica. A Bacia do Qaidam, na China, possui acumulações expressivas de biogás, inclusive com aproveitamento econômico (Dang et al., 2007). Embora com presença de sedimentação quaternária, as características da Bacia de Qaidam são particulares, pois os sedimentos quaternários possuem espessura média da ordem de quilômetros e, por conseqüência, os níveis portadores de gás encontram-se em profundidades de 2 a 3 km e podem ter origem termogênica. Outro ambiente de geração de biogás ocorre em regiões polares, na forma de permafrost, que são combinações de solo, rocha, gelo e matéria orgânica congelados por longos períodos. Mesmo sobre influência de clima glacial, a ação de bactérias anaeróbias não é suprimida, o que permite a geração de quantidades relevantes de metano (Bleaser et al., 2010).

Uma das poucas ocorrências de biogás em sedimentos quaternários ocorre em vales subglaciais de Alberta, Canada. Essa ocorrência tem sido bastante estudada, pois causou acidentes durante a perfuração de um túnel e quando do aplainamento de um terreno para construção (Ahmad et al., 2012). Esse é um dos poucos casos com registro de aplicação de perfilagem de poço no estudo de metano biogênico em terrenos quaternários. Ahmad et al.,

(2012) utilizou estudos geofísicos (perfilagem de indução, radiação gama natural, resistividade e sísmica) para determinar a localização desses vales subglaciais, que contêm níveis de metano em profundidades menores que 50m. As características dos perfis geofísicos obtidos nos horizontes com metano são: maior resistividade elétrica e diminuição nos valores de radiação gama em relação ao meio circundante.

A ocorrência de biogás em sedimentos quaternários decorre da decomposição anaeróbia de sedimentos orgânicos. Por sua vez, sedimentos quaternários depositados no Norte e Centro-Sul brasileiro, entre o final do Pleistoceno e durante o Holoceno, apresentam quantidades significativas de sedimentos orgânicos. Turcq et al., (2002) realizaram medidas comparativas entre as acumulações de carbono orgânico total (TOC-Total Organic Carbon) nos últimos 12000 anos, em cinco ambientes lacustres brasileiros. A análise dos dados mostrou que a acumulação de carbono orgânico, durante o Holoceno está relacionada com a expansão de um paleo-ambiente composto por lagos, seguido do desenvolvimento de um clima mais úmido relacionado a entradas de massas de ar úmido vindas do Atlântico e da Amazônia. Turcq et. al., (1997) estudaram a paleohidrologia e o paleoclima na transição Pleistoceno-Holoceno e durante o todo o período Holoceno, no rio Tamanduá em São Simão-MG. Nesse estudo foram apresentados dois grandes ciclos de deposição de sedimentos orgânicos relacionadas à sedimentação aluvionar: o primeiro entre 32.000 e 19.000 AP e o segundo a partir de 10000 AP. Esses sedimentos orgânicos apresentam concentrações de carbono orgânico entre 25 e 40% em massa.

Na Bacia de São Paulo a presença de camadas com argilas orgânicas está relacionada à sedimentação aluvionar dos principais rios da cidade de São Paulo: Aricanduva, Pinheiros, Tamanduateí e Tietê. Takiha (1997) sugere a existência de duas principais fases de desenvolvimento de rios meadrantes na Bacia de São Paulo semelhantes às observadas por Turcq et al., 1997, indicando que o desenvolvimento de planícies aluvionares teve expressão regional. Almeida et al., (1984) estudou detalhadamente os sedimentos aluvionares da várzea do rio Tietê, na região de Itaquaquecetuba, determinando a seguinte sequência sedimentar da base para o topo: conglomerados compostos por seixos e blocos de quartzito, areias de granulação de média, sedimentos areno-argilosos turfáceos. Definindo, assim, uma sequência de afinamento para o topo nos sedimentos da bacia no local.

Nenhum desses estudos realizados na parte aluvionar da Bacia de São Paulo teve como principal motivação estudar as acumulações de metano a partir dos sedimentos orgânicos.

5.2 – Aspectos históricos e descrição da área teste

O campus da USP-Leste está localizado na Rodovia Ayrton Senna, entre o Parque Ecológico do Tietê e a saída viária para o aeroporto de Internacional de Guarulhos (Figura 5.1). Antes de sua instalação (entre 2001 e 2005), a região fazia parte do parque ecológico do Tietê, então administrado pelo Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). A atual gleba que compõe o campus (Gleba-1) foi utilizada como local de “bota-fora”, de materiais dragados durante a retificação do rio Tietê (Costa, 2004).

Como mostra a Figura 5.1, em 1958 o rio Tietê mantinha seu curso original meandrante, com curvas acentuadas e braços abandonados. As mudanças de forma e posição dos meandros estavam associadas às variações de energia da carga fluvial ao longo das estações do ano. As mudanças naturais de curso do rio Tietê deixaram vários meandros abandonados na área, como pode ser observado na porção nordeste da Gleba 1 (Figura 5.1a), onde a USP-Leste foi instalada.

Durantes as décadas 1960 até início dos anos de 1980, o rio Tietê ainda mantinha o seu curso original, porém o meandro visualizado no campus não mais aparece nas imagens de satélite, tendo sido provavelmente aterrado (SERVMAR, 2014). Apesar dos contornos de alguns meandros antigos delimitarem as construções urbanas e a cobertura vegetal recente, nota-se que a maioria dos meandros foi aterrada (Figura 5.1b). O aterramento dos meandros abandonados fornece o cenário ideal para as acumulações de metano, tendo em vista que os sedimentos depositados nessas lagoas são ricos em matéria orgânica.

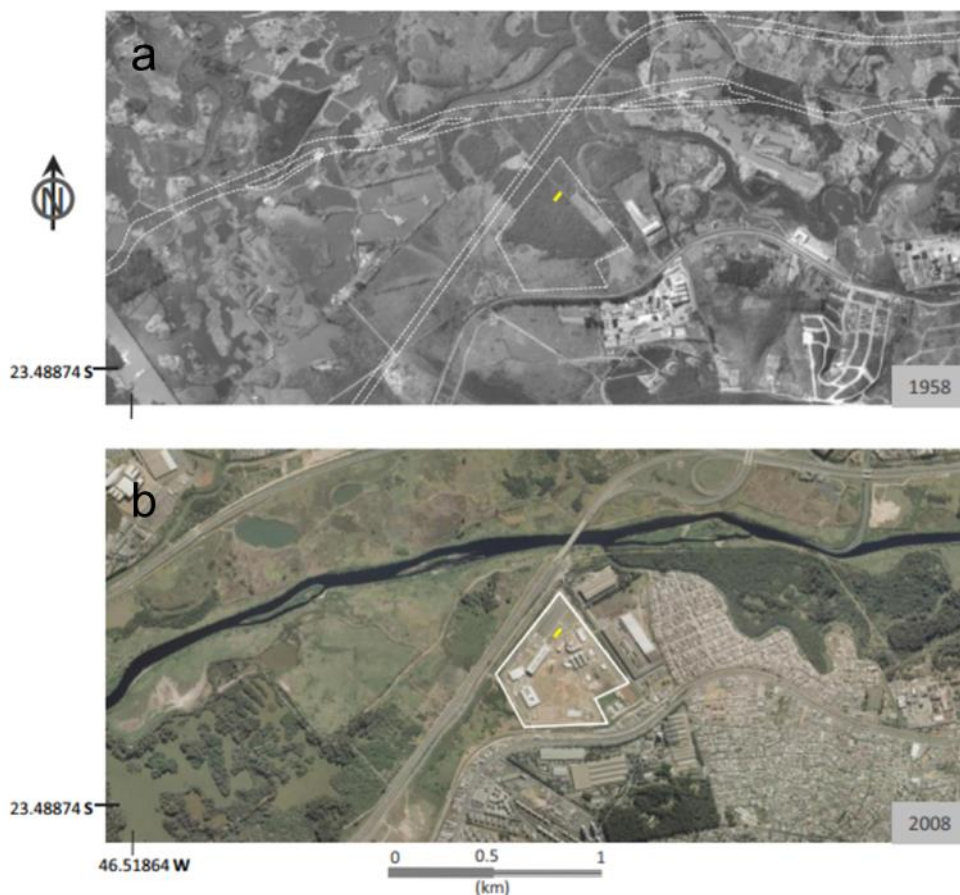


Figura 5.1 – Fotos da área de estudo. a) área de estudo, em 1958, antes do processo de retificação do rio Tietê e do processo de ocupação urbana. As linhas tracejadas assinalam o antigo curso do rio Tietê; b) imagem área da área de estudo em 2008, com as obras da USP-Lestes concluídas e o processo de retificação do rio Tietê finalizado. O polígono define a Gleba-1 do campus. Adaptado de Mendonça et al. (2015).

5.3 –Aspectos geológicos

O campus da USP-Leste, está situado na Bacia de São Paulo, que apresenta, no local, depósitos de sedimentos quaternários e neogênicos. Com base nos mais 50 furos de sondagem exploratória realizados no local (Figura 5.2) efetuamos a correlação entre os dados geológicos que resultaram duas secções geológicas (Figuras 5.3 e 5.4). Os furos de sondagem em questão apresentam profundidades de 13 a 20 m de profundidade, amostrando assim a porção superior dos sedimentos homogêneos. Infelizmente, nenhum furo da investigação descrita no RAP de 2004 encontra-se atualmente acessível.

As informações dos furos de sondagem disponíveis na área mostram a seguinte configuração geológica: uma camada de aterro argilo-arenoso com espessura variável entre 2 e 6 m, depositada sobre de sedimentos do Quaternário com espessura média de 8 m, por sua vez assentados sobre sedimentos neogênicos da Formação Resende com profundidade do topo rochoso entre 10 e 12,5 m. A camada de aterro areno-argiloso é composta por sedimentos de origem antrópica oriundos da retificação do Rio Tietê. Os sedimentos quaternários são compostos por argilas orgânicas com lentes arenosas de cor cinza escura e areias médias com cascalho de cor cinza claro. Os sedimentos neogênicos são compostos por arenitos e argilitos cinza esverdeado.

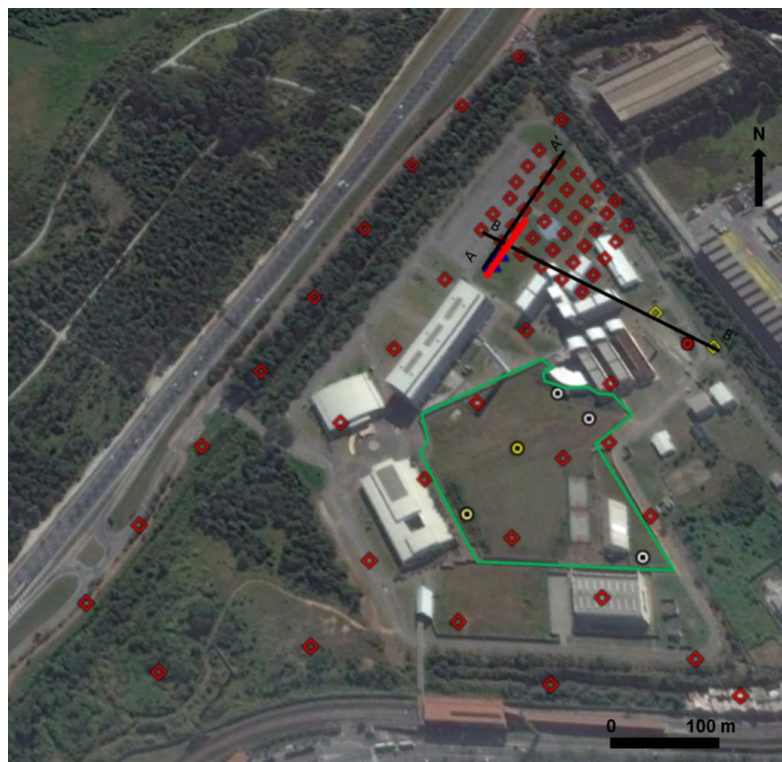


Figura 5.2 –Localização dos poços e furos de sondagem existentes no local ou descritos em relatórios. Furos de sondagem desativados (losangos vermelho e amarelo), poços para amostragem multinível (triângulos em azul) na linha de teste (em vermelho) de Abreu (2012). Poços de monitoramento mais profundos: sem constatação de gás (círculos em branco) e com emanção e/ou borbulhamento de gás quando da perfuração (círculos em amarelo). As linhas pretas representam os perfis geológicos (A-A' e B-B'). O polígono verde

assinala a área interdita pelo Ministério Público⁴ (MP) entre 2014 e 2016 (deposição de solo de procedência desconhecida).

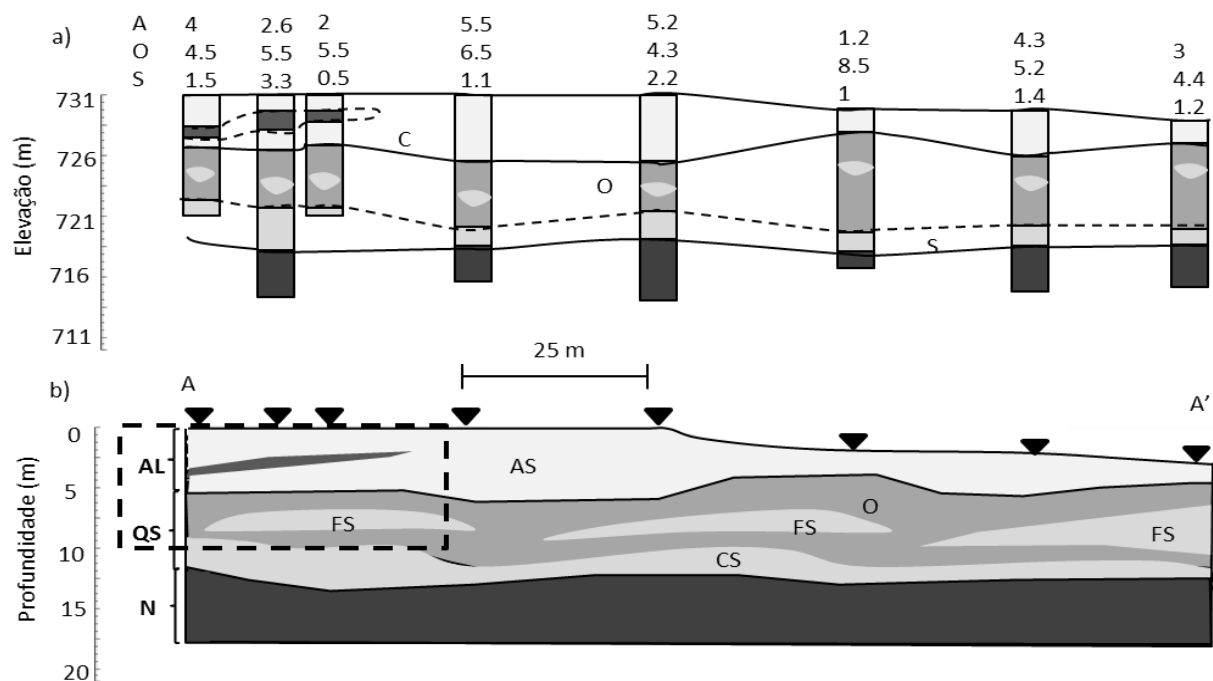


Figura 5.3 – Perfil geológico A-A'. a) Unidades litológicas descritas por poços e espessuras das camadas (metros); aterro (C), argila orgânica (O), total de areia com cascalho (S). b) seção Geológica com todas as unidades geológicas; aterro (AL), sedimentos quaternários (QS), arenito neogênico basal (N). Unidades Internas a seção; aterro argiloso (AM), aterro arenoso (AS), argila orgânica (O), areia fina (FS), areia grossa (CS). A seção de resistividade obtida por Abreu (2012) está representada pela a linha pontilhada.

⁴ Processo SVMA: Nº13.579/2004 e PA 00142/13

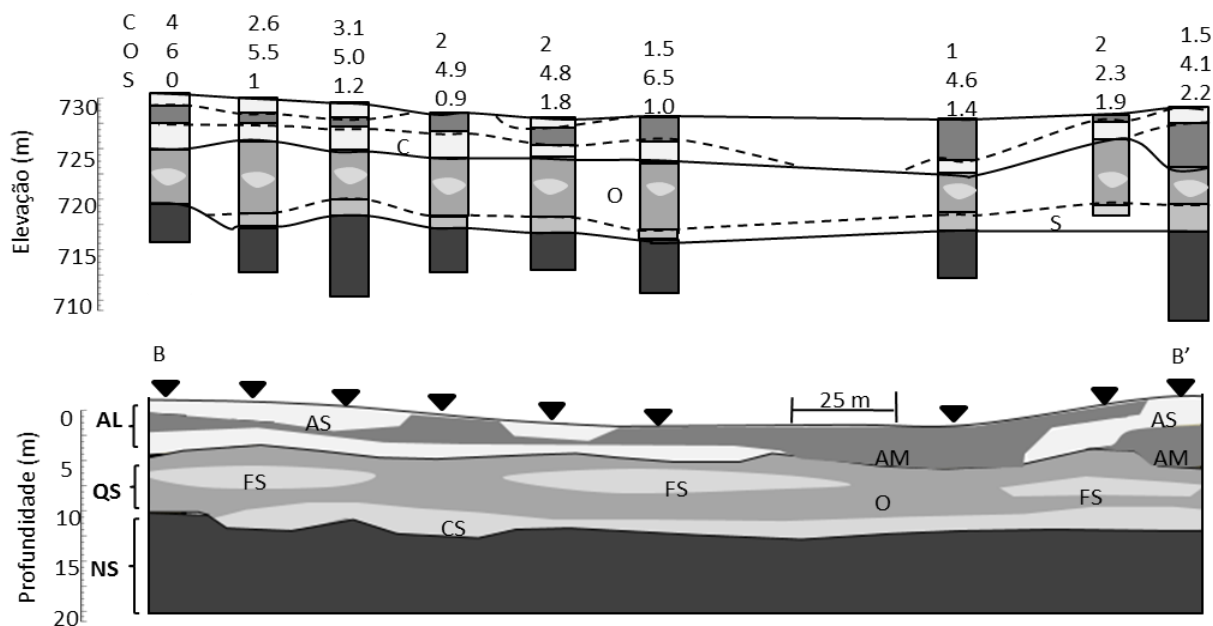


Figura 5.4 – Perfil geológico B-B'. a) Unidades litológicas descritas por poços e espessuras das camadas (metros); aterro (C), argila orgânica (O), total de areia com cascalho (S). b) seção Geológica com todas as unidades geológicas; aterro (AL), sedimentos quaternários (QS), arenito neogênico basal (N). Unidades Internas a seção; aterro argiloso (AM), aterro arenoso (AS), argila orgânica (O), areia fina (FS), areia grossa (CS).

5.4 –Dados de perfilagem

O poço perfilado na USP-Leste foi encontrado após uma série de medidas de profundidade nos poços de monitoramento atualmente existentes no campus. Ao todo foram medidas as profundidades de mais de 50 poços; apenas o poço discutido nesse Capítulo apresentou uma profundidade mínima para testes com perfilagem (9,2 m). Os outros poços são muito rasos, alcançando apenas à porção superior do aquífero livre, com profundidade média de 5 m.

Ao todo foram realizadas três corridas (medidas na subida e na descida) para verificar a repetibilidade dos dados. Cada uma das corridas demandou em média 15 min, sendo que o tempo total gasto para a montagem e desmontagem do equipamento foi de duas horas. Somada todas as corridas tivemos um total de 48 m de perfilagem. Apesar do poço perfilado ter profundidade de 9,2 m, as medidas de perfilagem se estendem até 8 m por causa do comprimento da sonda.

A descrição litológica do poço perfilado não foi encontrada em nenhum dos relatórios sob guarda da CETESB. Sendo assim, utilizamos as descrições litológicas dos furos de sondagem próximos ao poço perfilado (Figuras 5.5), que serviram de subsídio para interpretação dos dados de perfilagem. O furo mais próximo encontra-se a 27 m do poço perfilado, enquanto que o mais distante se encontra a 45 m do mesmo.



Figura 5.5- Furos de sondagem usados para a correlação de dados geológicos (amarelo) e poço perfilado (vermelho). A linha branca representa a correlação entre os furos de sondagem apresentada na Figura 5.6.

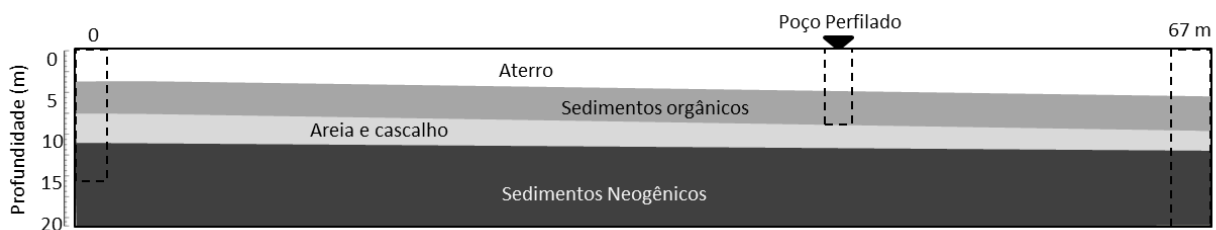


Figura 5.6 – Perfil de correlação lateral entre furos de sondagem próximos ao poço perfilado. A posição dos furos de sondagem e do poço perfilado está representada pelo o polígono pontilhado.

5.5 – Resultados obtidos

A Figura 5.7 mostra a descrição litológica, os perfis geofísicos e o perfil litológico re-interpretado a partir dos dados de perfilagem. O perfil IL foi convertido para resistividade elétrica para facilitar a comparação com resultados de tomografia elétrica de Abreu (2012). Os perfis GN e IL foram interpretados a partir da definição de intervalos (Z1 a Z6) possivelmente associados a transições ou contatos entre camadas.

O perfil IL mostra três intervalos de resistividade: um até o nível Z4 com resistividade praticamente constante (~15 ohm.m), o segundo de Z4 a Z6 com variações sutis de resistividade (entre 15 e 20 ohm.m) e o terceiro com valores mais elevados de resistividade (maiores que 40 ohm.m). No perfil GN são observados seis limites que podem ser divididos em dois intervalos: a porção superior (acima de Z2) apresenta valores entre 100 e 120 CPS e uma porção inferior (Z2 a Z6) com valores entre 100 e aproximadamente 150 CPS.

Os intervalos observados nos perfis IL e GN podem ser classificados de acordo com as características geológicas observadas no local (Figuras 5.3 e 5.4). O intervalo entre Z1 e Z2 mostra características que são compatíveis com a existência de uma camada de aterro com composição argilo-arenosa. O intervalo de Z2 a Z6 mostra variações abruptas no perfil GN, com alternância de contagens baixas (intervalos Z2-Z3 e Z4-Z5) e altas (intervalos Z3-Z4 e Z5-Z6) compatíveis com sequências de “afinamento para cima” (diminuição da granulometria da base para o topo), chegando a desenvolver feições arenosas o topo. Essas características aliadas resistividades baixas com leves inflexões dentro desses intervalos, indicam a existência de uma camada mais argilosa com lentes de areia, sendo assim a expressão nos perfis geofísicos da camada de argila orgânica observada nos poços. Abaixo do nível Z6 o aumento de resistividade pode ser associado a uma camada (ou lente) arenosa.

O cenário observado a partir da interpretação dos perfis geofísicos é de grande relevância para o estudo de acumulações de metano, tais como descritas por Abreu (2012). Ao longo do perfil as unidades AF (arenitos finos), na forma de lentes ou camadas, configuram unidades nas quais ocorrências de metano foram identificadas por amostragem multi-nível na área de teste (Abreu, 2012). Isso mostra que os perfis IL e GN podem contribuir para a construção de um modelo conceitual, que identifique as unidades arenosas (reservatórios) que potencialmente podem abrigar acumulações de metano. A caracterização da camada de argila orgânica serve é importante para dimensionar o material que muito provavelmente constitui a

fonte do metano. A identificação dessa camada por correlação de poços e análises de carbono orgânico, pode dimensionar a quantidade de material que pode produzir o biogás.

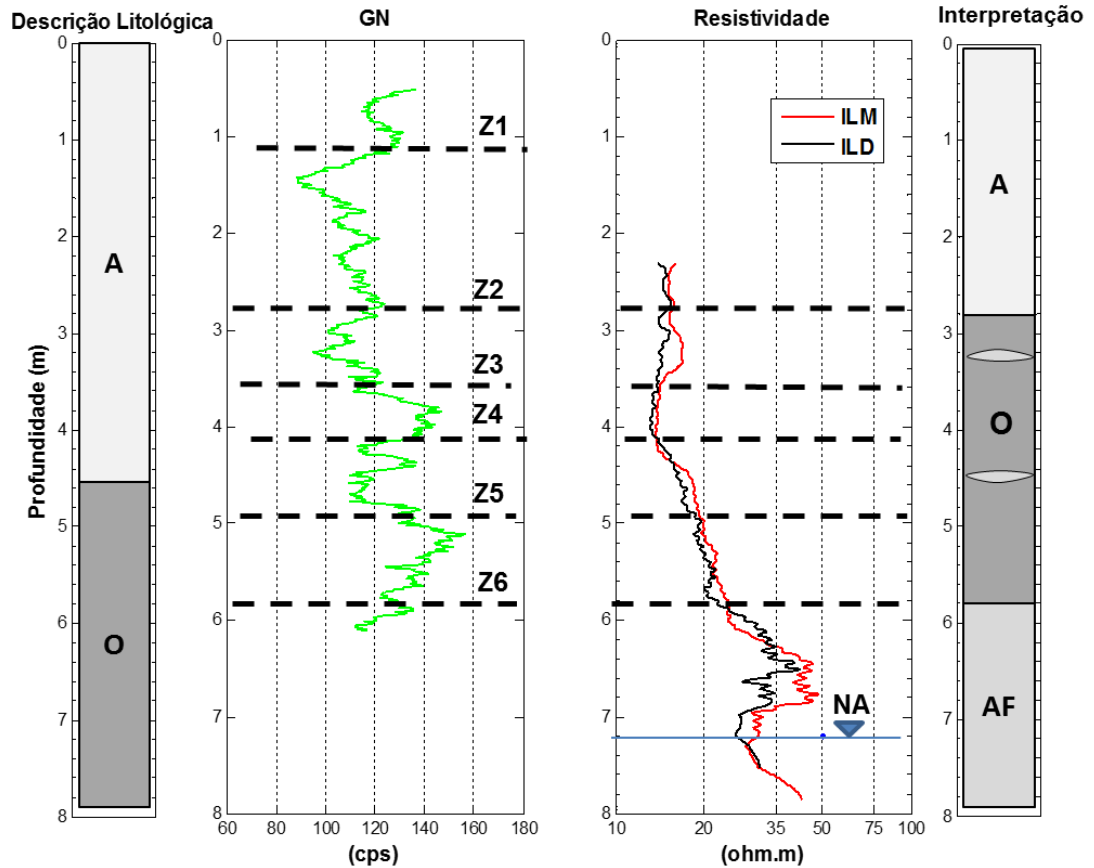


Figura 5.7- Perfis geofísicos no poço perfilado. a) descrição litológica obtida a partir de poços próximos; aterro (A), argila orgânica (O) b) perfil GN, em CPS. c) perfil IL, em ohm.m. Medidas com as sondas ILM (vermelho) e ILD (preto). d) Interpretação dos níveis geológicos com base nos perfis geofísicos; aterro (A), argila orgânica (O) e areia fina (AF).

5.7-Discussão dos resultados

Os perfis IL e GN na área na USP-Leste, mostram que a perfilagem geofísica discriminou as diferentes unidades geológicas descritas nos furos de sondagem e identificou variações menores no interior de cada unidade. Tal como argumentamos, esses resultados são úteis na correlação de poços, para determinar a continuidade de estratos interceptados por uma rede de poços de monitoramento ou furos de sondagem. Ressaltamos a necessidade em

utilizar poços ou furos mais profundos, de forma a compensar o comprimento da sonda e permitir que a porção basal dos sedimentos quaternários possa ser perfilada. Um estudo mais detalhado deveria utilizar poços que adentrem pelos sedimentos neogênicos em pelo menos 2m. Para o caso da USP-Leste, o emprego de poços mais profundos é de fundamental importância, pois a formação arenosa na base do Quaternário é, em potencial, um reservatório para acumulações de metano. Essa camada basal pode acumular metano em regime de semi-confinamento com pressões entre 0,5% e 1% acima da pressão atmosférica (Mendonça et al., 2015).

Uma possibilidade para a continuidade dos estudos no local é realizar medidas nos poços de monitoramento mais profundos existentes no perímetro anteriormente interditado (Figura 5.8) e recentemente (19/01/15) liberado pela CETESB⁵. Tal como exposto no início desse Capítulo, dois poços neste perímetro (Figura 5.9) apresentaram borbulhamento durante a perfuração. Esses poços apresentam também as maiores espessuras de argilito orgânico, além de espessamento da camada arenosa e basal. O quadro geológico configurado por esses poços é muito parecido com o descrito por Abreu (2012), apenas com maior espessamento das unidades. Alia-se a isso a comprovada observação de escape (SERVMAR, 2014). Acreditamos, assim, que o estudo dos poços neste perímetro pode fornecer elementos consistentes para a elaboração de modelo conceitual que explique a geração e acumulação de metano em níveis mais profundos do subsolo na região. Essa medida pode complementar os estudos já em curso pela administração do campus³, de monitoramento dos níveis de metano no solo, fundações e interior de construções.

⁵ Ofício Secretária do Espaço Físico (SEF-USP): nº18/2016



Figura 5.8 – Poços de monitoramento mais profundos que não puderam ser perfilados, devido a interdição do MP: sem constatação de gás (círculos em branco) e com emissão e/ou borbulhamento de gás quando da perfuração (círculos em amarelo).

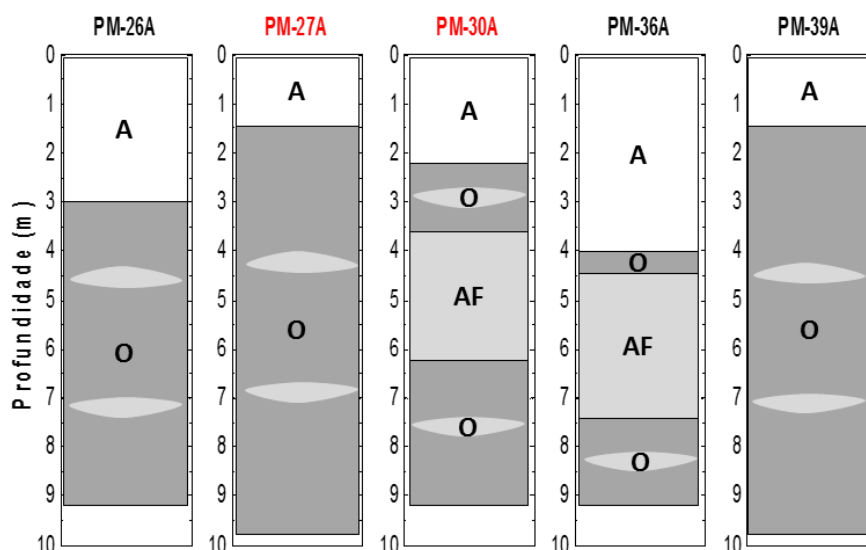


Figura 5.9 – Poços de monitoramento não perfilados. PM-27A e PM-30A são os poços em que foi detectado o borbulhamento de gás durante a perfuração, nos outros poços não foi detectado o borbulhamento durante a perfuração. Aterro (A), argila orgânica (O) e areia (AF).

Capítulo 6

Perfilagem em furos geotécnicos

Furos geotécnicos são sondagens utilizadas pela Engenharia Civil no reconhecimento e caracterização de terrenos, no intuito de determinar tipos litológicos, respectivas espessuras e profundidades, profundidade do nível d'água, entre outros. Testes e ensaios de campo podem ser realizados durante a perfuração, por exemplo, o ensaio SPT (*Standard Penetration Test*) utilizado no dimensionamento de fundações. Assim como os poços de monitoramento, os furos de sondagem possuem revestimento geomecânico para evitar o colapso das paredes do poço. Seus aspectos construtivos obedecem a critérios e normas de construção diferentes dos poços de monitoramento. Furos geotécnicos não possuem, necessariamente, filtragem (área de filtro e pré-filtro) e o preenchimento externo ao tubo geomecânico é feito com calda cimento. Normas construtivas são definidas pela NBR 6484 (ABNT, 2001).

Ensaio para a determinação da profundidade de fundações em torres de telefonia são realizados por medidas indiretas em furos geotécnicos. Uma necessidade comum no setor de telecomunicações é acomodar um número maior de antenas em torres já existentes. Para avaliar se a torre é capaz de sustentar a sobrecarga que lhe será imposta ou dimensionar o reforço necessário é necessário saber qual a profundidade do elemento de fundação. Muitas vezes a informação existente não é confiável, pois uma parcela significativa das torres não tem arquivo acessível com o projeto original. Os ensaios com medidas indiretas em furos geotécnicos possibilitam determinar a profundidade do elemento de fundação com a devida acurácia, auxiliando o projeto de engenharia que irá liberar o uso da torre ou dimensionar o reforço necessário.

Tradicionalmente os seguintes métodos sísmicos têm sido utilizados na caracterização de fundações em torres de telefonia: Método Sísmico Paralelo (*Parallel Seismic-PS*), Sísmica entre poços (*Crosshole Seismic*), Sísmica *Downhole* e *Uphole*. A combinação desses métodos, além da profundidade do elemento de fundação, permitem determinar parâmetros elásticos do solo (Gandolfo et al., 2015, Souza et al., 2015). Apesar do amplo uso, existem situações em que os métodos sísmicos não são efetivos, como por exemplo em situações em que a rocha circundante possui baixo contraste de propriedade física (velocidade das ondas sísmicas) em relação a estruturada fundação. Nessa situação, os ensaios com métodos eletromagnéticos (sondas IL) podem ser efetivos especialmente se a

fundação for composta por material metálico, embora existam poucos casos citados na literatura.

Nosso estudo com as sondas GN, ILM e ILD apresentado nesse Capítulo teve como objetivo complementar os ensaios sísmicos realizados pelo IPT em torres de telefonia. Este estudo é parte da pesquisa de Doutorado do Eng. Tiago de Jesus Souza, no Departamento de Engenharia Civil do ITA, que tem como objetivo testar e desenvolver metodologias para a caracterização de fundações em torres de telecomunicações. Sua pesquisa tem apoio logístico da American Tower (empresa do setor de telecomunicações que possui mais de um milhão de torres em seu portfólio) e conta com o apoio do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). Nosso objetivo neste estudo foi verificar se sondas IL e GN são aplicáveis em furos geotécnicos e avaliar se as respostas obtidas contribuem com o problema investigado.

Nesse Capítulo apresentamos resultados realizados em dois furos em uma torre de telefonia situada no bairro de Artur Alvim, na cidade de São Paulo. Embora apresentando resultados de dois furos apenas, perfilamos outro furo em uma torre localizada na cidade de Santana do Parnaíba-SP, no qual obtivemos resultados semelhantes. Por considerar que a base de dados de Artur Alvim é mais completa, com testes de repetição e dados complementares incluíamos apenas estes dados neste Capítulo. Os dados de Santana do Parnaíba foram utilizados no artigo: “*Combined Parallel Seismic and Induction Logging for the depth evaluation of existing telecommunication phone tower foundation partially embedded*” apresentado no Anexo 3.

6.1 - Descrição dos Furos

Os furos na torre de Arthur Alvim estão localizados na bacia de São Paulo que é composta por sedimentos quaternários e neogênicos. Um furo está situado a 0,4 m da fundação (Furo 1) e o outro (Furo 2) a 2,0 m. Os poços perfilados possuem respectivamente 18 e 15 m de profundidade.

As informações geológicas obtidas através dos furos de sondagem mostram uma camada de aterro arenoso com argila, sobre sedimentos quaternários aluvionares da Bacia de São Paulo, por sua vez assentados sobre sedimentos neogênicos da Formação Resende. A camada de aterro é essencialmente areno-argilosa (0,8 m de espessura), por vezes com entulhos diversos (restos de construção, entre outros). Os sedimentos aluvionares do

Quaternário são compostos por uma camada de argila marrom clara (2,3 m de espessura) e uma camada de argila cinza clara (3,5 m de espessura), pouco arenosa. Os sedimentos da Formação Resende, possuem intercalações de arenito argiloso e argilito arenoso, com colorações vermelha e creme, com registros de paleo-solo no topo de algumas camadas.

6.2 - Dados de perfilagem

O estudo em torres de telefonia envolveu a perfilagem de dois furos, totalizando 33 m de perfis. As medidas em profundidade foram repetidas duas vezes para cada um dos furos. Devido a problemas no arquivo de calibração da sonda, foram necessários dois dias para trabalhos de campo com descarte das medidas do primeiro dia.

A baixa qualidade das medidas já no primeiro dia de perfilagem, e a possibilidade de haver sinais interferentes (campos EM gerados pela torre), nos motivou a realizar, no segundo dia, um ensaio diferente, denominado aqui de “medidas em tempo”. Nessa modalidade de ensaio, a sonda de perfilagem é mantida em repouso a uma profundidade definida, com registro de ILM, ILD e GN a cada 150 ms. Inicialmente, as medidas foram tomadas com a sonda em superfície, em seguida baixando-o pelo interior do furo, com registros em tempo a cada 1m de profundidade, até a sonda tocar o fundo do poço. Em cada profundidade, o registro se estendeu por 3 min (180 s), gerando série temporal para análise estatística

As condições para realização das medidas no segundo dia não foram ideais, (tempo chuvoso), obrigando-nos a manter parte do equipamento de perfilagem (computador, *micrologger* e guincho) em um veículo (Kombi). Os ensaios com as “medidas em tempo” e a obtenção dos perfis convencionais demandaram cerca de seis horas de trabalho. Outro fator a comprometer a qualidade das medidas foi que durante a perfilagem a torre de telefonia e seu gerador de energia permaneceram em funcionamento.

6.3- Resultados Obtidos

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram a descrição litológica dos Furos 1 e 2 e os respectivos perfis GN, ILM e ILD. Nos dois furos, os perfis GN apresentam variações entre 50 e 100 CPS nas contagens de radiação gama, exceto na camada de argila cinza situada entre 4 e 5 m de

profundidade em ambos os poços, com variações de até 200 CPS. O perfil GN expressa, assim, a variação da quantidade de argila, não havendo variações que possam ser associadas à estaca da fundação. Isso pode ser explicado pelo fato da radiação gama ser atenuada no meio geológico, fazendo com que a radiação emitida pela porção mais próxima do sensor (alguns centímetros parede adentro do poço) contribua na leitura. Essa condição explica porque a sonda GN ainda percebeu variações litológicas mesmo estando tão próxima da fundação. As medidas dos perfis GN mostram que, apesar dos aspectos construtivos do furo, e do preenchimento do seu anel externo com cimento, os perfis GN são capazes de identificar variações litológicas com a profundidade. Em princípio, esse resultado pode não contribuir com a determinação da profundidade da estaca de fundação mas pode ser importante em outros estudos.

Os perfis ILM e ILD dos poços 1 e 2 (Figuras 6.1 e 6.2) apresentam uma resposta de caráter oscilatório com variações delimitadas por um envelope de amplitude, aproximadamente com decaimento exponencial. Esses resultados não são compatíveis com respostas de indução eletromagnética esperadas na vizinhança de uma estrutura metálica, pois em analogia com a indução eletromagnética em alvos metálicos, seria esperada respostas na forma de dipolos, com alternância de valores negativos e positivos ao longo do perfil (Telford et al ., 1990).

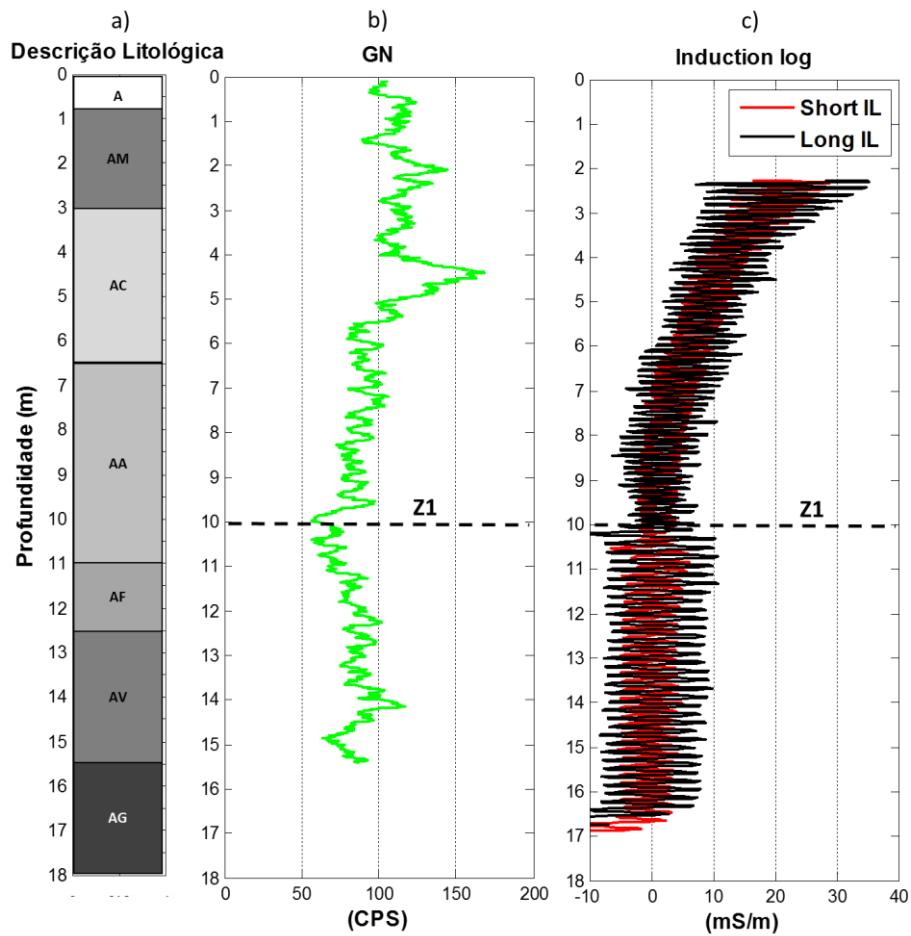


Figura 6.1- Perfis geofísicos no Furo 1 (40 cm da fundação): a) perfil litológico composto por aterro (A), argila marrom clara (AM), argila cinza clara (AC), argila arenosa (AA), areia fina (AF), argila arenosa vermelha e creme (AV), areia grossa argilosa vermelha e creme (AV); b) perfil de radiação gama natural (GN) expresso em CPS (contagens por segundo); c) perfis de indução eletromagnética em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$, ILM (vermelho) e ILD (preto). A base da fundação na profundidade Z1. Linha sólida em c), com decaimento aproximadamente exponencial é discutida no texto.

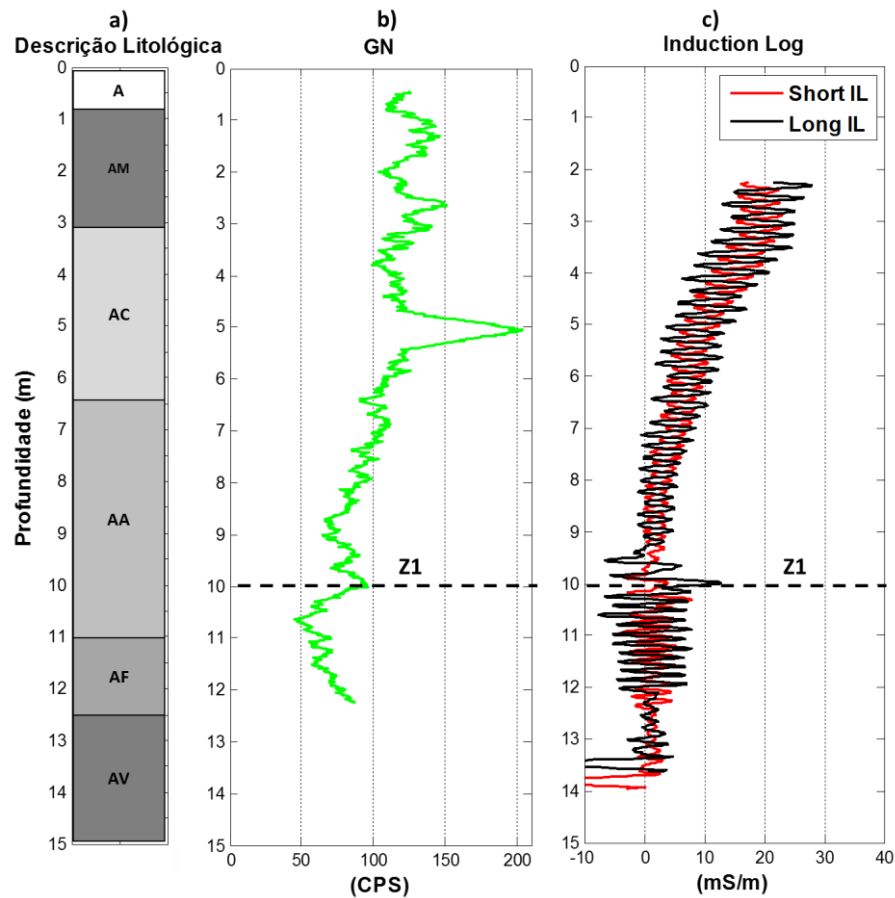


Figura 6.2- Perfis geofísicos no Furo 2 (200 cm da fundação): a) perfil litológico composto por aterro (A), argila marrom clara (AM), argila cinza clara (AC), argila arenosa (AA), areia fina (AF), argila arenosa vermelha e creme (AV), areia grossa argilosa vermelha e creme (AV); b) perfil de radiação gama natural (GN) expresso em CPS (contagens por segundo); c) perfis de indução eletromagnética em mS.m-1, ILM (vermelho) e ILD (preto). A base da fundação na profundidade Z1. Linha sólida em c), com decaimento aproximadamente exponencial é discutida no texto.

Considerou-se que tal resposta estaria relacionada a campos eletromagnéticos gerados pelas antenas ou equipamentos de potência instalados na torre de telefonia. Um dos principais motivos que nos motivaram a trabalhar com essa hipótese foi o fato das medidas em furos situados a diferentes distâncias da torre apresentarem respostas com o mesmo padrão. Para testar essa hipótese inicialmente comparamos a resposta das componentes ILM e ILD na torre de telefonia, com um local sem evidências de fontes eletromagnéticas próximas ao local de ensaio (teste em branco). Como área para “teste em branco” escolhemos o SCGR

do IAG-USP. A Figura 6.3 mostra o local do teste em branco e o local de ensaio na torre de telefonia.

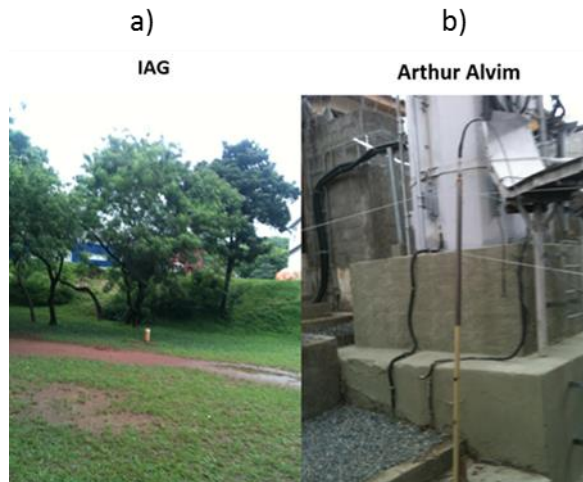


Figura 6.3- Locais com “medições em tempo com a sonda de indução eletromagnética: a) SCGR do IAG-USP . b) Torre de telefonia no bairro de Artur Alvim. As medidas no SCGR serviram como teste em branco para verificar a repetibilidade das medidas em um local sem campos interferentes nas imediações do local de medida.

A Figura 6.4 mostra as respostas das sondas ILM e ILD no teste em branco e na torre de telefonia em Artur Alvim. As séries temporais do teste em branco (IAG-USP) mostram valores de condutividade aproximadamente constantes e praticamente nulos (Figura 6.4a). Esse é o resultado que se espera de uma sonda IL quando calibrada e colocada no ar. Os valores de condutividade obtidos no na torre de telefonia, por outro lado, apresentam valores oscilantes, com média de $58 (+/- 2,8) \text{ mS.m}^{-1}$ para a sonda ILM e $4 (+/-4,6) \text{ mS.m}^{-1}$ para a sonda ILD (Figura 6.4).

A comparação entre as componentes de condutividade obtidas no IAG e no local mostram que os valores de condutividade na torre de telefonia local estão sob forte influência de um campo eletromagnético externo. Entretanto mesmo com valor absolutos próximos à zero para a sonda ILD, em Artur Alvim, é possível perceber uma perturbação maior nas condutividades obtidas no local em comparação com as medidas no IAG.

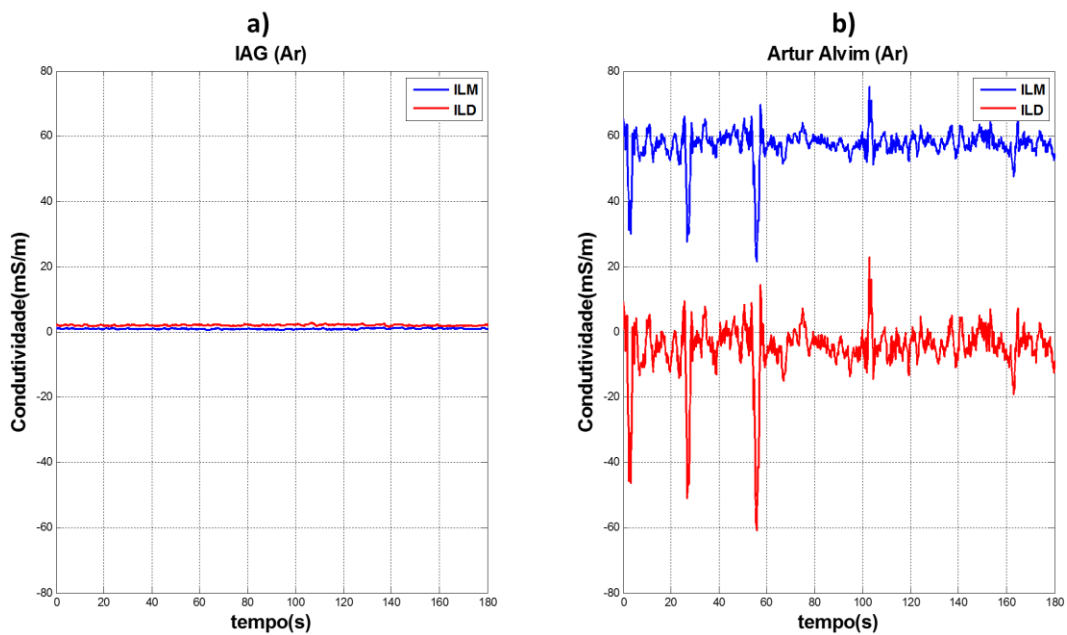


Figura 6.4 – Medidas em tempo com as sondas IL colocadas no ar. a) Medidas no IAG; Sonda ILM (azul); Sonda ILD (vermelho). b) Medidas em Artur Alvim (torre de telefonia); Sonda ILM (azul); Sonda ILD (vermelho). Tempo de aquisição de 180 s, com intervalo entre as medidas de 150 ms. Observar a constância das medidas no teste em branco (IAG) e a perturbação do sinal na vizinhança da torre de telefonia.

A Figura 6.5 mostra, resultados das medidas em tempo obtidas desde a superfície do terreno e a cada 1 m em profundidade e os erros em porcentagem associadas a essas medidas. As curvas na Figura 6.5 expressam os valores médios das medidas obtidas em cada profundidade. Tal como mostram essas figuras, o decaimento do sinal com a profundidade é aproximadamente exponencial.

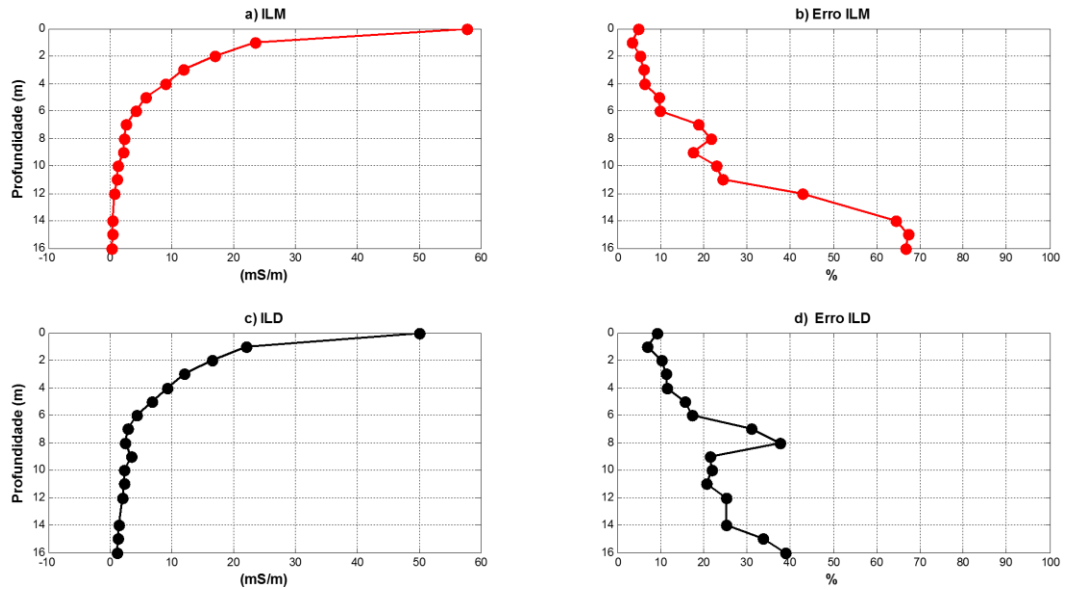


Figura 6.5- Médias aritméticas das medidas em tempo no Furo 1 em escala linear. a) sonda ILM (vermelho), em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. b) Erro sonda ILM. Medidas em tempo para a sonda ILD (preto), em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. c) sonda ILM (vermelho), em $\text{mS}\cdot\text{m}^{-1}$. d) Erro sonda ILM.

O decaimento exponencial fica mais explícito quando os dados são apresentados em escala logarítmica (Figura 6.6), com reta bem definida no perfil ILM. Esses fatores mostram que o sinal registrado pela sonda está sendo gerado na superfície, pois o campo eletromagnético decai exponencialmente com profundidade. Nessas condições podemos afirmar que a sonda IL não registra neste contexto um campo secundário, resultante da indução eletromagnética na estrutura metálica, mas atua como bobina receptora de um campo mais intenso produzido na superfície e que atenua com a profundidade.

Apesar da resposta complexa medida nesses furos, nota-se que os perfis IL (Figuras 1 e 2) nos dois poços apresentarem uma inflexão no envelope de amplitude que coincide com a profundidade da base da fundação, no caso 10 m.

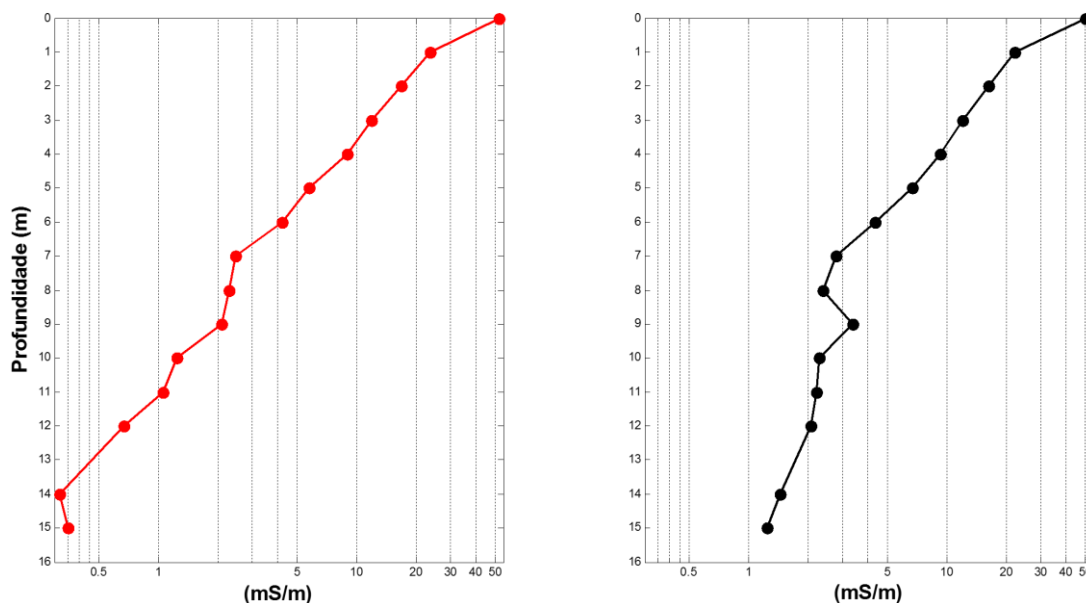


Figura 6.6 - Médias aritméticas das medidas em tempo em escala logarítmica. a) Sonda ILM (vermelho), em mS.m-1. b) Sonda ILD(preto), em mS.m⁻¹.

6.4- Discussão dos resultados

A análise do perfil IL em profundidade (Figuras 6.2 e 6.3) mostra que o sinal apresenta um caráter oscilatório com variações delimitadas por um envelope de amplitude. Esse envelope assume valor constante após a profundidade de 10 m. Por coincidência esta é a profundidade da fundação, tal como inferida por outros métodos e registros construtivos. Esse tipo de resposta foi também identificado nos testes na torre em Barueri, sugerindo que a variação registrada pela sonda talvez esteja percebendo a estrutura da fundação, talvez registrando campos emitidos pela estrutura, o que seria compatível com a inflexão do envelope de amplitudes.

Para confirmar essas hipóteses serão necessários testes adicionais com instrumentação adequada, para obter séries temporais e analisar o conteúdo espectral dos campos. Infelizmente não pudemos efetuar análises do tipo espectral pois o intervalo de amostragem (150 ms) da sonda de perfilagem é inadequado para amostrar campos de alta frequência (acima de MHz), tais como gerados em uma torre de telefonia. Outra possibilidade seria utilizar um medidor espectral portátil, com faixa de operação de kHz a MHz), inserindo-

o no furo e medindo o espectro desde a superfície até a base. A parte que atenua com a profundidade deve mostrar um desvio para frequências mais baixas, mas a que supostamente é irradiada pela estaca deveria manter o pico de frequência (já que a distância é constante), só se atenuando depois que a base da estaca fosse ultrapassada.

7- Conclusão

Perfis geofísicos de indução eletromagnética (IL) e radiação gama natural (GN) foram aplicados em diferentes tipos de poços revestidos, utilizados em investigações rasas em estudos ambientais, geotécnicos e de hidrogeologia. Os perfis geofísicos realizados nos poços tubulares (“poços artesianos”), em área de tese do SCGR (Sítio Controlado de Geofísica Rasa) do IAG/USP, mostraram que os perfis IL e GN obtidos após o revestimento dos poços identificam as mesmas variações litológicas que os perfis EL (resistividade normal longa e curta) e GN obtidos antes do revestimento. Não se observa perda significativa na caracterização das camadas atravessadas pelo poço após seu revestimento com tubo geomecânico. Pelo contrário, os perfis IL demarcam melhor que os perfis EL as unidades de baixa resistividade. Na parte aberta do poço os perfis IL mostram uma resposta mais complexa provavelmente resultante de feições condutivas associadas a fraturas. Os resultados obtidos neste teste mostram que poços originalmente perfurados para a produção de água podem ser utilizados na perfilagem geofísica, em estudos geológicos ou hidrogeológicos que necessitem de modelos geológicos mais representativos.

Nas aplicações de perfilagem para caracterizar fundações de torre de telefonia, o perfil IL determinou a profundidade da estrutura metálica da fundação, que no caso se estendia até 10 m de profundidade. Alguns fatores, tais como a atenuação com a profundidade de campos eletromagnéticos associados à torre, precisam ser melhor compreendidos. Um procedimento de investigação, baseado na análise espectral do campo medido ao longo do furo, é proposto no presente trabalho.

Em poços de monitoramento em área contaminada por DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) os perfis geofísicos melhoraram a informação geológica até então existente, discriminando unidades litológicas que nos perfis litológicos de poço apareciam como homogêneas. Os reconhecimentos de horizontes mais argilosos e da profundidade da camada de saprólito mostraram que os perfis geofísicos contribuem na identificação de camadas que em potencial podem condicionar a acumulação de contaminantes. Em poços de monitoramento em área com acumulação de metano em sedimentos orgânicos os perfis IL e GN identificaram a camada de argilito orgânico (potencial fonte geradora do metano) e camadas e lentes mais arenosas (onde o metano se acumula).

Como recomendação geral para estudos em poços de monitoramento, nossa pesquisa recomenda a perfuração de poços com maior profundidade, pelo menos dois metros a mais que o intervalo a ser investigado. Por exemplo, suponha que a investigação em um dado local deva se estender até 10 m de profundidade. Nosso trabalho recomenda que os poços nessa situação hipotética sejam perfurados pelo menos até 12 m de profundidade. Isso é necessário para estender a perfilagem até a profundidade de 10 m, descontando assim o comprimento da sonda. Poços de monitoramento muito rasos podem ter pouca serventia na perfilagem, pois limita o intervalo coberto pelos sensores.

8- Referências Bibliográficas

ABREU, E. L., 2012. Imageamento de Resistividade Elétrica de Áreas Contaminadas Utilizando Arranjos Poço-Superfície. (Tese de Mestrado em Geofísica apresentada no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP).

AHMAD et al., 2012. High-resolution seismic and resistivity profiling of a buried Quaternary subglacial valley: Northern Alberta, Canada

ALLAUD,L.,M., (1977) Schlumberger: the history of a technique. Wiley, New York.

ALMEIDA, F.F.M et. al., 1984. Tectônica da Formação Itaquaquecetuba na Grande São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 33. Rio de Janeiro, 1984. Anais... Rio de Janeiro, SBG. V4, p1794-1808.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1992, Construção de poço para captação de água subterrânea- NBR 12244.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT, 1997 - Construção de poços de monitoramento e amostragem – NBR 13895

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS –ABNT, 2001 – Construção de Furos de Sondagem – NBR 6484

BORGES & PORSANI, 2003. Investigações na borda da Bacia de São Paulo. Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 20 (3), 2002

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).

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS – CPRM, 1998, NOÇÕES BÁSICAS SOBRE POÇOS TUBULARES. Cartilha informativa.

CONEYARS, L. B., (2000). Subsurface Mapping of a Buried Paleoindian Living Surface, Lime Creek Site, Nebraska, USA., GEOARCHAEOLOGY: AN INTERNATIONAL JOURNAL Vol.15, No.8.

COSTA, W. M. et. al. (2004) Relatório ambiental preliminar: Campus USP-Leste, Prefeitura do Campus da Capital do Estado de São Paulo.

DANG et al., 2007. Biogenic gas systems in eastern Qaidam Basin. *Marine and Petroleum Geology* 25 (2008) 344–356

DOLL, H., G., 1949. Introduction to induction logging and application to logging of well drilled with oil base 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.

FITTERMAN, D.V. et al., (1991). Electromagnetic mapping of buried paleochannels in eastern Abu Dhabi Emirate, U.A.E., *Geoexploration*, 27, 111, 1991.

GANDOLFO, O.C.B.; Souza, T.J.; Aoki, P.C.; Hemi, P.S. (2015). Evaluation of unknown foundation depth using Parallel Seismic (PS) Test - a case study. In: 14^o International Congress of The Brazilian Geophysical Society - Expanded Abstracts, Rio de Janeiro.

JONES, P.H., and Skibitzke, H.E., (1956) Subsurface geophysical methods in groundwater hydrology, in Landsberg, H.E., ed., *Advances in geophysics*: New York, Academic Press, v. 3, p. 241-300.

KEAREY, P., Brooks, M. & Hill, I. 2009. *An Introduction to Geophysical Exploration*, 3rd ed. ix + 262 pp. *Oxford: Blackwell*. ISBN 0 632 04929 4.

KENT, D C., 1993. *Borehole Geophysics applied to the evaluation of groundwater monitoring well construction and integrity*. University Center for Water Research Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma.

KEYS, W.S., *Borehole Geophysics applied to Ground-Water Investigations*, National Water Well Association, Dublin, OH, 313 p., 1989.

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

MENDONÇA C.A., R. Doherty, A. Fornaro, E. L. Abreu, G. C. Novaes, S. Jr. S. Fachin, 727 M. A. La-Scalea, 2015, Integrated earth resistivity tomography (ERT) and multilevel sampling gas: a tool to map geogenic and anthropogenic methane accumulation on brownfield sites: *Environ Earth Science*. doi:10.1007/s12665-015-4111- 6.

OHM GS (1827) Die galvanische Kette: mathematisch bearbeitet [The galvanic circuit investigated mathematically]. Kessinger, Berlin, 254 pp.

PORSANI et al., 2004. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP. Rev. Bras. Geof. vol.22 no.3 São Paulo Sept./Dec. 2004

PEREZ, C, A S. O MODELO DO ELÉTRON LIVRE DE DRUDE . COMPLETA 100 ANOS Cad.Cat.Ens.Fís., v.17, n.3: p.348-359, dez.2000

Revil et al., 2012. Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. Hydrogeology Journal (2012) 20: 617–658.

RICCOMINI, C., 1989. *O Rift Continental do Sudeste Brasileiro*. São Paulo. 256 p. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da USP).

SILVA, A. 1999. Evolução Geológica da Bacia de São Paulo: Contribuição da Aquisição Geofísica. Tese de doutorado – IAG. USP.

SERVMAR, 2014, Relatório de Investigação detalhada, avaliação de risco à saúde humana e plano de intervenção na AI-01 e investigação detalhada de gases.

SCHLUMBERGER, 1998, Log Interpretation, Volume II, Applications: Schlumberger 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. Department of Energy, 130 p.

SOUZA, T.J; Aoki, P.C.; Valverde, R.M.; Valverde, S, 2015, G Utilização do PIT para o Mapeamento de Fundações em Estruturas de Telecomunicações. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, São Paulo. SEFE 8: 117-127.

SOUZA FILHO, M, N. Avaliação do Potencial Geotermal da Bacia de Taubaté- São Paulo-SP. Tese de Mestrado.

TAKIHA, H. Estudo da sedimentação neogênico-quadernária no município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana. 1997. 152 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo

TELFORD, V.M; Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics. Cambridge University Press, Cambridge.

TURCQ, B; A.L.S. Albuquerque, R.C; Cordeiro; A. Sifeddine; F.F.L. Simoes Filho; A.G. Souza; J.J. Abrão; F.B.L. Oliveira; A.O. Silva; J. Capitâneo, 2002, Accumulation of organic carbon in five Brazilian Lakes during the Holocene. *Sedimentary Geology* 148 (2002) 319–342.

TURCQ et al., 1997. Paleohydrology and Paleoclimate of the Past 33,000 Years at the Tamanduá River, Central Brazil. *QUATERNARY RESEARCH* 47, 284–294 (1997) ARTICLE NO. QR971880.

WOLLENBERG, H, , 1977. Radiometric Methods. In : Morse, J. G (ed), *Nuclear Methods in Mineral Exploration and Production*. Elsevier Science, Amsterdam 5-36.

9 -ANEXOS

.