UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE SISTEMA DE
MEDIDA DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO
DE FREQUÊNCIAS (0,13Hz a 11,11kHz) PARA
APLICAÇÃO EM AMOSTRAS DE SOLOS/ROCHAS.**

Douglas Bastianon

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2001

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE SISTEMA DE
MEDIDA DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO
DE FREQUÊNCIAS (0,13Hz A 11,11kHz) PARA
APLICAÇÃO EM AMOSTRAS DE SOLOS/ROCHAS**

DOUGLAS BASTIANON

Orientador: Prof. Dr. Fabio Taioli

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	Nome	Assinatura
Presidente:	Prof. Dr. Fabio Taioli	
Examinadores:	Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga	
	Prof. Dr. Carlos Alberto Mendonça	
	Dr. José Domingos Faraco Gallas	
	Prof. Dr. Vagner Roberto Elis	

SÃO PAULO
2001

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**DESENVOLVIMENTO E TESTES DE SISTEMA DE MEDIDA
DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA NO DOMÍNIO DE
FREQUÊNCIA (0,13Hz A 11,11kHz) PARA APLICAÇÃO EM
AMOSTRAS DE SOLOS/ROCHAS**

DOUGLAS BASTIANON

ORIENTADOR: PROF. DR. FÁBIO TAIOLI

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE RECURSOS MINERAIS E HIDROGEOLOGIA

TESE DE DOUTORAMENTO

SÃO PAULO

2001

DEDALUS - Acervo - IGC

30900008518

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Milton B. Mendes (*in memorian*) por ter me aceito como seu aluno de doutorado.

Ao Prof. Dr. Fábio Taioli por ter assumido a orientação e pela paciência a mim concedida.

À CAPES e ao IGc-USP por terem me concedido a bolsa de doutorado.

À colega Márcia Mika Saito por ter me fornecido o lamito, objeto de estudo de sua dissertação, utilizado nas amostras testadas.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT pelo fornecimento da areia NBR-7214/82 utilizada na confecção das amostras.

Enfim, à todos os amigos, colegas, funcionários que de uma forma ou outra contribuíram para este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO **1**

2 O MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA **3**

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

2.2 FENOMENOLOGIA DO MÉTODO I.P.

2.2.1 POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA

2.2.2 POLARIZAÇÃO DE ELETRODO

2.3 PARÂMETROS UTILIZADOS NA MEDIDA DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA

2.4 METODOLOGIA

2.5 APLICAÇÕES DE RESISTIVIDADE COMPLEXA NO ESTUDO DA
CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E MEIO AMBIENTE.

2.6 POLARIZAÇÃO INDUZIDA EM PROSPECÇÃO MINERAL

3 INSTRUMENTO DESENVOLVIDO **18**

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

3.2 TRANSMISSOR

3.2.1 CIRCUITO GERADOR DA BASE DE TEMPO

3.2.2 FONTE DE CORRENTE

3.3 SISTEMA DE RECEPÇÃO DO SINAL

3.3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

3.3.2 AMPLIFICADORES "LOCK-IN"

3.3.3 SISTEMA DE ATRASO DE FASE

3.3.4 SISTEMA DE MEDIDA DE FASE

3.3.5 CIRCUITO DE SELEÇÃO DOS PULSOS ENVIADOS AO CONTADOR

3.3.6 CIRCUITO CONTADOR - MEDIDA DE FASE

3.3.7 DETECTOR SÍNCRONO

4 ENSAIOS PRELIMINARES EM LABORATÓRIO **43**

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

4.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS **50**

6 CONCLUSÕES **55**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO 1	64
ANEXO 2	66

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	página
Figura 2.1 – Formas de onda usadas no método da polarização induzida	3
Figura 2.2 – Esquema ilustrativo do desenvolvimento de polarização de membrana	5
Figura 2.3 – Formas de onda usadas na técnica de IP, no domínio de frequências	7
Figura 2.4 – Formas de onda para medidas do ângulo de diferença de fase	8
Figura 2.5 – Curva de decaimento do potencial utilizado na medida de cargabilidade	10
Figura 2.6 – Configurações dos arranjos dipólo-dipólo, pólo-dipólo e gradiente	12
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do instrumento	18
Figura 3.2 – Circuito gerador da base de tempo	20
Figura 3.3 – Amplificador operacional utilizado como fonte de corrente	22
Figura 3.4 – Visor do osciloscópio com as formas de onda	22
Figura 3.5 – Circuito da fonte de corrente	23
Figura 3.6 – Visor do osciloscópio, mostrando o sinal misturado ao ruído	25
Figura 3.7 – Diagrama esquemático de um sistema de detecção síncrona	26
Figura 3.8 – Formas de onda presentes nas várias etapas de um detector síncrono	28
Figura 3.9 – Tensão de saída em função da fase no D.S.F.	29
Figura 3.10 – Formas de onda do circuito de atraso de fase	32
Figura 3.11 – Circuito de atraso de fase	33
Figura 3.12 – Diagrama do circuito de seleção dos pulsos	35
Figura 3.13 – Circuito de seleção de pulsos	37
Figura 3.14 – Circuito do contador	38
Figura 3.15 – Circuito do receptor	40
Figura 3.16 – Vista frontal do sistema desenvolvido	41
Figura 3.17 – Vista interna do sistema	41
Figura 3.18 – Curva de calibração do sistema	42
Figura 4.1 – Detalhe da mistura do contaminante com a amostra	44
Figura 4.2 – Detalhe do porta amostras	45
Figura 4.3 – Diferença de fase para amostra de areia contendo 10% de bentonita	46

FIGURA	página
Figura 4.4 – Diferença de fase para amostra de areia contendo 5% de lamito	47
Figura 4.5 – Diferença de fase para amostra de areia contendo 10% de lamito	47
Figura 4.6 – Resistividade para amostra contendo 10% de bentonita	48
Figura 4.7 – Resistividade para amostra contendo 5% de lamito	48
Figura 4.8 – Resistividade para amostra contendo 10% de lamito	49

LISTA DE TABELAS

TABELA	página
Tabela 1 – Valores de resistividade ρ_{dc} das amostras	53
Tabela 2 – Efeito frequência expresso em percentagem para as amostras	53
Tabela 3 – Diferença percentual do PFE em relação à amostra não contaminada	54

RESUMO

Foi desenvolvido aqui um sistema de medida de polarização induzida no domínio de frequência (0,13 Hz a 11,11 kHz) para ser utilizado em amostras no laboratório. O sistema apresenta versatilidade de construção, permitindo modificações internas de acordo com as necessidades experimentais e grande precisão mesmo em locais com condições desfavoráveis devido ao ruído ambiental. Testes são executados com amostras de areia misturadas com argila e contaminadas com gasolina pura, gasolina comum e etanol. De uma maneira geral os resultados mostram uma diferenciação entre as amostras contaminadas e as não contaminadas, principalmente na medida “Percentual de Efeito Frequência”.

ABSTRACT

This thesis presents the development of an Induced Polarization measurement system in the frequency domain (0.13 Hz to 11,11 kHz) to be used in laboratory studies. The system presents construction versatility, allowing internal modifications in accordance with experimental necessities and high accuracy even in places with adverse conditions because of noise. Tests are executed with samples of a mix of sand and clay contaminated with pure gasoline, common gasoline and ethanol. In a general way, the results show a difference between the contaminated and non-contaminated samples, mainly in the measure of "Percent Frequency Effect".

1 INTRODUÇÃO

A contaminação do solo e das águas subterrâneas por compostos químicos é um sério problema ambiental. A avaliação dessas ocorrências demanda sempre grandes esforços com alto custo de perfuração e de análises químicas de amostras retiradas do subsolo. A possibilidade de utilizar técnicas geofísicas na superfície do terreno de forma não invasiva, pode constituir um grande benefício, economizando tempo, custos e ainda minimizando a amostragem via perfurações no terreno.

Nos últimos 80 anos, os métodos geofísicos foram desenvolvidos principalmente para prospecção de petróleo e minerais. Os equipamentos utilizados também avançaram bastante assim como a experiência acumulada na avaliação e interpretação dos dados. A geofísica aplicada a problemas ambientais é uma ciência recente e emprega os conhecimentos acumulados da prospecção mineral e de petróleo adaptadas para os objetivos pouco profundos.

Métodos elétricos e eletromagnéticos são utilizados quando compostos químicos inorgânicos aumentam a condutividade das águas subterrâneas. Compostos orgânicos, pela alta resistividade, em geral, limitam a aplicação desses métodos. Recentemente, de forma incipiente, a Polarização Induzida (IP) tem demonstrado potencialidade em indicar contaminação dos solos por compostos químicos orgânicos (Olhoeft, 1986; Vanhala *et al.*, 1992).

No entanto, é escassa a literatura a respeito do comportamento das propriedades elétricas do meio, quando contaminados por compostos orgânicos, e portanto, trabalhos experimentais em condições controladas são necessários para evolução do conhecimento do problema.

Medidas de laboratório foram executadas com sistemas compostos pela associação de equipamentos comerciais propriamente construídos para outras áreas da ciência, ou ainda, pela adaptação de um equipamento destinado à geofísica aplicada (Gudjurgis, 1994) para uso no

laboratório. Nessas aplicações, os equipamentos são de altíssimo custo e os destinados ao campo são construídos para operar em condições diferentes relativas ao ruído eletromagnético ambiental e também à magnitude do sinal transmitido ao meio.

São objetivos principais deste trabalho, o desenvolvimento de um sistema de medidas de Polarização Induzida no domínio de frequência, para ser utilizado em amostras de solo ou rocha em laboratório. O sistema deve ser capaz de operar em grande intervalo de frequência (até algumas milhares de hertz), ter excelente rejeição a ruídos e transmitir corrente elétrica para ser injetada na amostra com baixíssimo valor (dezenas de microamperes) e altíssima estabilidade. Devido as poucas informações disponíveis sobre essas medidas, é interessante que as soluções apresentadas sejam simples e versáteis de forma que modificações possam ser implementadas, de acordo com as necessidades experimentais.

São também objetivos deste trabalho aplicar a metodologia em experimentos controlados utilizando como contaminantes combustíveis nacionais os quais possuem características particulares para o Brasil.

2 O MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma vez interrompida a circulação da corrente elétrica (I) aplicada em certos corpos, o campo elétrico no meio não desaparece imediatamente, mas de forma gradual (Figura 2.1). Este fenômeno chama-se Polarização Induzida (IP) (Orellana, 1974, Sumner, 1976).

Desde algumas décadas sabe-se que o efeito de I.P. pode ocorrer em mineralizações de metais disseminados, onde é conhecido como polarização de eletrodo (Nelson & Van Voorhis, 1983), e na presença de argilas no meio, é conhecido como polarização de membrana (Ogilvy & Kuzimina, 1972; Vacquier *et al.*, 1957; Bodmer *et al.*, 1968).

No geral, a magnitude dos efeitos de IP provocados por polarização de membrana são menores que para polarização de eletrodo (Sumner, 1976). A descrição dos efeitos, dos parâmetros medidos e da metodologia do método IP é feito a seguir.

2.2 FENOMENOLOGIA DO MÉTODO I.P.

2.2.1 POLARIZAÇÃO DE MEMBRANA

Argilas com cargas elétricas não compensadas em suas faces ou nas bordas de camadas, atraem uma nuvem difusa de íons positivos (Figura 2.2a). Quando as argilas estão distribuídas nos microporos da rocha ou do solo, estes íons podem bloqueá-los total ou parcialmente. Então, uma zona de passagem seletiva de íons é criada, onde os ânions são retidos e os cátions "atravessam" normalmente.

Quando o meio é submetido ao campo elétrico, a distribuição dos íons no eletrólito deve variar. Como as partículas de argilas permanecem imóveis, são criadas zonas de concentração e deficiência de carga nas imediações da zona de passagem seletiva de íons ou membrana (Figura 2.2b) Essas variações de concentração de íons, opõem-se ao fluxo da corrente e causam polarização. Esses mecanismos não são causados por processos chamados "Faradaicos", que ocorrem nos condutores elétricos em contato com o eletrólito, onde as transferências de cargas são devidas a oxidação-redução e difusão de íons, e não há ocorrência de reações químicas entre as interfaces e a solução.

Figura 2.2 Esquema ilustrativo do desenvolvimento de polarização de membrana no microporo, modificado de Sumner (1976):

a) antes da aplicação do campo elétrico

b) após a aplicação do campo elétrico

Sedimentos arenosos, em que argilas estão presentes em menor quantidade, têm apreciável efeito de polarização. Corpos massivos de argila podem apresentar maior ou menor efeito, dependendo do tipo de argila e do estado em que se encontra (Bodmer *et al.*, 1968).

2.2.2 POLARIZAÇÃO DE ELETRODO

Conforme referido anteriormente, esse fenômeno ocorre na presença de partículas metálicas imersas num eletrólito, situação geralmente observada nas mineralizações de sulfeto disseminado.

No contato entre a superfície metálica e o eletrólito, estando o meio submetido a um campo elétrico, ocorre a mudança do mecanismo de condução, que passa de eletrônica para iônica. Este fenômeno acontece no modo inverso, nas superfícies opostas do mesmo corpo; enquanto uma recebe elétrons do meio (eletrólito), a outra cede. Dessa forma, acumulam-se íons nessas proximidades, e ao suprimir o campo elétrico externo, a distribuição desses íons tende a voltar ao estado original, que ocorre após um intervalo de tempo onde o corpo permanece polarizado.

2.3 PARÂMETROS UTILIZADOS NA MEDIDA DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA

A forma usual para medir o efeito de IP do meio, é introduzir corrente elétrica de forma pulsada e periódica no subsolo, através de um par de eletrodos cravados na superfície. No outro conjunto, adequadamente posicionado com relação aos primeiros, mede-se as variações da voltagem em função do tempo ou da frequência do sinal transmitido.

Denomina-se IP no domínio de frequências quando a corrente é transmitida ao subsolo em um sentido e a seguir revertida, periodicamente. Pela leitura do potencial, analisa-se a mudança da resistividade do meio em função das frequências transmitidas (Figura 2.3). Se a diferença de fase entre os sinais transmitido e recebido também é medida, tem-se a Resistividade Complexa (CR). A idéia básica ao utilizar-se o domínio de frequências, é que os fenômenos responsáveis pela polarização do meio, necessitam de um "certo tempo" para manifestarem-se.

Figura 2.3 Formas de onda usadas na técnica IP, no domínio de frequências. f_1 e f_2 são duas frequências diferentes nas quais se mede as diferenças de potencial V_1 e V_2 , respectivamente.

Comumente, a variação da resistividade para corrente contínua e alternada é expressa numa relação chamada de Efeito Frequência (E.F.):

$$EF = \frac{\rho_{dc} - \rho_{ac}}{\rho_{dc}} \quad (2.a)$$

onde: ρ_{ac} é a resistividade aparente medida para corrente alternada;

ρ_{dc} é a resistividade aparente medida para corrente contínua.

Quando EF é expresso em porcentagem, denomina-se PFE.

$$PFE = EF \times 100\% \quad (2.b)$$

No domínio de frequências, pode-se medir a diferença de fase do sinal transmitido (corrente) e o recebido (diferença de potencial elétrico). Para dois sinais senoidais de mesma frequência, ilustrados na Figura 2.4, pode-se compará-los e determinar a diferença de fase como fração do comprimento de onda ou ainda como intervalo de tempo.

Figura 2.4 Formas de onda para medidas do ângulo de diferença de fase α entre os sinais transmitido e recebido.

A partir das medidas de resistividade e do ângulo de diferença de fase pode-se usar um diagrama de Argand, obtendo-se a parte real e imaginária da resistividade. Alguns equipamentos determinam simultaneamente essas duas componentes, onde a parte real é denominada *medida em fase* e a imaginária, *medida fora de fase* ou *quadratura*. A partir daí, o ângulo de diferença de fase α pode ser calculado por:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_{imag}}{V_{real}} \quad (2.c)$$

onde: V_{imag} é a componente imaginária do potencial;

V_{real} é a componente real do potencial.

Dá-se o nome de Polarização Induzida no Domínio do Tempo quando, entre os pulsos de corrente com sentidos contrários, existe um período de tempo sem nenhum sinal transmitido no qual se mede a relaxação do potencial no meio. O parâmetro que expressa a relaxação é conhecido por *Cargabilidade* (M), dado por:

$$M = \frac{V_s}{V_p} \quad (2.d)$$

onde V_s e V_p estão indicados na Figura 2.1.

Devido à dificuldade em medir a tensão V_s em um determinado instante, os equipamentos efetuam sua integração em um intervalo de tempo (Figura 2.5). Nesse caso, M é dado por:

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt}{V_p} \quad (2.e)$$

onde: $t_2 - t_1$ definem um intervalo de tempo da curva de decaimento.

Esses parâmetros definidos acima, dependem do intervalo de tempo decorrido entre o corte da corrente e a execução da medida, e também do intervalo de integração. Portanto, essas medidas não têm sentido se não forem especificados esses valores de tempo.

Figura 2.5 Curva de decaimento do potencial utilizado na medida de cargabilidade, pela integração em um intervalo de tempo

2.4 METODOLOGIA

As medidas de campo de IP são feitas de modo semelhante às empregadas em eletrorresistividade, podendo ser usadas para investigar mudanças na *polarizabilidade* do subsolo em sentido vertical (sondagem de IP), como lateralmente a uma profundidade constante (caminhamento de IP). No caminhamento ou sondagem, tanto no domínio do tempo ou de frequência, basicamente é introduzido corrente elétrica por meio de um par de eletrodos cravados no solo e captado a resposta do subsolo (diferença de potencial) em outros dois. As medidas desse potencial durante o período de carga nos domínios do tempo ou de frequências (baixas), podem ser utilizadas para o cálculo da resistividade aparente.

Algumas vezes, nos arranjos de grandes aberturas de eletrodos em áreas de baixa resistividade, os circuitos transmissor e receptor (equipamento + eletrodos + cabos de transmissão/recepção + subsolo) comportam-se como primário e secundário de um transformador, ocorrendo acoplamento eletromagnético. Portanto, correntes parasitas (*eddy*) criadas no subsolo opõe-se à mudança fluxo do campo magnético, decorrente da variação da

corrente transmitida ao solo. Essas correntes também variam com a frequência e criam efeitos semelhantes a corpos polarizáveis (Hohmann, 1990). O procedimento inicial para minimizar o acoplamento eletromagnético é a escolha correta do arranjo de eletrodos. Nos arranjos pólo-pólo (alinhados), Wenner, Schlumberger e tipo gradiente com grandes aberturas de eletrodos de corrente, as medidas provavelmente estarão afetadas por acoplamento eletromagnético, e dessa forma, nunca devem ser usados nas áreas de baixa resistividade (Hohmann, 1990).

Algumas vezes, no método Polarização Induzida a relação entre o campo elétrico gerado no meio e a densidade de corrente não é linear, isto é, a relação entre essas grandezas não é expressa pela lei de Ohm. Portanto esse aspecto deve ser considerado na aplicação da metodologia, principalmente em laboratório, onde os valores de corrente elétrica utilizados devem ser necessariamente baixos (microamperes).

Usando Modelamento numérico bidimensional, Coggon (1973) estudou anomalias de I.P. em corpos com geometria simples. De forma comparativa, para os arranjos pólo-dipólo, dipólo-dipólo e gradiente (Figura 2.6) analisou-se: a magnitude e resolução da resposta, nas situações de, mergulho da estrutura; o efeito de uma camada superficial e a possibilidade de acoplamento eletromagnético. Os resultados indicaram que:

- No arranjo dipólo-dipólo, as anomalias são usualmente grandes, porém tem-se poucas informações sobre o mergulho da estrutura. São fortemente influenciadas por irregularidades do recobrimento.
- Anomalias observadas nos arranjos pólo-dipólo e dipólo-dipólo são da mesma ordem de magnitude, têm a mesma forma geral porém observa-se uma relativa assimetria e menor resolução no modo pólo-dipólo.
- O arranjo gradiente fornece informações sobre o mergulho da estrutura; no entanto, as anomalias são afetadas por irregularidades do recobrimento, e também surgem

dificuldades na discriminação em profundidade. A interferência devido ao acoplamento eletromagnético, já descrito, é menor no arranjo dipólo-dipólo que no pólo-dipólo. Por sua vez, o arranjo gradiente é bastante influenciado.

2.5 APLICAÇÕES DE RESISTIVIDADE COMPLEXA NO ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E MEIO AMBIENTE.

A investigação de ocorrências de contaminação por meio de perfuração fornece grande quantidade de informações físico-químicas do subsolo, porém apresenta os inconvenientes como alto custo, amostragem localizada e, ainda, pode abrir caminho para expansão dos contaminantes, ao atravessar uma camada confinante.

Técnicas geofísicas de superfície, aplicadas em situações favoráveis podem auxiliar nessas investigações, fornecendo informações sobre o nível d'água, as camadas confinantes do aquífero, a profundidade do embasamento e outras feições geológicas e hidrogeológicas.

Os fenômenos de migração dos contaminantes podem ser extremamente complexos, pois uma série de fatores tais como: presença de diferentes contaminantes no meio, heterogeneidades locais, atividade biológica entre tantas outras, podem afetar o transporte desses componentes químicos (Fetter, 1993). As ocorrências de contaminação orgânica, em geral, são as mais representativas dessas situações. Assim, informações adicionais fornecidas por técnicas geofísicas podem ser de grande valor para a escolha do melhor modelo de migração desses contaminantes. Por meio de medidas geofísicas feitas periodicamente na mesma área contaminada, pode-se monitorar o comportamento do poluente ao longo do tempo.

Em adição às informações hidrogeológicas e culturais na caracterização do problema, os métodos geofísicos, muitas vezes, podem detectar e mapear diretamente a extensão de contaminação devido a contaminantes inorgânicos e, mais recentemente ainda de forma incipiente, a de orgânicos.

O mapeamento de contaminação inorgânica por métodos eletromagnéticos e eletrorresistivos tem sido muito utilizado (Kelly, 1976; Ebrahenm *et al.*, 1990) o qual não será discutido aqui.

Quanto aos contaminantes orgânicos, as técnicas atuais que estão sendo utilizadas são a Resistividade Complexa (Olhoeft, 1986; Olhoeft & King, 1991; Towle *et al.*, 1985) e o georadar (GPR) citados em Brewster *et al.* (1992), Sauck *et al.* (1998) e Benson (1995).

Trabalhos experimentais executados em laboratório, paralelos aos de campo, com amostras em condições controladas, podem ser vistos em Vanhala *et al.* (1992); Borner *et al.* (1993); Olhoeft (1985); Gudjurgis (1994), descritos a seguir. Apesar da importância do sistema de medidas e também as condições em que estas foram executadas, nesses trabalhos não se encontram essas informações detalhadamente. Somente Vanhala *et al.* (1995) realizaram um estudo bastante completo, considerando-se os vários parâmetros envolvidos na realização da medida em laboratório, principalmente no que se refere ao acoplamento da amostra com os equipamentos eletrônicos de medida. São avaliados parâmetros tais como: dimensões do porta-amostras, posição do arranjo dos eletrodos de corrente e potencial, densidade de corrente a ser injetada na amostra e impedância de entrada, do instrumento de recepção do potencial. Também é comparada a qualidade dos dados obtidos a partir de diferentes tipos de eletrodos de potencial. Verificou-se que o manuseio de material, quer introduzindo ou retirando para medida, afetou ligeiramente os resultados finais.

O espectro de resistividade complexa para amostras de poço provenientes de uma área, de solo basicamente composto por montmorilonita, utilizada para disposição de resíduos orgânicos e inorgânicos, em Henderson (Nevada, E.U.A.), apresentou curvas distintas entre as contaminadas e as não contaminadas (Olhoeft, 1986). Essas últimas mostraram maior diferença de fase para baixas frequências (0,1 a 10Hz), comparativamente às contaminadas. Esta

característica inverteu-se para frequências mais baixas (0,001 a 0,1Hz), e pode ser interpretada como resultado da atenuação dos processos de troca iônica devido ao composto orgânico (Olhoeft, 1985, 1986). Comportamento semelhante foi encontrado por Towle *et al.* (1985) em solos contaminados por hidrocarbonetos.

Num outro local (Willow Springs, Louisiana, E.U.A.), com características semelhantes de composição do solo, e também contaminado por orgânicos e inorgânicos, Olhoeft (1986), observou um espectro diferente do anterior, sugerindo que os métodos eletrorresistivos com frequência inferior a 1Hz poderiam ser empregados no mapeamento da contaminação.

Amostras de tills de baixo conteúdo de argilas foram contaminadas (Vanhala *et al.*, 1992) com compostos orgânicos, e analisadas como nos casos anteriores. Os comportamentos com relação à diferença de fase, são semelhantes aos obtidos por Olhoeft (1985 e 1986), onde observa-se decréscimo na diferença de fase para baixas frequências.

Börner *et al.* (1993) trabalhando em laboratório com amostras moídas de bentonita (88 % de montmorilonita, 12 % quartzo), contaminadas com a mistura de óleos e substâncias anticorrosivas, constatou que estas apresentam um espectro distinto na parte imaginária e idêntico na parte real, da mesma amostra saturada com uma solução de NaCl. Amostras compostas principalmente por caolinita (87 % caolinita, 11 % ilita, 2 % quartzo) contaminadas com ácido nítrico a baixa concentração, e com os mesmos compostos orgânicos utilizados na bentonita, não apresentaram variação significativa na parte imaginária. Este comportamento observado pode ser devido a pequena superfície específica da caolinita ($5,63 \text{ m}^2/\text{g}$) em relação à bentonita ($51,40 \text{ m}^2/\text{g}$). Foi notado também, um aumento relativo da condutividade real em amostras contaminadas com orgânicos, causado pelo aumento da sua condutividade hidráulica.

Gudjurgis (1994) em uma série de experimentos de I.P. realizados em laboratório com equipamentos de campo, mediu a cargabilidade, o efeito de frequência e a diferença de fase em amostras de areia misturadas com argila (montmorilonita ou caolinita), e às vezes contaminadas com gasolina. As medidas mostraram a grande sensibilidade da técnica com relação à capacidade de troca iônica do meio e, portanto, ao conteúdo de argilas, e ainda a possibilidade do emprego da mesma para indicar a presença de contaminação em condições favoráveis. Foi notado também que amostras contendo caolinita sofreram alteração em ρ_{dc} quando contaminadas por gasolina, o que não ocorreu quando a argila presente era a montmorilonita.

Amostras de areia, till, silte e cascalho contaminados artificialmente com óleo lubrificante (Vanhala, 1997) novo e também usado, apresentaram um comportamento distinto no transcorrer do tempo. Imediatamente após a contaminação ocorreu um decréscimo de fase e amplitude do sinal que se inverteu após alguns dias. Quando as medidas foram executadas com solo real, estes apresentaram feições semelhantes aos obtidos em laboratório. Dentre os parâmetros controlados no experimento, a mineralogia, a distribuição granulometria, a umidade do solo, o tipo de óleo e sua concentração não obteve-se correlações.

Experimentos em alta frequência (2 a 250 MHz) executados por Darayan *et al.* (1998), para medidas de constante dielétrica e condutividade, em amostras contaminadas por óleo diesel, apresentaram uma resposta distinta em todo espectro para ambas as propriedades.

Estimativas da condutividade hidráulica em aquíferos sedimentares, podem ser vistas em Börner *et al.* (1996) e Weller e Börner (1996). Por meio da interpretação quantitativa de dados de resistividade complexa obtidos em laboratório e também indiretamente por sondagens na superfície, esses autores desenvolveram um algoritmo que juntamente com os dados da condutividade elétrica do fluido presente permite calcular a condutividade.

2.6 POLARIZAÇÃO INDUZIDA EM PROSPECÇÃO MINERAL

Em situações favoráveis, o método tem-se mostrado muito prático para a detecção de mineralizações de metais disseminados, ou ainda para a localização de minerais de interesse econômico associados a eles (Hallof & Yamashita, 1990).

Em outros trabalhos são investigadas as correlações entre a resposta I.P. do local e os parâmetros da ocorrência mineral. Usando uma série de levantamentos de campo, Zonge & Wyhn (1975) analisaram o comportamento da resistividade complexa devido às rochas encaixantes da mineralização.

Pelton *et al.* (1978) realizaram medidas de fase, do efeito frequência e da cargabilidade em mineralizações conhecidas, usando pequenas aberturas de eletrodos de forma a captar somente a resposta do mineral, e elaboraram um modelo de relaxação do potencial no meio (modelo de Cole-Cole).

Por meio de medidas de IP, executadas em locais nos quais se conhece a mineralização, Vanhala & Penttoniemi (1992), procuraram identificar características peculiares no sinal que possam eventualmente ser tomadas como uma "assinatura" daquele depósito mineral. Também, a associação de parâmetros de I.P. com conteúdos de sulfetos é discutida por Nelson & Van Voorhis (1983). Aplicações menos frequentes em outras atividades podem ser vistas em petróleo (Steinberg, 1991) e em geotecnia (Braga, 1997), onde nesta última correlaciona-se o ensaio SPT (Standard Penetration Test) a parâmetros IP e de eletrorresistividade do local estudado.

Um extenso trabalho de revisão, englobando várias áreas de aplicação tais como, prospecção mineral, geologia ambiental, geologia de engenharia, etc. é realizado em Gallas (2000).

3 INSTRUMENTO DESENVOLVIDO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Convencionaremos separar aqui, os circuitos eletrônicos que compõe o instrumento, em transmissor onde são gerados todos os sinais necessários para enviar correntes elétricas para as amostras, e módulo receptor que executa a medida de amplitude e diferença de fase do potencial proveniente do material estudado.

Durante o desenvolvimento do equipamento se optou pelas soluções simples, desde que não interfiram na qualidade das medidas. Os componentes eletrônicos utilizados são, em sua maioria, de uso geral, porém alguns têm alta qualidade, propriedade indispensável para o bom funcionamento do aparelho, e são colocados em pontos cruciais para essa medida, conforme chamaremos atenção a seguir.

Figura 3.1 Diagrama esquemático do instrumento

3.2. TRANSMISSOR

3.2.1 CIRCUITO GERADOR DA BASE DE TEMPO

Conforme a Figura 3.1, todos os sinais, ou seja, as frequências de funcionamento do sistema são oriundos do mesmo oscilador. Portanto, basicamente o que se faz é obter as frequências necessárias para o funcionamento, por meio de divisões sucessivas desse sinal, que é estável e de alta frequência.

Na Figura 3.2, o componente U1, que é um oscilador de quartzo disponível em circuito integrado, gera um sinal de 32 MHz que é introduzido em uma cascata de divisores de frequência composta por *flip-flops* tipo D (74HC74) que fazem a divisão por 2 e contadores (74HC4017) a divisão por 10 e também por 9. Chaves Analógicas (74HC4066) comandados no painel do instrumento, fazem as conexões entre os divisores na placa do circuito de forma a se obter o perfeito funcionamento.

Assim, por meio da chave SH1, que atua em U5 e U7, e SH2 em U11, U16 e U17, seleciona-se as frequências desejadas. Por SH1 opta-se pelos valores de 1,38; 2,77; 5,55; e 11,11 e SH2 pelo expoente de 10, ou seja, 10^{-1} , 10^0 , 10^2 e 10^3 . Assim, por exemplo, SH2 na posição 0,1, estão disponíveis as frequências de 0,138; 0,277; 0,555 e 1111,11 Hz, totalizando 25 no intervalo de 0,138 a 11,11kHz.

Ao selecionar uma das frequências, um sinal com uma frequência 28 800 vezes superior é automaticamente enviado para o circuito de medidas de fase, operação executada por U7, U8, U9, U10 e U11. No intervalo de 1,38kHz a 11,11kHz, a frequência fica reduzida para 2880 vezes.

Title: Circuito de Geracao do Base de Tempo

Size: A2

Number: 3.2

Rev: 1

Date: 10/10/2010

Drawn by: [Signature]

Sheet: 1 of 1

Circuitos compostos por *flip-flops*, em geral, ao se ligar à alimentação podem apresentar estados lógicos que não se reproduzem em suas saídas. Quando isso acontece, problemas relativos a sincronismo de sinais podem ocorrer dependendo do projeto do circuito. Portanto, um pulso momentâneo (alto ou baixo) é enviado a todos os componentes da placa, de forma que a operação seja sempre iniciada com os mesmos níveis lógicos nas saídas dos componentes. Por meio de um *Schmitt-trigger* (Horowitz & Hill, 1989), U24, essa operação é automática ao se ligar o instrumento.

Pode parecer redundante o uso de chaves rotativas no painel do instrumento, no comando de chaves analógicas na placa, porém isso se deve a existência de altíssimas frequências que exigem cuidados especiais na construção dessa placa. Foram tomadas as seguintes precauções: minimizou-se as distâncias entre componentes, evitou-se a utilização de fios para transmissão de sinais de alta frequência, não aproximou-se demasiadamente trilhas paralelas devido a fenômenos de indução, colocou-se um pequeno capacitor de desacoplamento para cada circuito integrado e também um capacitor de tântalo ($10\ \mu\text{F}$) em cada placa, como reserva de energia. Essas recomendações podem ser vistas em Horowitz & Hill (1989) e Philips (1996).

3.2.2. FONTE DE CORRENTE

A operação básica desta parte de instrumento, consiste em fornecer corrente elétrica estabilizada e pulsada em frequências fixas para ser introduzida na amostra.

Fontes de corrente são facilmente implementáveis com a utilização de amplificadores operacionais (Horowitz & Hill, 1989; Gruiter, 1988). Na Figura 3.3, realimentação negativa, resulta no aparecimento de uma tensão (V_E) na entrada inversora do amplificador, e portanto, uma corrente $I = V_E/R$ deve circular pela carga independente de seu valor.

Figura 3.3 Amplificador operacional utilizado como fonte de corrente

Ao se construir o circuito acima com um valor fixo de R e uma referência de tensão de alta estabilidade (V_E), obtém-se correntes estáveis e precisas pela carga (Figura 3.4), considerando os limites do amplificador. Muitas vezes introduz-se um transistor na saída do amplificador como reforçador de corrente. Essa solução não é necessária aqui, pois os valores de correntes utilizados (máxima) são facilmente fornecidos pelo amplificador operacional LF 356, U28 (Figura 3.5).

Figura 3.4 – Visor do osciloscópio com as formas de onda do circuito da fonte de corrente, onde:

1. Tensão na saída do amplificador U28; 2. Tensão sobre o resistor R31

Na escolha desse componente deve-se considerar parâmetros do fabricante como, velocidade, tempo de ajustamento a um degrau de tensão na entrada, capacidade de corrente e também de acionamento de cargas capacitivas.

A referência de tensão utilizada é o LM 385 (D3) que fornece 2,5 volts com grande estabilidade.(max. 150 partes por milhão / °C) Por uma série de divisores de tensão ajustáveis, foram obtidos outros valores que são selecionados pela chave analógica U26, comandada no painel por SH3. Estão disponíveis os valores de corrente de 0,1 mA; 0,2 mA, 0,4 mA e 1,0 mA.

A reversão da corrente, introduzida na amostra, é executada por outra chave analógica (U27) com os terminais conectados em ponte, de forma que a condução ora ocorre por um dos ramos enquanto o outro permanece desligado e vice-versa. Observando a figura 3.4, nota-se que a tensão tomada diretamente sobre o resistor R31, representado por R na figura 3.2, permanece estável e portanto a corrente que circula pela amostra está perfeitamente estabilizada. O canal (2) na figura 3.4 é tensão tomada na saída do amplificador U28, que varia de forma a compensar a polarização elétrica no material, mantendo a corrente constante.

Devido a limitação da tensão (3,5 V) que é fornecida pelo amplificador, U28, um problema poderia ocorrer que impediria a estabilização da corrente durante o pulso a ser enviado a amostra. Para sinalizar ao operador desse evento, adicionou-se ao circuito um comparador de tensão, U30, que dispara um circuito monoestável, U31, acionando um diodo emissor de luz no painel do instrumento pelo tempo de 3 segundos, sempre que a tensão de saída de U28 se elevar acima de 3,4 volts, sinalizando ao operador.

3.3. SISTEMA DE RECEPÇÃO DO SINAL

3.3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Esta parte do conjunto, tem o objetivo de medir a amplitude do sinal e a diferença de fase de fase existente entre a corrente injetada na amostra e o potencial resultante. Utilizou-se da técnica da detecção síncrona, que permite a recuperação de sinais periódicos de interesse, obscurecidos por alto nível de ruídos e interferências (Figura 3.6) (Meade, 1982; Meade, 1983).

Detectores síncronos têm resposta máxima quando o sinal e sua fonte de excitação estão em fase. Portanto, circuitos adicionais ao detector são utilizados, possibilitando essa medida.

Cuidados são tomados para que a entrada do sinal tenha alta impedância, minimizando o efeito de polarização dos eletrodos (Vanhala, 1997) no acoplamento com a amostra.

Figura 3.6 – Visor do osciloscópio, mostrando o sinal misturado ao ruído, proveniente da amostra

3.3.2 AMPLIFICADORES "LOCK-IN"

Amplificadores "Lock-in" são usados para detectar e medir sinais de baixíssimo nível, obscurecidos por ruído, que em muitas vezes é centenas de milhares de vezes maior que o sinal de interesse. Esses sistemas fazem uso de uma técnica conhecida como "detecção sensível a fase" para discriminar a componente do sinal em uma frequência e fase específicas. Ruídos em outras frequências que não a de referência são rejeitados e portanto não afetam a medida. Detectores sensíveis a fase (D.S.F.) reduzem a interferência do ruído limitando a banda de passagem do sinal, ou seja, esses sistemas funcionam equivalentes a um filtro com banda de passagem extremamente estreita e estável (Blair & Sydenham, 1975; Meade, 1983), em torno da frequência de interesse. Medidas por meio dessa técnica requerem uma frequência de referência, porém, geralmente não se constitui em uma dificuldade, pois experimentos são freqüentemente excitados em uma frequência fixa e portanto pode-se implementar um sistema de medida tomando essa frequência como referência.

A estrutura dos circuitos ativos que constituem os sistemas de detecção síncrona, também chamado de amplificadores "Lock-in", é apresentada na Figura 3.7.

Figura 3.7 Diagrama esquemático de um sistema de detecção síncrona usado no receptor (Meade, 1982).

Verifica-se que a resposta (v_q) do detector depende do grau de correlação que deve existir entre o sinal de interesse (s) e a referência (σ). Por isso, muitas vezes é denominada de sistema de correlação, formulada (Meade, 1982, 1983) por:

$$v_q(t) = \sigma(t) \cdot (s(t) + h(t)) \quad (3.d)$$

$\sigma(t)$ = sinal de referência

$s(t)$ = sinal de interesse

$h(t)$ = ruído e interferência

Estando $\sigma(t)$ e $s(t)$ correlacionados, o produto $\sigma(t) \cdot s(t)$ apresenta uma resposta distinta, isto é, mantendo-se o sinal fixo, tem-se uma tensão constante na saída, proporcional ao nível do sinal. No caso de não existir nenhuma correlação com o ruído (aleatório), o valor médio do produto $\sigma(t) \cdot h(t)$ é zero. Esta técnica de redução de ruído baseado em demodulação síncrona consiste essencialmente de um detector sensível à fase dotado de um filtro passa-baixa. Qualquer flutuação residual na saída do detector, devido a retificação do ruído misturado ao sinal, aparece como uma variação de tensão alternada, que não afeta o valor médio da tensão de saída devido ao sinal (Meade, 1983).

Na prática, a multiplicação nos quatro quadrantes de referência pelo sinal (D.S.F.) é feita por meio de um dispositivo de altíssima performance tanto em linearidade, como em estabilidade (Probst & Coollet, 1985). O D.S.F. executa uma retificação seletiva do sinal (Figura 3.8) pela mudança periódica do ganho (+1 para -1 e vice-versa) de um amplificador. Essa operação resulta nas formas idealizadas de onda representadas na Figura 3.8.

Figura 3.8 Formas de onda presentes nas várias etapas de um detector síncrono (adaptado de Meade, 1983):

- a) entrada de $V(t)$
- b) referência $F(t)$
- c) saída do detector sensível à fase
- d) saída do filtro passa-baixa

No caso da excitação do experimento e também do sinal de referência ser uma onda quadrada, Figura 3.9, a tensão contínua na saída,

Figura 3.9 - Tensão de saída em função da fase no D.S.F.

a) Formas de onda do D.S.F

b) Resposta em função da diferença de fase do sinal detectado.

ou seja, após o filtro, passa baixa no sistema, tem o comportamento da Figura 3.9b simplificada pela fórmula a seguir:

$$V_{DC} = V_S \left(1 - \frac{\alpha}{90^\circ} \right) \quad (3.e)$$

Onde,

V_{DC} = Tensão de saída do D.S.F.

V_S = Amplitude do sinal

α = fase, em graus, onde $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$

Nota-se, conforme mencionado anteriormente, os pontos quando a saída é máxima e também quando é zero, ou seja, quando o deslocamento de fase é de 90° .

A tensão V_{rms} do ruído através de uma resistência pura é proporcional à raiz quadrada da largura da banda passante, definida adiante:

$$V_{rms}(\text{ruído}) = k\sqrt{\Delta f} \quad (3.f)$$

onde $k = k(R, T)$, onde T é a temperatura.

Esse ruído, que independe da frequência é denominado ruído branco e tem natureza aleatória. A banda passante Δf do detector sensível à fase é proporcional ao inverso da constante RC do filtro passa-baixa de pólo simples, cuja frequência de corte f_c é dada por (Gualtieri, 1987):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.g)$$

A banda passante de ruído Δf_N do sistema RC simples pode ser determinada, desde que se conheça a função de transferência do filtro. Então:

$$\Delta f_N = \frac{1}{4RC} \quad (3.h)$$

A relação entre a banda passante de ruído Δf_N e a banda passante de meia potência $\Delta f_{1/2}$, para o sistema RC é (Usher, 1974):

$$\Delta f_N = \frac{\pi}{2} \Delta f_{1/2} \quad (3.i)$$

A resposta total do DSF é equivalente a um filtro de banda passante muito estreita e estável. A banda passante total é dada por:

$$\Delta f = \frac{1}{\pi RC} \quad (3.j)$$

O nível de ruído branco efetivo pode ser reduzido, limitando-se a banda passante de detecção que inclua a frequência de interesse. Este procedimento reduz a potência do ruído, mas

não o sinal. O DSF efetua detecção em banda passante extremamente estreita (geralmente de 100mHz), permitindo medidas com estabilidade de parte por milhão (Blair & Sydenham, 1975).

Amplificadores "*Lock-in*" são utilizados em várias áreas de pesquisa, e também são implementados não somente de maneira analógica, mas também digital. Em Cova *et al.* (1979), faz-se uma comparação da versão analógica com a digital, principalmente em baixíssima frequência, numa aplicação em espectrometria ótica.

Momo *et al.* (1981), Probst & Coollet (1985) e Barone *et al.* (1995), implementaram a técnica no modo numérico com auxílio de um microprocessador e Probst & Coollet (1985) também analisaram a viabilidade e as limitações de utilizar-se um filtro passa-baixa formado de várias seções RC em cascata.

3.3.3 SISTEMA DE ATRASO DE FASE

Conforme mencionado anteriormente, a metodologia empregada para executar a medida é colocar em coincidência o sinal proveniente da amostra com a referência interna do equipamento. Sabendo que nesse instante a leitura é máxima, no detector síncrono, construiu-se um sistema simples (Bastianon, 1996) para atrasar a referência e também fornecer um pulso com largura igual ao atraso de fase. A operação básica consiste em disparar o mesmo circuito monoestável (74hC4538) nos flancos de subida e descida do mesmo pulso.

Na Figura 3.10, observa-se que para possibilitar o disparo do monoestável, foi necessário utilizar um sinal com o dobro da frequência que se deseja atrasar, pois o componente U33 (Figura 3.11) é acionado na subida ou na descida, mas não nos dois flancos do mesmo pulso.

A introdução do sinal de referência na entrada DADOS de um flip-flop U32 e do pulso

complementar ($\overline{Q}_M$) do monoestável na entrada CLOCK, produz na saída um sinal idêntico ao da entrada, com atraso igual ao tempo de atuação do monoestável.

Figura 3.10 Formas de onda do circuito de atraso de fase.

A duração do pulso de atraso é proporcional à constante RC do circuito monoestável 74HC4538, e portanto pela atuação dos potenciômetros P1 e P2 obtém-se o tempo necessário de atraso. Através da chave S2 seleciona-se capacitores para adequar a constante de tempo às várias décadas de frequências.

Pela chave SH5, ao se utilizar a frequência complementar ($2\bar{F}$), obtém-se na saída do sistema um sinal idêntico ao anterior, porém defasado de 90°, que nessa opção, no instante da medida, o operador deve ajustar o nível zero na saída do detector.

.3.4 SISTEMA DE MEDIDA DE FASE

A medida de um intervalo de tempo pode ser feita pela contagem de pulsos de um sinal de frequência fixa presente durante esse período, de tal forma que a precisão depende diretamente da frequência (Helfrick & Cooper, 1990; Klaasen, 1996). Neste caso, para medida de diferença de fase, usou-se um método análogo de contar pulsos de frequência fixa superior (28 800 vezes no intervalo de frequência até 1,11 kHz, acima desta 2880 vezes) ao da corrente enviada a amostra.

Pelo número de contagens, determina-se a diferença de fase numa dada frequência, lembrando que 28800 contagens ocorrem em um ciclo da onda, ou seja, aproximadamente 6283 miliradianos. Portanto a diferença de fase é dada por:

$$Fase = n^{\circ} de contagens \times \frac{6283}{28800} \quad (3.k)$$

3.3.5 CIRCUITO DE SELEÇÃO DOS PULSOS ENVIADOS AO CONTADOR

Após o operador ter ajustado a saída do detector, por intermédio deste circuito, 10 pulsos de atraso são selecionados pela atuação na chave S3, para serem medidos (Figura 3.12).

Figura 3.12 Diagrama do circuito de seleção dos pulsos

Ao acionar a chave (Figura 3.13), um nível baixo é colocado na entrada do contador, U37, que conjuntamente com os flip-flops U38 e a porta ou-exclusivo U39, resulta em um pulso largo com duração entre o flanco de subida do primeiro pulso até o flanco de descida do décimo. A introdução em uma porta E juntamente com o trem de pulsos de atraso, produz na saída somente 10 pulsos. Na sequência, passam novamente por outra porta E juntamente com os sinais de alta frequência, produzindo 10 “pacotes” de pulsos de alta frequência que são enviados ao contador. Repiques da chave SH5 são evitados pelo uso do *latch* R-S, U35.

3.3.6 CIRCUITO CONTADOR - MEDIDA DE FASE

A contagem dos pulsos existentes nos 10 pacotes enviados pelo circuito anterior é feita por uma cascata de 5 contadores digitais codificados em binário (74F160). Não se utilizou aqui, na cascata, a introdução do pacote de pulsos somente no 1º contador, pois essa técnica não permitiria a contagem na frequência utilizada (Figura 3.14).

Aplicou-se o mesmo pacote em todos os 5 contadores, possibilitando trabalhar na frequência máxima do equipamento (32 MHz).

Decodificadores de 7 segmentos acionam um display no painel do instrumento, para posterior conversão das contagens em diferença de fase pelo operador.

Title				Circuito do Contador			
Size	Number	Figura 3.14		Rev			
A3	5						
Date				Drawn by			
Filename	contador	D		Sheet	of		

3.3.7 DETECTOR SÍNCRONO

A recepção do sinal proveniente amostra é feita por um amplificador de instrumentação (INA111) com altíssima impedância de entrada e grande rejeição à ruídos de modo comum. Este é um dos componentes críticos do sistema (Figura 3.15) pois impedâncias baixas de entrada podem levar a polarização dos eletrodos em contato com a amostra (Vanhala *et al.*, 1995), degradando ou até inviabilizando a medida. Originalmente, o componente tem 10^{13} ohms de impedância de entrada, reduzida no circuito a 100 Mohms por meio de resistores ligados ao terra. Pela chave SH5, seleciona-se ganhos para o amplificador de 1, 10 e 100, de acordo com a necessidade do sinal medido.

O multiplexador U52 (74HC4052) executa a retificação seletiva do sinal captado pelo amplificador diferencial da amostra, sincronizado com a referência proveniente do sistema de atraso. A seguir, o sinal retificado é introduzido em uma sequência de dois filtros passa baixa, sendo o primeiro com frequência de corte de 0,3 Hz, seguido por outro com frequência de corte no intervalo de 0,5 a 0,016 Hz, selecionáveis pela chave SH6. Os capacitores (poliéster) e resistores (filme metálico) utilizados nessa parte do equipamento devem ser de qualidade para que se obtenha o desempenho desejado. A leitura do detector é feita por meio de um voltímetro digital acoplado externamente ao aparelho (Figura 3.16).

A construção de todo o sistema é modular, dividida em sete placas de circuitos eletrônicos (Figura 3.17).

Title: Circuito do Receptor

Size: A3

Number: 3.15

Rev: 1

Date: _____

Drawn by: _____

Sheet: _____ of _____

Figura 3.16 – Vista frontal do sistema desenvolvido

Figura 3.17 – Vista interna do sistema

3.3.8 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Procurando avaliar o comportamento da amplitude do sinal recebido em função da frequência, foi executado um teste colocando três resistores iguais (500 ohm) associados em série, semelhante ao porta amostras descrito adiante e introduzindo corrente elétrica (200 microampéres) pelos terminais externos do arranjo e tomando-se a tensão nos terminais do resistor central. No gráfico obtido, (Figura 3.18) observa-se que existe uma pequena variação na amplitude do sinal sobretudo nas mais elevadas frequências, que para a de 11,11 kHz, é da ordem de 5%, tornando-se desprezível para frequências inferiores a 1 kHz. Decidiu-se por não corrigir essa diferença dos resultados obtidos.

Figura 3.18 – Curva de calibração do sistema

4 ENSAIOS EM LABORATÓRIO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Medidas de polarização induzida (amplitude e diferença de fase) foram executadas em laboratório para amostras de areia misturadas com argila. A areia utilizada foi a NBR-7214/82 (Anexo 1), fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas, denominada aqui por areia padrão.

As argilas utilizadas foram a bentonita comercial (Marca Bentoniza), oriunda de João Pessoa, Paraíba, e o lamito que é da Formação Resende, Bacia de Taubaté, oriundo da região de Mogi das Cruzes, SP.

A análise por difração de Raio X da bentonita, executada pelo IPT, constatou que se trata exclusivamente de esmectita, enquanto que o lamito tem composição complexa, contendo basicamente caolinita e ilita. (Márcia Mika Saito, comunicação pessoal).

Os contaminantes utilizados foram as gasolinas (Anexo 2) pura e comum e o etanol. Uma solução de NaCl com condutividade elétrica conhecida é utilizada e misturada em todas as amostras, pois sem a adição dessa solução salina, a resistividade se tornaria tão elevada que seria impossível a leitura pelo equipamento.

4.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

Misturas de amostras contendo i) areia padrão e bentonita, e ii) areia padrão e lamito foram contaminadas para posterior medidas em laboratório. A areia utilizada foi obtida por meio de três porções iguais em massa de areias padrões, com granulometrias maiores que 0,6 e 0,3 mm para duas porções, sendo a terceira composta por areia de grãos menores que 0,15 mm.

Em recipiente de vidro, homogeneizou-se a mistura de areia e argila manualmente. Nesses ensaios utilizou-se uma mistura de areia padrão com argila na proporção de 10% e 5% em relação a massa total de areia. Uma solução salina foi preparada, adicionando-se NaCl em água destilada até que atingisse o valor de condutividade elétrica de 100 mS/m.

Figura 4.1 Detalhe da mistura do contaminante com a amostra.

O procedimento de adicionar primeiro o eletrólito à amostra e na sequência o contaminante é adotado para todo o experimento. Assim 350 ml de líquido foram adicionados para cada 1kg de amostra contendo bentonita. No caso das amostras contaminadas, 50ml de contaminante são adicionados e portanto o volume de 300 ml de solução padrão é utilizado. No caso do lamito, foram adicionadas 240 ml de solução, que quando contaminada substitue-se 40 ml de solução pelo contaminante a ser introduzido.

Quantidade distinta de solução para as amostras deve-se ao fato de um volume maior de solução provocar saturação no lamito, enquanto um volume menor na amostra contendo bentonita impediria o processo de homogeneização do material.

Novamente, misturou-se os componentes da amostra manualmente e se introduziu gradativamente no porta-amostras. O porta-amostras construído (Fig. 4.2), é composto por um tubo de P.V.C., de diâmetro externo 50 mm e comprimento de 150 mm. Como eletrodo de corrente foi colocada uma chapa de aço inox de diâmetro igual ao do tubo, firmemente coladas às tampas do porta-amostra.

Os eletrodos para leitura do potencial (Vanhala *et al.* 1995), são construídos com pedaços de fio de aço inoxidável com diâmetro de 3,14 mm, fixados no porta amostras, distando entre si 4cm e posicionados no centro do tubo, por meio de um gabarito construído especialmente para essa finalidade, evitando que exista diferença de distância entre esses eletrodos nos vários exemplares utilizados. As medidas foram feitas para gasolina comum (contendo etanol), gasolina pura, álcool combustível (etanol) e também em amostra não contaminada. O experimento foi executado em laboratório com temperatura estabilizada. As amostras de argilas permaneceram em estufa a 60°C por 24 horas, enquanto que a areia ficou por 2 horas a 100°C. As medidas foram realizadas 5 dias após serem introduzidas no porta amostras. Trabalhou-se com correntes 200 μA , que na amostra resulta em uma densidade de corrente de 0.11 mA/m^2 , que é baixa o suficiente para não influenciar a medida (Vanhala *et al.* 1995).

Figura 4.2 Detalhe do porta amostras, com as conexões de entrada de corrente na extremidade e saída do sinal ao centro

4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Após decorrido o tempo de maturação das amostras, medidas de diferença de fase e amplitude foram executadas em todas as frequências disponíveis no sistema. O procedimento de medida foi igual para todas as amostras, iniciando-se com a frequência mais alta e gradativamente avançou-se o experimento, medindo a imediatamente inferior.

O tempo gasto para cada amostra foi de aproximadamente 2 horas, que em grande parte é devido às frequências baixas, onde as constantes de tempo utilizadas nos filtros foram as mais altas (frequência de corte de 0,016 Hz).

O voltímetro utilizado foi o de 4 1/2 dígitos, apresentando excelente estabilidade na leitura do potencial.

Os dados obtidos são apresentados na forma de gráficos, estando a frequência em escala logarítmica.

Figura 4.3 Diferença de fase para amostra de areia contendo 10% de bentonita

Lamito (5%)

Figura 4.4 Diferença de fase para amostra de areia contendo 5% de lamito

Lamito (10%)

Figura 4.5 Diferença de fase para amostra de areia contendo 10% de lamito

Figura 4.6 Resistividade para amostra contendo 10% de bentonita

Figura 4.7 Resistividade para amostra contendo 5% de lamito

Figura 4.8 Resistividade para amostra contendo 10% de lamito

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O instrumento, aqui desenvolvido, foi orientado durante o projeto por informações relativas a experimentos recentes em laboratório para medidas de polarização induzida por meio de equipamentos comerciais de altíssimo custo, muitas vezes destinados a outras áreas da ciência. Alguns autores utilizaram instrumentos de geofísica de campo, adaptados para experimentos em laboratório, que apresentam diferenças de projeto quer com relação ao ruído presente e também relativa a magnitude dos sinais enviados e recebidos das amostras.

Na bibliografia citada anteriormente, são escassas as informações relativas às características elétricas dos equipamentos utilizados, necessárias para o bom desempenho do experimento. Porém, as poucas disponíveis, foram implementadas no instrumento com sucesso, resultando em um sistema desenvolvido com soluções razoavelmente simples, de baixo custo e também apresentando versatilidade de concepção, de tal forma que alguns parâmetros internos dos circuitos eletrônicos podem receber eventuais modificações para se adequar ao experimento que se deseja realizar.

A geração das frequências utilizadas no instrumento, por meio de oscilador de quartzo foi necessária para se obter precisão tanto no sinal enviado à amostra como também na contagem dos pulsos utilizados na medida de diferença de fase, que apresentou alta reprodutibilidade. Altas frequências em circuitos eletrônicos requerem cuidados especiais devido a fenômenos indutivos (Buchanan, 1990) que degradam o sinal e interferem ruidosamente nas imediações por onde estão sendo conduzidos. Esses efeitos foram aqui minimizados por utilização de chaves analógicas comandadas pelo painel do instrumento (figura 3.11), permitindo trabalhar com frequências de 32 MHz e também interconectando divisores de frequências, obtendo-se assim os valores necessários ao funcionamento.

A fonte de corrente construída, onde se tem uma referência de tensão de altíssima estabilidade, satisfaz plenamente os experimentos, pois em momento algum a corrente enviada às amostras apresentou instabilidade, mesmo nas altas frequências.

A sinalização de excesso de corrente ao operador, pela comparação da tensão fornecida pelo amplificador, U28, com uma referência calibrada em um valor abaixo (3,4 volts) da tensão de saturação desse componente (3,5 volts) permitiu trabalhar com valores fixos de corrente, sem a necessidade de um amperímetro no sistema.

Pelo fato do sistema de medida de fase capturar 10 pulsos sucessivos, ao invés de tomar apenas um pulso, conseguiu-se melhorar a precisão da medida, que apresentou reprodutibilidade de aproximadamente 100%.

A presença de ruídos, que no laboratório onde se executaram as medidas era de aproximadamente 100 mV, observadas na saída do amplificador de instrumentação (INA 111) no circuito de recepção do sinal não interferiu na medida mesmo quando o valor lido era da ordem de 30 mV, no caso das amostras com bentonita.

A alta impedância de entrada, necessária na recepção do sinal de forma a evitar a polarização dos eletrodos, não afetou o desempenho do sistema na medida de amplitude do potencial. Os valores das frequências de corte dos filtros passa baixo estão adequados para quase todas as frequências utilizadas, porém uma pequena oscilação na amplitude (menor que 0,5%) foi detectada durante o experimento, para frequências menores que 1 Hz. Isso pode ser facilmente resolvido pelo simples aumento da constante RC desses filtros, ou ainda pelo cálculo da média dos valores lidos.

Os ensaios investigaram o efeito de polarização induzida, no domínio de frequências em amostras constituídas de areia padrão misturada com argilas. Foram feitas medidas no intervalo de frequências de 0,138 Hz até 11,11 kHz, tomando quatro medidas por década.

O principal objetivo nesta etapa do trabalho foi verificar a possibilidade de discriminar amostras contaminadas por álcool combustível, gasolina pura e gasolina comum de amostras similares não contaminadas. Para isso, as amostras têm composição granulométrica conhecida, pois são construídas artificialmente para o experimento.

O Brasil vem utilizando álcool anidro adicionado à composição da gasolina comum nos últimos 20 anos, portanto, o trabalho também pretendeu verificar se a mistura pode afetar a resposta IP e a resistividade elétrica do material contaminado estudado.

Os dados (diferença de fase e resistividade) são apresentados em gráficos em função da frequência. É calculado PFE, tomando como resistividade para corrente contínua, a frequência mais baixa (0,138 Hz) e para corrente alternada as frequências de 1,38 Hz, denominada por PFE1 e também calcula-se para 13,88 Hz, denominada PFE10.

Os resultados obtidos, observados nas figuras 4.3 a 4.8, evidenciam duas faixas de interesse com respeito a frequências. No espectro de fase, são as maiores frequências que apresentam valores relativamente mais elevados, onde o maior valor encontrado é para a amostra com lamito (10%) não contaminada (figura 4.5). Outra faixa de interesse se encontra nas frequências mais baixas, utilizadas nos cálculos de PFE. Os equipamentos de IP para uso no campo, em geral, operam nessa faixa de frequência, e portanto, acentua-se o interesse para que os resultados encontrados possam eventualmente ser aplicados em trabalhos de mapeamento da contaminação por esses compostos químicos.

As amostras compostas por bentonita diferem bastante nos valores de resistividade com os de lamito. Em parte, isso deve-se ao fato que se utilizou um volume maior de solução nessas amostras, porém a variação é tão significativa, indicando que foi a presença de argila que determinou esse comportamento, também observado por Gudjurgis (1994).

O espectro de fase observado para as amostras apresentam pequenas diferenças, ocorrendo principalmente nas frequências mais altas. Porém, isto deve ser analisado levando em conta que nessa década de frequências (1,38 a 11,11 kHz) o erro experimental na medida é de 2,2 mrad, consequência do número de pulsos disponíveis, que são de 2880 para um período do sinal medido.

Observando a Tabela 1, nota-se que existe uma coerência dos resultados, devido à presença do contaminante, onde a sequência de valores de resistividade, $\rho_{dc} \text{ etanol} > \rho_{dc} \text{ gasolina comum} > \rho_{dc} \text{ gasolina pura} > \rho_{dc} \text{ não contaminado}$, ocorre para a maioria das amostras. No

entanto, a amostra com bentonita, quando contaminada com gasolina pura, apresentou um valor inferior de resistividade quando comparada com a amostra não contaminada.

Tabela 1 Valores de resistividade ρ_{dc} das amostras

Amostra	Resistividade ρ_{dc} (ohm.m)			
	Não contaminada	Gasolina pura	Gasolina comum	Etanol
10% bentonita	6,29	6,17	6,56	10,06
5% de lamito	39,61	50,08	57,12	72,54
10% de lamito	39,43	55,64	62,49	72,00

Os dados de PFE são os mais significativos do experimento (Tabela 2). Eles mostram um decréscimo mensurável pela presença dos contaminantes, na maioria dos ensaios executados.

Tabela 2 Efeito frequência expresso em percentagem para as amostras

Amostra	PFE 1 (%)				PFE 10 (%)			
	N.C.	G.P.	G.C.	Etanol	N.C.	G.P.	G.C.	Etanol
10% bentonita	2,70	3,24	3,05	1,29	3,82	4,05	4,12	1,99
5% de lamito	2,23	1,29	0,65	0,125	4,03	2,60	2,06	0,94
10% de lamito	1,23	0,85	0,77	0,84	3,52	2,62	1,98	2,09

N.C.: Não contaminada; G.P.: Gasolina pura; G.C.: Gasolina comum

Quando as amostras contêm lamito, o PFE sofre atenuação para todos os compostos orgânicos, sendo mais pronunciado para o etanol. Nas amostras contendo bentonita, somente ocorreu atenuação quando contaminadas pelo etanol na amostra contendo 5% de lamito. Quando contaminadas por gasolina pura e comum, o PFE sofre um pequeno acréscimo.

Na Tabela 3, tem-se os dados relativos de PFE tomando como 100% os valores das amostras não contaminadas.

Tabela 3 Diferença percentual no valor de PFE em relação à amostra não contaminada

Amostra	PFE 1			PFE 10		
	G.P.	G.C.	Etanol	G.P.	G.C.	Etanol
10% bentonita	+20	+13	-52	+6	+8	-48
5% de lamito	-42	-71	-94	-60	-49	-77
10% de lamito	-31	-37	-32	-26	-44	-41

G.P.: Gasolina pura; G.C.: Gasolina comum

6 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido aqui um sistema para medida em laboratório de Polarização Induzida (domínio de frequência), permitindo uma ampla faixa de frequências (0,13Hz a 11,11kHz) e, portanto, possibilitando que se estude o material por meio do espectro obtido, não se restringindo somente a poucas frequências como ocorre em equipamentos de campo.

A utilização da técnica da detecção síncrona na recepção do sinal proveniente da amostra possibilitou que as medidas fossem feitas em condições desfavoráveis com grande ruído ambiental mesmo tendo o sistema altíssima impedância de entrada no módulo de recepção do sinal.

A possibilidade de polarização elétrica nos eletrodos de potencial é minimizada pela alta impedância de entrada do sistema onde implementou-se a recepção do sinal por meio de amplificador de instrumentação com excelente rejeição a ruídos de modo comum (120 dB) e altíssima impedância (10^{13} ohms) que foi reduzido no circuito para 100 Mohms.

A fonte de corrente, construída com um circuito simples, não apresentou em nenhum momento instabilidade. Por meio de um circuito adicional alerta-se ao operador quando a corrente ajustada previamente não é atingida, sendo assim desnecessária a utilização de amperímetro no sistema.

Na medida de diferença de fase, uma vez estando o sinal recebido e a referência coincidentes, conseguiu-se melhorar a precisão pela execução automática de dez medidas consecutivas.

O projeto dos circuitos eletrônicos permite, com a troca de alguns componentes passivos (resistores e capacitores), alterar alguns parâmetros, como frequência de corte dos filtros passa-baixa, corrente elétrica enviada à amostra e ganho no sinal de entrada, respeitando-se os limites dos componentes envolvidos de forma a não prejudicar a qualidade dos dados obtidos.

Os ensaios não pretenderam reproduzir as condições de campo nas amostras, que são sabidamente complexas. No entanto, diferenças mensuráveis nos valores de resistividade e IP foram encontrados para todos os contaminantes em relação às amostras não contaminadas.

Os valores obtidos no espectro de fase revelam valores distintos somente acima de 1,0 kHz. Devido ao erro instrumental nessa faixa de frequências ser maior, não é possível concluir se existe algum efeito pela contaminação. A presença do contaminante alterou a resistividade de todas as amostras, que em geral teve seu valor aumentado, exceção à amostra contendo bentonita onde as gasolinas pura e comum diminuíram a resistividade, em 2% e 4% respectivamente.

Todas as amostras apresentaram forte atenuação de PFE para o etanol. Porém, pelo conjunto de dados obtidos, não é possível saber como este influenciou a medida quando presente na gasolina comum.

Os valores de PFE nas amostras com lamito foram atenuados para todos os contaminantes, onde as menores diferenças são da ordem de 30%, o que já é bastante significativo para uma possível aplicação em campo. No entanto, no caso de amostras com bentonita, quando contaminadas com gasolina, as diferenças são menores que as com lamito, e com valores positivos, ou seja, ocorreu aumento no PFE. Sugere-se que trabalhos posteriores investiguem variações no conteúdo de argilas das amostras e da condutividade da solução, procurando normalizar a resistividade dos materiais, e a seguir, estudando o efeito de IP. Aconselha-se também que a resposta dos experimentos seja estudada para amostras contaminadas com álcool anidro, uma vez que este é adicionado a gasolina comum.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARONE, F.; CALLONI, E.; DIFIORE, L.; GRADO, A.; MILANO, L.; RUSSO, G. – 1995
– High-performance modular digital lock-in amplifier. **Ver. Sci. Instrum.**, v. 66, n. 6, p. 3697-3702.
- BASTIANON, D. – 1996 – **Desenvolvimento de um Sistema de Medida de Resistividade Elétrica Complexa para Aplicações Geofísicas**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. Universidade de São Paulo. 79p.
- BENSON, A.K. – 1995 – Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: Examples of groundwater contamination, faults, cavities. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 177-193.
- BLAIR, D.P. & SYDENHAM, P.H. - 1975 - Phase Sensitive Detection as a Measure to Recover Signals Buried in Noise. **J. Phys. E: Sci. Instrum.**, v. 8, p. 621-627.
- BODMER, R., WARD, S.H. & MORRISON, H.F. - 1968 - On Induced Electrical Polarization and Groundwater. **Geophysics**, v. 33, n. 5, p. 805-821.
- BORNER, F., GRUHNE, M. & SHON, J. - 1993 - Contamination Indications Derived from Electrical Properties in the Low Frequency Range. **Geophysical Prospecting**, v. 41, p. 83-98.
- BÖRNER, F.D.; SCHOPPER, J.R.; WELLER, A. – 1996 – Evaluation of Transport and Storage Properties in the Soil and Groundwater Zone from Induced Polarization Measurements. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p. 583-601.

- BRAGA, A.C.O. – 1997 – **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro-SP.** Tese de doutoramento – Universidade Estadual Paulista.
- BUCHANAN, J.E. – 1990 – CMOS/TTL Digital system design, McGraw-Hill Publishing Company, 258 p.
- BREWSTER, M.L., REDMAN, J.D. & ANNAN, A.P. - 1992 - Monitoring a controlled Injection of Perchloroethylene in Sandy Aquifer with Ground Penetrating Radar and Time Domain Reflectometry: Proc. of the **Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**, Chicago, Illinois, 8p.
- COGGON, J.H. - 1973 - A comparison of I.P. Electrode Arrays. **Geophysics**, v. 38, n. 4, p.737-761.
- COVA, S., LANGONI, A., FREITAS, I. - 1979 - Versatile Digital lock-in Detection Technique: Application to Spectro Fluorometry and other Fields. **Rev. Sci. Instrum.**, v. 50, n. 3, p. 296-301.
- DARAYAN, S.; LIU, C.; SHEN, L.C. SHATTUCK, D. – 1998 – Measurement of electrical properties of contaminated soil. **Geophysical Prospecting**, v. 46, p. 477-488.
- EBRAHEEM, A.M., HAMBURGUER, M.W., BAYCESS & E.R., KROTHER, N.C. - 1990 - A study of acid mine drainage using Earth resistivity measurements. **Ground Water**, v. 28, n. 3, p. 361-368.

FETTER, C.W. - 1993 - **Contaminant Hydrogeology**. Macmillan Publishing Company, New York, 458p.

GALLAS, J.D.F. - 2000 - **Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental** – Tese de doutoramento – Universidade Estadual Paulista.

GRUITER, A.F. - 1988 - **Amplificadores operacionais: fundamentos e aplicações**. Makron Books do Brasil (McGraw-Hill), 251p.

GUALTIERI, D.M. - 1987 - Precision of lock-in amplifiers as a function of signal-to-noise ration. **Rev. Sci. Instrum.**, v. 58, n. 2, p. 299-300.

GUDJURGIS, P.J. - 1994 - **Induced polarization measurements in the frequency and time domain on gasoline-contaminated clayey sands**. M.Sc. Thesis, Waterloo University.

HALLOF, P.G. & YAMASHITA, M. - 1990 - The use of IP method to locate gold-bearing sulfide mineralization. In: **Induced polarization applications and case histories**. Edited by James B. Fink et al., SEG, Tulsa, 414p.

HELFRICK, A.D. & COOPER, W.D. - 1990 - **Modern electronic instrumentation and measurement techniques**, Prentice Hall, New Jersey, 446p.

HOHMAN, G.W. - 1990 - Three-dimensional I.P. models in: **Induced polarization - application and case histories**. Editor: James B. Fink et al, SEG, Tulsa, Oklahoma.

- HOROWITZ, P. & HILL, W. - 1989 - **The Art of Electronics**, 2nd Ed. Cambridge University Press, 1125p.
- KELLY, W.E. - 1976 - Geoelectric Sounding for Delineating Ground Water Contamination. **Ground Water**, v. 14, n. 1, p. 6-10.
- KLAASEN, K.B. - 1996 - **Electronic Measurement and Instrumentation**. Cambridge University Press. 335 p.
- MEADE, M.L. - 1982 - Advances in lock-in Amplifiers. **J. Phys. E: Sci. Instrum.**, v. 15, p. 395-403.
- MEADE, M.L. - 1983 - **Lock-in Amplifiers: Principles and Application**. Peter Peregrinus, Ltda. 230p.
- MOMO, F., RANIERI, G.A., SOTGIU, A. & TERENCE, M. - 1981 - Microcomputer based Phase Sensitive Detector. **J. Phys. E: Sci. Instrum.**, v. 14, p 1253-1256.
- NELSON, P.H. & VOORHIS, G.D. - 1983 - Estimation of sulfide content from induced Polarization. **Geophysics**, v. 48, n. 1, p. 62-75.
- OGILVY, A.A. & KUZIMINA, E.N. - 1972 - Hydrogeologic and Engineering-Geologic Possibilities for employing the method of induced polarization. **Geophysics**, v. 37, n. 5, p. 839-861.
- OLHOEFT, G.R. - 1985 - Low-frequency Electrical Properties. **Geophysics**, v. 50, n. 12, p. 2492-2503.

OLHOEFT, G.R. - 1986 - Direct Detection of Hydrocarbon and Organic Chemicals with Ground-Penetrating Radar and Complex Resistivity. **Proc. NWWA/API Conf. on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater-Prevention, Detection, and Restoration**, p. 284-305.

OLHOEFT, G.R. & KING, T.V.V. - 1991 - Mapping subsurface organic compounds noninvasively by their reactions with clays. **Proc. 4th Toxic Substances Hydrology Technical Meeting**, Monterey, p.1-14.

ORELLANA, E. -1974 - **Prospeccion geoletrica por campos variables**. Biblioteca Tecnica Philips, Editora Paraninfo - Madri, 423p.

PELTON, W.H., WARD, SH.H., HALLOF, P.G., SILL, W.R. & NELSON, P.H. - 1978 - Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. **Geophysics**, v. 43, n. 3, p. 588-609.

PHILIPS – 1996 – **Data handbook ICO6** – High speed CMOS. Logic Family

PROBST, P.A. & COLLET - 1985 - Low frequency digital lock-in amplifier. **Rev. Sci. Instrum.**, v. 56, n. 3, p 466-470.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. – 1998 – High conductivity associated with na LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v.2, n.3, p. 203-212.

- STEINBERG, B.K. - 1991 - A review of some experience with the induced polarization / resistivity method for hydrocarbon surveys: successes and limitations. **Geophysics**, v. 56, n. 10, p. 1522-1532.
- SUMNER, J.S. - 1976 - Principles of induced polarization for geophysical exploration. **Developments in Economic Geology**, 5. Elsevier, 277p
- TOWLE, J.N., ANDERSON, R.G., PELTON, W.H., OLHOEFT, G.R. & LABRECQUE, D. - 1985 - Direct detection of hydrocarbon contaminants using the induced-polarization method. 55th Ann. Internat. Mtg., **Soc. Expl. Geophys.**, Expanded Abstracts, p. 145-147.
- USHER, M.J. - 1974 - Noise and bandwidth. **J. Phys. E: Sci. Instrum**, v. 7, p. 957-961.
- VANHALA, H. - 1997 - Mapping oil - contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. **Geophysical Prospecting**, v. 45, p. 303-326.
- VANHALA, H. & SOININEN, H. - 1995 - Laboratory technique for measurement of spectral induced polarization response of soil samples. **Geophysical Prospecting**, v. 43, p. 655-676.
- VANHALA, H., SOININEN, H. & KUKKONEN, I. - 1992 - Detecting chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment. **Geophysics**, v. 57, n. 8, p. 1014-1017.
- VANHALA, H. & PELTONIEMI, M. - 1992 - Spectral I.P. studies of finnish prospects. **Geophysics**, v. 57, n. 12, p. 1545-1555.

VACQUIER, V., HOLMES, C.R., KINTZINGER, P.R. & LAVERGNE, M. - 1957 -
Prospecting for groundwater by induced polarization. **Geophysics**, v. 22, n. 3, p. 660-687.

WELLER, A. BÖRNER, F.D. – 1996 – Measurements of spectral induced polarization for
environmental purposes. **Environmental Geology**, v. 27, p. 329-334.

ZONGE, K.L. & WYNN, J.C. - 1975 - Recent advances and applications in complex
resistivity measurements. **Geophysics**, v. 40, n. 5, p. 851-864.

ANEXO 1

CERTIFICADO DE MATERIAL DE REFERÊNCIA Nº 556

AREIA NBR-7214/82 - LOTE 11/05 a 22/05/98

AREIA NORMAL PARA ENSAIO DE CIMENTO

1.-Determinações em amostras médias semanais

1.1 - Composição granulométrica (NBR-7217/87)

AMOSTRA Nº	VALORES CERTIFICADOS (%) RETIDAS ACUMULADAS (**)					
	nº 8 (2,4 mm)	nº 10 (2,0 mm)	nº 16 (1,2 mm)	nº 30 (0,6 mm)	nº 50 (0,3 mm)	nº 100 (0,15 mm)
556	0	3	21	49	73	100
LIMITES(*)	0	5 +/- 5	25 +/- 5	50 +/- 5	75 +/- 5	97 +/- 3

(*) NBR-7214/82

(**) Abertura de malha (NBR-5734/88)

1.2 - Outras determinações

Determinações	Valores Certificados	Limites
Material pulverulento (NBR-7219/87)	0,0	<= 1,0%
Umidade (NBR-7214/82)	0,0	<= 0,2%
Conglomerados argilosos (NBR7214/82)	0,0	<= 1,0%
Teor de feldspato entre peneiras 2,4 e 1,2 mm (NBR7214/82)	4,0	<= 15%
Teor de mica entre peneiras 0,30 e 0,15 mm (NBR-7214/82)	0,0	<= 2,0%
Matéria orgânica (NBR-7220/87)	<100 ppm	<= 100 ppm

(*) - Partes por milhão.

NOTA: Determinações realizadas em lotes de até 5t.

São Paulo, 28 de maio de 1.998

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil
Laboratório de Concreto

João Carlos Marques
Responsável pelo Laboratório
CRQ 04201457

DIVISÃO DE ENGENHARIA CIVIL
Agrupamento de Materiais
de Construção Civil

Geol. Claudio Sprighi Neto
Chefe do Agrupamento
CREA 81.270/D

Os resultados apresentados no presente documento têm significação restrita e se aplicam somente ao material em questão.
Os resultados deste documento não podem ser usados para fins promocionais.
A reprodução do documento para outros fins só poderá ser feita integralmente, sem nenhuma alteração.

ANEXO 2

Especificação das gasolinas segundo o regulamento técnico ANP n° 06/99.

Características	Métodos		Especificações	
	ABNT	ASTM	Gasolina Comum Tipo A	Gasolina Comum Tipo C
Cor	visual		Amarelada	Amarelada
Aspecto			Límpido	Límpido
Álcool etílico anidro % v/v	NBR 13992		Zero	20 ± 1
Densidade relativa a 20°C / 4°C	NBR 7148 / 14065	D 1298 / D 4052	anotar	anotar
Destilação: 10% evaporado, °C, máx.	NBR 9619	D 86	70.0	70.0
Destilação: 50% evaporado, °C, máx.			130.0	80.0
Destilação: 90% evaporado, °C, máx.			190.0	190.0
PFE, máx.			220.0	220.0
Resíduo, máx.			2.0	2.0
Pressão de vapor (Kpa) a 37.8°C	-	D 4953 D 5190 D 5191 D 5482	45.0 a 62.0	69.0 máx.
Nº de Octano Motor – MON, mín.	MB 457	D 2700	80.0	80.0
Corrosividade ao cobre a 50°C, 3 h, máx	NBR 14359	D 130	1	1
Goma Atual Lavada, mg/100 mL, máx.	NBR 14525	D 381	5	5
Enxofre, % m/m, máx.	NBR 6563	D 1266 D 2622 D 3120 D 4294 D 5453	0.12	0.10
Benzeno, %v/v, máx.	-	D 3606 D 5443 D 6277	2.7	2.0
Chumbo, g/L, máx.	-	D 3237	0.005	0.005
Período de Indução a 100°C, min., mín.	NBR 4478	D 525	360	360

Características determinadas com o emprego das Normas Brasileiras (NBR) e métodos Brasileiros da Associação Brasileira de Normas Técnicas (MB-ABNT) e de normas da American Society for Testing and Materials (ASTM).