

ENSAIOS COM CONE RESISTIVO EM SOLOS SATURADOS

Alexandre de Oliveira Pacheco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida , Ph.D.

Prof^a. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.

Prof. Roberto Quental Coutinho, Ph.D.

Prof. Renato Pinto da Cunha , Ph.D.

Dra. Ana Cristina Malheiros Gonçalves Carvalho D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2004

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

PACHECO, ALEXANDRE DE OLIVEIRA

Aplicação do cone resistivo em solos saturados [Rio de Janeiro], 2004

XXI, 150p. 29,7cm (COPPE/UFRJ, MSc. Engenharia Civil, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE

1-Condução elétrica em meios porosos

2- Condutividade de solos

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ENSAIOS DE RESISTIVIDADE EM SOLOS SATURADOS

Alexandre de Oliveira Pacheco

Abril / 2004

Orientador: Márcio de Souza Soares de Almeida

Programa : Engenharia Civil

Esta dissertação apresenta resultados de um estudo experimental realizado no laboratório e no campo sobre a resistividade medida em meios porosos. A corrente elétrica é gerada a partir de uma diferença de potencial elétrica tanto em condutores como em sistemas de partículas, contudo o fenômeno de transporte de carga muda. Em materiais que permitem o deslocamento de carga elétrica facilmente, a condutividade elétrica é elevada, portanto, a resistividade é baixa.

Os ensaios de laboratório foram realizados utilizando diferentes tipos de solo, granulares e finos. Os solos granulares ensaiados tinham diferenças expressivas em relação à granulometria e à forma dos grãos. Os corpos de prova foram obtidos por meio de chuveiramento a fim de obter diferentes índices de vazios. A resistividade integral da areia foi medida com o cone inserido dentro do solo e fazendo percolar soluções com diferentes concentrações. Amostras do reservatório foram coletadas para que fossem realizadas análises químicas. Os solos finos foram simulados utilizando caulinita. Os corpos de prova foram obtidos homogeneizando a caulinita com soluções de diferentes concentrações salinas em uma bateadeira industrial. Com o cone resistivo realizou-se a medição da condutividade integral e com um condutímetro, a do fluido.

Observou-se que para um determinado tipo de solo a razão entre a condutividade integral e a do fluido é constante e representado pelo fator de formação do solo. Este parâmetro mostrou-se ser sensível à porosidade, à forma e à dimensão dos grãos, contudo a distribuição granulométrica mostrou pouca influência. A redução de condutividade devido à adição de partículas ao fluido foi atribuída à redução de área para que ocorra a condução e ao aumento do comprimento das linhas de corrente, devido à tortuosidade do solo.

Nos ensaios de campo foi possível verificar que a existência de um material variado na superfície e uma crosta sobreadensada reduzem a condutividade elétrica devido à redução da porosidade. Na camada normalmente adensada a condutividade integral apresentou ligeiro aumento, que foi atribuído ao aumento da concentração salina do meio. No contato com o solo residual a condutividade tende a diminuir bruscamente até atingir capacidade limite do equipamento.

Abstract of the Thesis presented to COPPE/UFRJ as partial fulfillment of the requirement for the Degree of Master in Science (M.Sc.)

Resistivity tests in saturated soils

Alexandre de Oliveira Pacheco

April / 2004

Advisor: Márcio de Souza Soares de Almeida

Department: Civil Engineering

This work presents the results obtained from an experimental study in the laboratory and *in situ* tests over electrical resistivity in soils. Electrical current is generated whenever a difference of electrical potential is applied, either to conductors either to soils, although the phenomenon involved in charge transportation is different. In materials which electric charge is easily transported, the conductivity is high, therefore the resistivity is low.

The laboratory experiments were carried out using different types of soils, grained and thin. The grained soils tested were different related to grain distribution and shape. All the samples were made using the "shower" method, in order to obtain different void ratios. The bulk resistivity of the grained soil was measured using the resistivity cone inside the specimen while solutions with different concentrations flowed through the soil. The solution from the reservoir were analysed chemically and the fluid conductivity determined with a conductivimeter. The fine soils were simulated using culinite. The samples were made in an industrial mixing machine. Using the resistivity cone, the bulk value was measured and that of the fluid with a conductivimeter.

For a specific kind of soil, it was observed, that the conductivity of the fluid divided by the bulk conductivity is constant and called formation factor of the soil. This parameter is sensitive to the porosity and grain shapes of the particles, while grain distribution showed little effect. The reduction of conductivity that happens due to the addition of particles is attributed to the reduction of conduction surface and increase of the electric current length, caused by the tortuosity of the soil.

In the field tests it was observed that the existence of a mixed material and overconsolidated clay reduce the conductivity due to the reduction porosity. In the layer normally consolidated clay the bulk conductivity had a smooth increase possibly caused by an increase in the salinity of the water. In the contact with the residual soil the bulk conductivity started to decrease rapidly until the limit of the test.

Manifesto

O autor do presente trabalho manifesta seus agradecimentos e reconhecimento às seguintes pessoas:

Ao professor orientador Márcio de Souza Soares de Almeida pela orientação e atenção dedicada, não só à presente pesquisa, mas também pelo acompanhamento do trabalho realizado antes do mestrado.

Aos professores da instituição Feranando Artur Brasil Danzinger, Maria Claudia Barbosa, Maurício Erlich, Claudio Mahler, de maneira direta ou indireta ajudaram no trabalho e aos professores Willy Lacerda, Ian Martins, Paulo Eduardo Santa Maria, Francisco Casanova, Ana Luiza Coelho Neto, Francisco Lopes, Laura Mota responsáveis pela sólida formação ao longo do período de créditos do mestrado.

Ao professor Fernando Schnaid, doutorando Diego Nacci e todo o resto do grupo da UFRGS (incluindo técnicos e bolsistas) responsáveis pela produção da ponteira resistiva da COPPE/UFRJ.

À equipe de técnicos do Laboratório de Geotecnia pelo apoio dado durante todo o tempo de trabalho no laboratório. A destacar Luiz Carlos, Sérgio Iorio, Mauro Gomes, Ricardo Gil, Max Souza, que tiveram influência direta sobre o trabalho e os demais que sempre apoiaram no dia-a-dia do laboratório. O autor manifesta também a consideração à equipe de funcionários do laboratório de geotecnia e do Programa de Engenharia Civil, como a Bete, a Rita, Jairo, Célio, Thelmo, Jociane e também à equipe de segurança.

Aos colegas de turma de mestrado Viviane, Francisco, Eduardo, Nicolle Freitas, Renata Rocha, Carolina, Verônica, Sidiclei, Cinconegue, André Luiz, Candida, Saulo, André Luiz, Rafael, Fernando, Heltom e Marcos entre outros pelo apoio dado sempre que necessário ao longo de todo o curso de mestrado. O presente autor expressa também seus agradecimentos a alunos da casa mais antigos, dentre os quais destacam-se Marcos Massao Futai e à Tatiana, pelo apoio dado desde a época da iniciação científica, Ana Paula, Rose Mary, Ana Carla, Edgard, Fabrício, Anderson, Ana Cecília, Cintia e Socorro entre outros. O presente autor se lembra ainda de agradecer a alunos de iniciação científica, que por muito

tempo foram colegas de graduação, a destacar a Raquel, Vinícios, Rachel, Renilson, Vitor, Anselmo entre outros.

O presente autor manifesta a consideração aos pais, Marcus Peigas Pacheco, Maria Carmelita de Oliveira Pacheco, irmãs, Claudia e Cacilia de Oliveira Pacheco, às tias Celma e Ana Maria, aos primos, Fabrício e Daniela. Parentes mais idosos que contribuíram para o amadurecimento do presente autor, como os avós Paulino e Maria, e Danilo e Neli. A parentes mais afastados mas que estão sempre próximos, como a Tia Célia, Raimunda, Paulão e Paulinho e as respectivas famílias entre muitos outros.

Aos professores da Escola de Engenharia, atual Escola Politécnica, dentre os quais destacam-se o Professor Fernando Danzinger e Maurício Ehrlich (também professores da graduação), à Maria Cristina, Batista, Ortigão, Flavio Miguez, Paulo Cezar, Mário Alvarenga, Claudia Eboli, Ricardo Antonini. O presente autor manifesta especial consideração ao Professor Dirceu Veloso, não só pela dedicação ao ensino, mas pelo que representa para a engenharia e como pessoa.

Aos colegas da graduação que contribuíram, não só na época da graduação, para um convívio agradável na instituição ao longo do tempo de estudo. Dentre os quais destacam-se os colegas de turma Adriana, Barreto, Daniel, André (deba), Bruno, Felipe, Tiago, Jorge, Gustavo, Vitor, Ingrid, Fernanda, Isabel, Lucas, André, Lusía, Vilela, Michele, Bruno, Fábio e contemporâneos que não eram da turma, Léo (falecido), George, Otávio, Gabriele, Felipe Botrel, Rui, Tatiana e Fernanda.

O presente autor agradece ainda a pessoas que fora da instituição fazem parte do dia-a-dia, a destacar o grande amigo Júlio Cezar e a Maria Joana, Gabriella, Felipe, Leandro, Eduardo, Pablo, Alexandre (Prusik), Lino, Alexandre (Xandinho), Mônica, Marcelo, Marta, Daniela, Fabiana, Joana entre outros amigos pessoais.

Ao PRONEX pelo apoio financeiro que possibilitou realizar este trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado para o presente autor.

Por fim à Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, mais que uma Segunda casa, um lar para seus alunos. Instituição de ensino bicentenária que já deu a dezenas de milhares de brasileiros e estrangeiros uma alavanca para ingressar na vida profissional.

ÍNDICE

1-Introdução.....	1
1.1- Relevância do estudo.....	1
1.2- Objetivos.....	4
1.3- Descrição dos capítulos.....	4
2- Revisão bibliográfica.....	6
2.1- Princípios físicos da eletricidade.....	6
2.1.1- Campo elétrico.....	6
2.1.2- Corrente elétrica.....	8
2.1.2.1- Corrente contínua.....	9
2.1.2.2- Corrente alternada.....	10
2.1.2.3- Fenômeno da condução em meios porosos.....	11
2.1.3- Modelo matemático para o fenômeno físico.....	12
2.2- Resistividade do solo.....	16
2.2.1- Grau de saturação.....	18
2.2.2- Tipo de solo.....	18
2.2.2.1- Areias.....	19
2.2.2.2- Argilas.....	20
2.2.2.3- Misturas.....	20
2.2.3- Influência da compactação.....	21
2.2.3.1- Energia de compactação.....	21
2.2.3.2- Umidade de compactação.....	22
2.2.3.4- Grau de saturação de solos compactados.....	23
2.2.3.5- Anisotropia.....	24

2.2.4 - Propriedades índices do solo.....	25
2.2.4.1- Limite de Liquidez.....	25
2.2.4.2- Índice de Plasticidade.....	26
2.2.5- Temperatura.....	26
2.2.6- Fluido intersticial.....	28
2.2.6.1- Concentração do fluido intersticial.....	29
2.2.6.2- pH do fluido intersticial.....	30
2.2.6.3- Viscosidade.....	30
2.2.6.4- Pressão.....	30
2.2.6.5- Tipos de contaminantes.....	30
2.2.7- Polarização do solo.....	32
2.3- Cone resistivo.....	34
2.3.1- Número de eletrodos.....	35
2.3.2- Espaçamento entre os eletrodos.....	36
2.3.3- Polarização dos eletrodos.....	37
2.4- Fator de formação.....	38
2.4.1- Efeito da forma dos grãos.....	41
2.5- Conclusões parciais sobre a revisão bibliográfica.....	42
3- Apresentação do Cone resistivo e dos Solos ensaiados em laboratório.....	45
3.1- A ponteira resistiva.....	45
3.1.3-O cabo / conectores.....	47
3.1.4- A placa geradora de sinal.....	47
3.2-Solos ensaiados.....	50
3.2.1- Areias ensaiadas.....	50
3.2.2- Preparo das areias para os ensaios.....	53
3.2.3- Índice de vazios.....	56

3.3- O método da pluviação ao ar.....	56
3.3.1-Determinação do índice de vazios.....	59
3.4- Solos finos.....	62
3.5- Densidade real dos grãos.....	64
4- Ensaio realizados no laboratório.....	66
4.1- Introdução.....	66
4.2- Calibração.....	66
4.3- Variação de condutividade com a variação de salinidade do meio.....	73
4.4- Ensaio realizados no laboratório.....	75
4.4.1- Ensaio realizados em areia.....	75
4.4.2- Ensaio realizados em argila.....	80
4.5- Nomenclatura dos ensaios realizados.....	82
5-Resultados e análise dos resultados dos ensaios realizados no laboratório.....	85
5.1- Introdução.....	85
5.2- Resultados dos ensaios com areias.....	85
5.2.1- Condutividade integral versus volume de vazios.....	85
5.2.2- Fator de Formação versus porosidade.....	87
5.3- Resultados dos ensaios com caulim.....	95
5.4- Conclusões parciais dos ensaios de laboratório.....	98
6- Ensaio de campo.....	102
6.1 -Experiência prévia	102
6.2- Ensaio na área do Panamericano.....	103
6.3- Localização da área ensaiada.....	103
6.4- Perfil geotécnico.....	106
6.5- Metodologia do ensaio <i>in situ</i>	107
6.6- Coleta de água do lençol freático.....	109
6.7- Aquisição de dados.....	110

6.9- Resultados.....	111
6.9- Análise dos resultados.....	111
6.9.1- Resultados do cone resistivo.....	111
6.9.2- Cone resistivo versus CPTU.....	114
6.10- Conclusões parciais.....	116
7- Conclusões.....	118
a) Condutividade / Tortuosidade.....	118
b) Fator de Formação.....	119
c) Ensaio de Campo.....	120
7.1- Sugestões para pesquisas futuras.....	121
Referências bibliográficas.	122
Anexo 1- Determinação da densidade real dos grãos.....	127
Anexo 2- Determinação dos índices físicos.....	132
Anexo 3- Resultados dos ensaios com areias.....	136
Anexo 4- Resultados dos ensaios com caulim.....	147
Anexo 5- Seção transversal da luva que conecta o cone resistivo à haste.....	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- (a) Representação esquemática de linhas de campo elétrico originadas de uma carga puntiforme, positiva e isolada; (b) Linhas de campo elétrico evidenciadas por fragmentos de fibras suspensas em óleo.

Figura 2.2- (a) Representação esquemática das linhas de campo elétrico de um dipolo; (b) linhas de campo em uma suspensão de fragmentos de fibra em óleo (Tipler, 1999).

Figura 2.3- Representação esquemática do desenvolvimento de linhas equipotenciais e as de corrente (a) no modelo idealizado, ou em meio aquoso e (b) em um meio particulado.

Figura 2.4- Modelo utilizado para a determinação da superfície de uma equipotencial (a) em elevação e (b) em vista superior e (c) modelo retificado (Miranda Neto, 2002)

Figura 2.5- Relação entre a resistividade elétrica, umidade e energia de compactação (Hassanein et al., 1996)

Figura 2.6- Relação entre a resistividade elétrica e o grau de saturação (Hassanein et al., 1996)

Figura 2.7- Resistividade elétrica medida na vertical e na horizontal plotada contra a umidade de compactação para duas energias de compactação distintas (Hassanein et al., 1996)

Figura 2.8- Relação entre a resistividade obtida na umidade ótima de compactação contra o limite de liquidez (Hassanein et al., 1996)

Figura 2.9 Relação entre a resistividade obtida na umidade ótima de compactação contra o limite de plasticidade (Hassanein et al., 1996).

Figura 2.10- Relação entre a resistividade elétrica obtida na umidade ótima e a temperatura (Hassanein et al., 1996).

Figura 2.11- Resultados experimentais obtidos por Weemes, 1990 para resistividades medidas em função da frequência aplicada para configurações de eletrodos diferentes.

Figura 2.12- Resultados FF obtidos por Jackson, 1978 em diferentes porosidades para diferentes tipos de materiais.

Figura 2.13- Resultados FF obtidos por Jackson, 1978 em diferentes porosidades para materiais com diferentes porcentagens de conchas.

Figura 3.1 – Fotografia do cone resistivo adquirido pelo programa PRONEX.

Figura 3.2- Representação esquemática da seção transversal do cone resistivo utilizado na presente pesquisa.

Figura 3.3- Conjunto de equipamentos necessários para medição de condutividade elétrica por meio do cone resistivo.

Figura 3.4- Detalhe dos conectores utilizados nas extremidades do cabo “manga”.

Figura 3.5- Detalhe da parte traseira do recipiente no qual a placa geradora de sinal está contida.

Figura 3.6- Face frontal do recipiente no qual está contida a placa geradora de sinal.

Figura 3.7- Comparação entre as curvas granulométricas das três areias ensaiadas.

Figura 3.8- Conchas provenientes da lagoa de Araruama utilizados para realizar ensaios com conchas misturadas à areia de São Francisco.

Figura 3.9- Objetos eliminados do material recolhido da praia.

Figura 3.10- Lavagem da areia por meio de agitação manual com água corrente.

Figura 3.11- Eliminação do excesso de água do reservatório de lavagem da areia.

Figura 3.12- Secagem ao ar da areia de São Francisco utilizada nos ensaios de resistividade.

Figura 3.13- Conjunto de peneiras utilizadas para fazer os corpos de prova utilizando a areia de São Francisco.

Figura 3.14- Conjunto de peneiras utilizadas no método adaptado para a elaboração de corpos de prova com a areia de Itaipuaçu e a misturada.

Figura 3.15- Chuveramento pelo método adaptado realizado com o solo misturado mostrando a) o funil e o conjunto de peneiras; e b) um detalhe da queda no balde.

Figura 3.16- Método modificado de chuveramento utilizando a areia de São Francisco misturada com conchas.

Figura 3.17- Batedeira industrial utilizada para homogeneizar os corpos de prova de caulim

Figura 4.1a- Condutivímetro utilizado na etapa de calibração e para medição de condutividade dos fluidos; a) vista frontal e b) detalhe das placas.

Figura 4.2- Baldes utilizados na fase de calibração, sendo que a do meio foi utilizada para a execução dos ensaios.

Figura 4.3- Representação esquemática da posição do cone resistivo em relação ao balde. Desenho fora de escala.

Figura 4.4- Comparação entre o cone resistivo e o balde utilizado nos ensaios.

Figura 4.5- Curvas de calibração dos quatro canais, obtidos em diversos recipientes.

Figuras 4.6- Curvas de calibração individualizadas pelos canais e com o coeficiente de correlação calculado por programa de computador.

Figura 4.7- Variação da condutividade de água destilada em função da salinidade do meio.

Figura 4.8- Aparato montado para a execução de ensaios com as areias.

Figura 4.9- Balde, com as modificações, no qual foram realizados os ensaios.

Figura 4.10- Balde utilizado no ensaio com areia submersa. No ponto de saída há perda de material, mas que ocorre em proporções pequenas e longe dos eletrodos do cone resistivo.

Figura 4.11- Cone resistivo no caulim em processo de sedimentação. Nesta Fotografia pode-se observar bolhas de ar sendo eliminadas.

Figura 5.1- Variação da condutividade integral em relação ao volume de vazios percolado no ensaio utilizando a areia da São Francisco com índice de vazios de 0,605.

Figura 5.2- Relação entre a condutividade integral e a do fluido para a areia de São Francisco na porosidade de 0,416.

Figura 5.3- Região que corresponde à perda de condutividade elétrica no plano da condutividade contra a condutividade do fluido.

Figura 5.4- Regiões associadas à perda de condutividade devido à presença dos grãos do solo.

Figura 5.5- Representação esquemática das funções que levam a condutância à voltagem e a voltagem à condutividade.

Figura 5.6- Esquema da influência de uma concha (a) e de um grão (b), representado por uma esfera, sobre a deformação da rede de fluxo elétrica

Figura 5.7- Variação de condutividade ao longo do tempo no ensaio Ca-2-1.

Figura 5.9- Comparação entre a condutividade do fluido, a integral, e a obtida exclusivamente devido à redução de área.

Figura 5.11- Relação entre o fator de formação e a porosidade para todos os materiais ensaiados em laboratório.

Figura 6.1- Ensaio com cone resistivo em área contaminada por Creosoto (Lunne et al., 1997).

Figura 6.2- Resultados de condutividade obtidos no Aeroporto Salgado Filho por Nacci, 2003.

Figura 6.3- Planta de parte do bairro da Barra da Tijuca, na qual está locado a área na qual serão realizados os jogos Pan-Americanos.

Figura 6.4- Planta de locação dos ensaios realizados em campo

Figura 6.5- Local onde foram realizados os ensaios, com destaque às pranchas de madeiras utilizadas no transporte do equipamento de cravação.

Figura 6.6- Boletim de sondagem do local dos ensaios.

Figura 6.7- Gerador de energia utilizado na segunda campanha de ensaios sendo descarregado do caminhão munk.

Figura 6.8- Conjunto que é introduzido no solo pelo equipamento de cravação: cone resistivo, luva e Haste.

Figura 6.9- Equipamento de cravação com o cone resistivo conectado à primeira haste. Fotografia ilustrativa tirada no laboratório

Figura 6.10- Esquema da seqüência utilizada para obter os perfis de resistividade.

Figura 6.11- Comparação entre resultados de CPTU com os de cone resistivo.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Determinação do volume interno do balde utilizado para os ensaios.

Tabela 3.2- Comparação entre os índices de vazios obtidos em testes com valores obtidos por Oliveira Filho, 1987.

Tabela 3.3- Índice de vazios e porosidades medidas para a areia de Itaipuaçu.

Tabela 3.4- Índice de vazios e porosidade medidas para a areia obtida pela mistura da areia de São Francisco com a de Itaipuaçu.

Tabela 3.5- Índice de vazios e porosidade medida para a areia de São Francisco misturada com conchas.

Tabela 3.6- propriedades do caulim estudado.

Tabela 3.7- Resumo das densidades reais dos grãos obtidos para os materiais ensaiados no laboratório

Tabela 4.1- Equações de calibração obtidas para os canais 2, 3 e 4.

Tabela 4.2- Valores calculados nos limites inferior e superior dos canais 2, 3 e 4.

Tabela 4.3- Identificação de propriedades de cada ensaio realizado com areia.

Tabela 4.3- Identificação de propriedades de cada ensaio realizado com areia.

Tabela 5.1-Fatores de Formação obtidos para a areia de São Francisco.

Tabela 5.2-Fatores de Formação obtidos para a areia de Itaipuaçu.

Tabela 5.3-Fatores de Formação obtidos para a mistura da areia de São Francisco com a de Itaipuaçu.

Tabela 5.4-Fatores de Formação obtidos para a mistura da areia de São Francisco com conchas.

Tabela 5.5- Comparação entre o parâmetro m da fórmula de Archie obtidos na presente pesquisa com valores obtidos por outros autores.

Tabela 5.6- Resumo dos fatores de formação e os de tortuosidade obtidos experimentalmente.

Tabela 5.7- Resumo dos resultados obtidos com o caulim.

Tabela 6.1- Condutividades e fatores de formação medidos no campo e em laboratório.

LISTA DE SÍMBOLOS

A- Área disponível para a condução elétrica.

A_m - Área da superfície equipotencial média.

a- Parâmetro empírico para determinar o fator de formação pelo modelo de Winsauer.

$\vec{a}$ - Aceleração da gravidade.

B- Parâmetro empírico para a determinação da resistividade não saturada.

C- Condutância elétrica.

C_F - Fator de forma geométrico do cone resistivo

C_{te} - Coeficiente termoeletrico para o cálculo da resistividade a 25 °C.

c- Concentração de íons.

d- Diâmetro do cone resistivo.

$\vec{E}$ - Campo elétrico.

e- Índice de vazios.

$\vec{F}$ - Força eletrostática.

FF- Fator de formação.

Ft- Fator de tortuosidade.

Gs- Densidade real dos grãos.

i- Corrente elétrica.

i_{rms} - Corrente elétrica ‘rms’ (root mean square), em circuitos alternados.

i_{med} - Corrente elétrica média, em circuitos alternados.

i_{max} - Corrente elétrica máxima, em circuitos alternados.

k_i - Constante de proporcionalidade entre a concentração e a condutividade elétrica do meio.

L- Comprimento de uma linha de corrente.

M- Massa.

m- Constante empírica da Fórmula de Archie.

n - porosidade.

$\vec{P}$ - Força peso.

q - carga de uma partícula

R - Resistência elétrica.

r - Raio de uma equipotencial média do cone resistivo.

r_{med} - Raio de uma equipotencial média medida a partir do centro do cone resistivo.

$S(\%)$ - Grau de saturação, dado em porcentagem.

S - Simens.

t - Tempo.

T - Temperatura.

V - Diferença de potencial em corrente contínua.

w - Umidade.

w_L - Limite de liquidez.

w_p - Limite de Plasticidade.

α - Parâmetro empírico para determinar a resistividade a 18°C.

ε - Diferença de potencial em corrente alternada.

ε_{rms} - Diferença de potencial em “rms” em corrente alternada.

σ - Condutividade.

σ_{flu} - Condutividade de um fluido.

σ_{int} - Condutividade integral do solo.

σ^*_{int} - Condutividade integral do solo devido exclusivamente à redução de área.

ρ — Resistividade elétrica.

$\rho_{n\grave{a}o\ sat}$ — Resistividade elétrica não saturada do solo.

ρ_{sat} — Resistividade elétrica saturada do solo.

ρ_t — Resistividade elétrica em função da temperatura.

Capítulo 1

Introdução

1.1- Relevância do estudo

A degradação da qualidade da água subterrânea tem sido um aspecto de extrema relevância na qualidade de vida de uma determinada região. Com o avanço da legislação sobre questões ambientais, o escopo de uma investigação geoambiental precisa combinar as propriedades físicas e físico-químicas do solo e da água às técnicas de remediação. As intervenções precisam estar de acordo com a legislação vigente, preservando a saúde humana e a do ambiente, obtendo simultaneamente a melhor relação custo-benefício. Por este motivo a detecção e caracterização rápida de sítios contaminados é interessante, tanto para o meio ambiente, bem como para a empresa responsável pela limpeza.

A presença de contaminantes pode ser detectada por diversas maneiras, por coleta de amostras do solo, da água e do ar ou por métodos indiretos, cujos objetivos consistem em medir alguma propriedade do solo que venha a ser alterado devido à presença do contaminante. As técnicas de coletas de amostras têm sido modernizadas no caso de investigações geo-ambientais, tendo em vista a possibilidade de encontrar substâncias nocivas. Além disso as técnicas tradicionais têm influência significativa sobre a qualidade da amostra recolhida. Há ainda a questão do material extraído na amostragem e que não é aproveitado. No caso de estar contaminado, este material ainda precisa receber um tratamento apropriado antes de ser eliminado.

Técnicas modernas de investigação geo-ambientais incluem medições de propriedades do solo de maneira indireta, ou seja, propriedades específicas do solo são medidas e sobre o resultado é feita uma interpretação, objetivando chegar a conclusões sobre o estado do perfil analisado. A medição da resistividade do solo surge como um bom exemplo de medição indireta. O objetivo é perceber características do perfil geotécnico, mas mede-se a resistividade do meio. É necessário, portanto, possuir conhecimento suficiente para poder interpretar os resultados.

Existem diversas formas de se proceder para obter as medições indiretas e muitas delas são realizadas em ensaios *in situ*, pois os resultados são obtidos imediatamente, além de não ter que extrair amostras do solo. Tais medições podem ser realizadas a partir da superfície, ou dentro do perfil de solo. Neste segundo caso, é necessário que um equipamento específico seja introduzido, o que ocorre por cravação contínua.

Existem diversos equipamentos de cravação contínua, também denominada de cravação direta, que podem ser utilizadas em investigações geotécnicas e geo-ambientais. O CPTU, piezocone, é um instrumento de cravação contínua que mede, basicamente, resistência (de ponta e lateral) e poropressão. Os resultados podem ser interpretados a fim de obter perfis de estratigrafia do solo.

A medição da poropressão, antes e após a dissipação, revela características importantes da investigação. A dissipação pode ser associada à condutividade hidráulica do meio e a poropressão de equilíbrio mostra a carga piezométrica, o que indica os caminhos de fluxo subterrâneo, tanto na vertical como na horizontal.

Sensores têm sido incorporados ao CPTU a fim de otimizar a investigação geoambiental. Um dos primeiros sensores a ser adicionado ao CPTU foi o de temperatura (Lunne et al., 1997). A princípio os medidores de temperatura tinham o objetivo de fazer ajustes de calibração e localizar regiões em subsuperfície com alguma anomalia térmica. Atualmente a medição da temperatura pode ter o objetivo de associar os resultados medidos à atividade biológica ou química do solo.

Outro sensor adicionado ao CPTU foi o medidor de resistividade, o módulo resistivo. A condutividade é o inverso da resistividade, portanto o conceito é diferente, mas existe uma relação direta entre eles, apresentada na Equação 1.1.

$$condutividade(\mu S / cm) = \frac{10.000}{resistividade(\Omega - m)} \quad (1.1)$$

Segundo Lunne et al., 1997 a medição de propriedades eletro-resistivas foi inicialmente realizada por Krozen, a fim de avaliar a densidade *in situ* de areias.

Recentemente esta técnica tem sido utilizada para identificar a presença de contaminantes (Campanella et al., 1990).

O presente trabalho enquadra-se na linha de pesquisa de investigação de campo da COPPE/UFRJ. Ao longo dos anos de pesquisa desta instituição diversos equipamentos foram desenvolvidos dentre os quais pode-se citar o CPTU desenvolvido por Danziger (1990) e Bezerra (1996), e outros aprimorados como a palheta elétrica e atualmente o T-bar e o cone resistivo.

O primeiro cone resistivo foi adquirido por meio do PRONEX (programa de excelência para instituições de pesquisa), fruto da integração entre a COPPE/UFRJ, a UFRGS e a UFPE. Este equipamento teve sua tecnologia estudada na UFRGS por Nacci et al. (2003), em tese de doutorado ainda em andamento. Um dos objetivos deste trabalho foi de dominar o conhecimento tecnológico pertinente ao desenvolvimento do cone resistivo a fim de reproduzi-lo. Este objetivo foi alcançado a ponto do cone resistivo usado na presente pesquisa ter sido integralmente construído na UFRGS.

Diversas investigações geoambientais têm sido feitas na COPPE-UFRJ nos últimos anos tanto em laboratório, como em campo. No laboratório foram realizados estudos sobre os mecanismos de locomoção de contaminantes por Mendonça (2001), que descreveu metodologias para avaliar os parâmetros de transporte de contaminantes no solo. Na linha de pesquisa de remediação de solos contaminados existem duas pesquisas em andamento, uma de doutorado e outra de mestrado, que têm como objetivo estudar a influência da eletrocinése na remediação. Em relação às investigações geoambientais de campo Barbosa e Almeida (2001) realizaram estudos sobre o canal do Fundão e a Lagoa de Jacarepaguá, descrevendo as condições destes ambientes em decorrência do acúmulo de sedimentos.

O interesse em dominar o uso do cone resistivo é um avanço na linha de pesquisa de áreas contaminadas. Pretende-se dominar o uso desta ferramenta a fim de aplicá-la em investigações geoambientais de pesquisas futuras. Tais investigações têm sido objetivos de diversas pesquisas, com em Souza (2001) que utilizou diversas técnicas para avaliar o estado de contaminação por derivados de petróleo e por Serzedelo de Almeida (1999), que fez um estudo sobre o estado de contaminação do

canal do Fundão. Miranda Neto (2002) realizou um estudo sobre a investigação geoambiental e a remediação no contexto da análise de risco. Neste estudo o estado de contaminação de um aterro industrial foi avaliado medindo-se a resistividade do subsolo utilizando métodos superficiais. Pesquisas futuras, na linha de áreas contaminadas, poderão aplicar o cone resistivo e agregar conhecimento ao uso desta ferramenta.

1.2- Objetivos

A presente pesquisa tem por objetivo principal realizar um estudo fundamental do cone resistivo em solos saturados. Objetivou-se verificar algumas propriedades eletro-resistivas do solo observadas por outros autores a fim de agregar conhecimento à interpretação de resultados com o cone resistivo.

O trabalho constitui-se basicamente de uma investigação em laboratório e uma campanha de ensaios em campo. No laboratório foram realizados ensaios com o objetivo de confirmar comportamentos eletro-resistivos observados por diversos autores na literatura internacional e determinar parâmetros para diferentes tipos de solo. O ensaio de campo ocorreu em um sítio sem contaminação com o intuito de interpretar o perfil de resistividade e compará-lo com resultados obtidos pelo CPTU e sondagem SPT.

1.3- Descrição dos capítulos

Esta dissertação foi organizada em oito capítulos. No Capítulo 2 está apresentada uma revisão bibliográfica sobre o fenômeno da condução elétrica destacando a condutividade em meios porosos. Neste capítulo foi feita uma coletânea sobre a experiência de diferentes autores que relacionaram a resistividade medida às propriedades físicas do solo.

No Capítulo 3 estão apresentados os tipos de solo que foram ensaiados em laboratório. Este capítulo mostra a caracterização do solo, bem como as técnicas utilizadas na moldagem dos corpos de prova. Ainda neste capítulo, foi feita a apresentação do cone resistivo utilizado na pesquisa, destacando as características e procedimentos para a utilização.

O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada nos ensaios de laboratório. A rotina de ensaios e as hipóteses de trabalho são levantadas para cada tipo de solo. Os resultados e as análises estão apresentados no Capítulo 5. Neste capítulo os resultados obtidos são comparados a outros, obtidos por diferentes autores, e às propriedades físicas do solo, tais como a porosidade e a forma dos grãos.

O Capítulo 6 refere-se à investigação de campo. É feita uma breve descrição geotécnica do local, dos equipamentos e dos procedimentos adotados. Ainda neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos.

Finalmente no Capítulo 7 resumam-se as conclusões obtidas e apresentam-se sugestões para pesquisas futuras.

O Anexo 1 apresenta o cálculo das densidades reais dos grãos de cada material ensaiado e se divide em relação ao material. O Anexo 1.1 refere-se à areia de São Francisco, o 1.2 à areia de Itaipuaçu, o 1.3 à areia obtida pela mistura das anteriores, o 1.4 à areia de São Francisco misturada com conchas e o 1.5 ao caulim.

O Anexo 2 apresenta o cálculo das propriedades das areias ensaiados, tais como o índice de vazios, porosidade e peso específico e volume de vazios de cada corpo de prova e também se divide em relação a cada material.

O Anexo 3 mostra os resultados obtidos com as areias ensaiadas e o Anexo 4 mostra os resultados dos ensaios realizados com caulim.

O Anexo 5 mostra a seção transversal da luva que faz a conexão entre o cone resistivo e a primeira haste em ensaios de campo.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo está apresentada uma discussão sobre os aspectos pesquisados na literatura referentes à medição de resistividade do solo, com o uso do cone resistivo. Existem diversos tipos de cones resistivos, uns são para fins comerciais e outros para fins acadêmicos, cada um com uma configuração própria. Apesar da presente pesquisa se basear no módulo resistivo desenvolvido na UFRGS (Nacci et al., 2003), neste capítulo estão apresentadas as características, vantagens e a aplicabilidades de alguns tipos de cones resistivos encontrados na literatura.

2.1- Princípios físicos da eletricidade

O princípio de funcionamento do cone resistivo segue leis da física, mais especificamente as da eletricidade. Por esse motivo faz-se necessário fazer uma revisão dos conceitos básicos envolvidos na condução de eletricidade (Tipler, 1999).

2.1.1- Campo elétrico

O campo elétrico ($\vec{E}$) é uma grandeza vetorial gerada tanto na eletrostática, como em circuitos quando existe uma diferença de potencial. O campo elétrico pode ser associado ao campo gravitacional terrestre. Neste caso, a diferença de potencial é gravitacional e age sobre os corpos que possuam massa. Por esse motivo é gerada uma força no sentido do campo gravitacional, que é denominada de força peso, dada por

$$\vec{P} = M \times \vec{a} \quad (2.1)$$

na qual $\vec{P}$ é a força peso, M é a massa do corpo e $\vec{a}$ é a aceleração da gravidade, ou seja, uma propriedade que depende do campo gravitacional. No caso eletrostático, um corpo carregado eletricamente dentro de um campo elétrico originado por outro corpo carregado sofre uma força que pode ser de atração ou repulsão, dependendo da carga elétrica das partículas (Tipler, 1999). Neste caso a força eletrostática entre as partículas é dada por

$$\pm \vec{F} = \vec{E} \times q \quad (2.2)$$

na qual $\vec{F}$ é a força eletrostática que será de atração (+) se as partículas tiverem cargas opostas, ou de afastamento (-) se tiverem cargas iguais, portanto, q é o valor da carga da partícula inserida no campo elétrico e $\vec{E}$ a magnitude do campo elétrico.

A região do espaço próxima a uma partícula carregada, fica sujeita a um campo elétrico que parte da partícula para todas as direções do espaço tridimensional em linha reta. A Figura 2.1a mostra uma representação esquemática das linhas do campo elétrico geradas por uma partícula carregada positivamente. A Figura 2.1b mostra a mesma situação, mas com fragmentos de fibra suspensos em óleo. O campo elétrico do corpo carregado no centro da figura induz cargas opostas às extremidades de cada fragmento, que se alinham paralelamente ao campo gerado. Pode-se observar que as linhas de campo elétrico se aproximam na região mais próxima à partícula onde o campo elétrico se torna mais forte, e a força elétrica é mais intensa (Tipler, 1999). Segundo esta interpretação, pontos equidistantes da partícula carregada possuem o mesmo potencial de modo que existe uma superfície no espaço em torno da partícula com o mesmo potencial. Esta superfície recebe a denominação de superfície equipotencial.

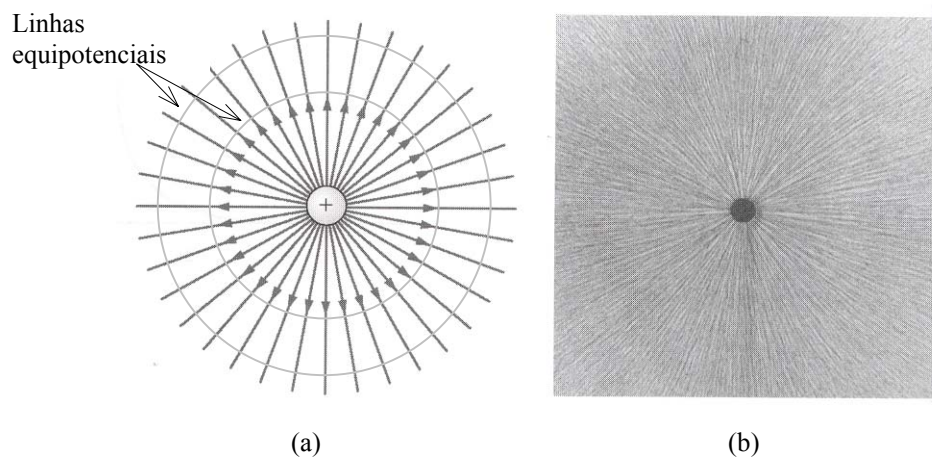


Figura 2.1- (a) Representação esquemática de linhas de campo elétrico originadas de uma carga puntiforme, positiva e isolada; (b) Linhas de campo elétrico evidenciadas por fragmentos de fibras suspensas em óleo (Tipler, 1999)

A Figura 2.2 mostra as linhas de campo elétrico geradas a partir de um dipolo elétrico. Na região próxima da carga positiva as linhas são direcionadas para fora da partícula, enquanto que no caso da partícula negativa são para dentro. Admitindo que as cargas tenham módulos iguais esta figura mostra como fica a configuração das linhas de campo elétrico em uma seção transversal. O efeito do campo elétrico no cone resistivo é semelhante e ganhará destaque no Item 2.1.2.3 deste capítulo.

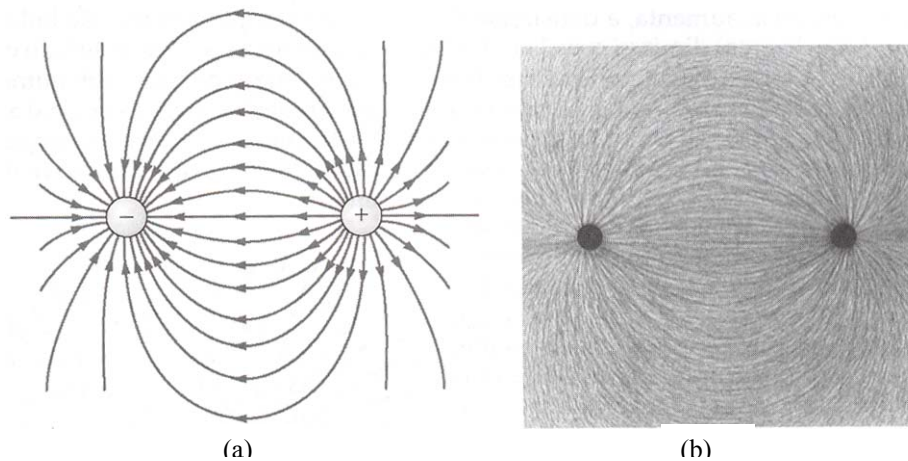


Figura 2.2_ (a) Representação esquemática das linhas de campo elétrico de um dipolo; (b) linhas de campo em uma suspensão de fragmentos de fibra em óleo (Tipler, 1999).

2.1.2- Corrente elétrica

A corrente elétrica (i) é definida como sendo a taxa de passagem de carga através da área da seção de um condutor (Tipler, 1999). Então, admitindo que Δq seja a variação de carga que passa por uma área A , no intervalo de tempo Δt , a corrente elétrica fica definida segundo a Equação 2.3, e a unidade é dada em Ampère, que equivale a um Coulomb por segundo.

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (2.3)$$

O sentido da corrente é tomado, convencionalmente, como o sentido do fluxo de cargas positivas. Por isto, em condutores, os elétrons deslocam-se no sentido oposto ao da corrente elétrica.

Num condutor metálico, o movimento dos elétrons livres é desordenado, com velocidade da ordem de 10^6 m/s (Tipler, 1999). Como as direções dos deslocamentos não são os mesmos a carga gerada é nula ($\Delta q = 0$). Quando um campo elétrico é aplicado os elétrons sofrem uma aceleração devido à força $\vec{F}$, dada pela equação 2.2, gerando assim a corrente elétrica (i).

2.1.2.1- Corrente contínua

A corrente contínua é gerada a partir de uma fonte que possua dois terminais, um com potencial positivo e outro negativo, gerando assim uma diferença de potencial constante. Na presença da fonte os elétrons presentes dentro do circuito elétrico tendem a se deslocar para o pólo positivo, gerando assim a corrente elétrica. Em geral essas fontes são baterias que transformam energia química em energia elétrica (Tipler, 1999).

Em muitos condutores de energia a resistência depende da diferença de potencial da corrente elétrica que o atravessa. Estes materiais são denominados de materiais Ôhmicos e seguem a lei de Ohm, descrita na Equação 2.4.

$$R \times i = V \quad (2.4)$$

Nesta equação R é a resistência do circuito, i é a corrente elétrica e V é a diferença de potencial aplicada ao circuito. A unidade de resistência é o Ôhm (Ω) e a da diferença de potencial é o Volt (V) e a de corrente, o Ampère.

A resistência elétrica não é uma propriedade do material, pois depende de aspectos geométricos do condutor, mas a resistividade (ρ) é uma propriedade intrínseca a cada material. A resistência (R) pode ser calculada pela Equação 2.5,

$$R = \rho \times \frac{L}{A} \quad (2.5)$$

na qual ρ é a resistividade do material, cuja unidade é o Ohm-metro ($\Omega \cdot \text{m}$), L e A são, respectivamente, o comprimento e a área da seção transversal do condutor.

2.1.2.2- Corrente alternada

No caso de circuitos elétricos com corrente alternada, o deslocamento das partículas não ocorre em um único sentido tendo em vista que a polarização da fonte se alterna com o tempo. Por esse motivo a magnitude da corrente alternada não é constante e varia de diferentes maneiras, podendo se assemelhar a uma onda senoidal ou não. A alternância da corrente elétrica deve-se à variação da diferença de potencial, identificada por ε que varia na mesma frequência que a corrente elétrica.

O valor rms é uma abreviação de uma expressão proveniente da língua inglesa “*root mean square*”, ou seja a raiz quadrada do valor médio ao quadrado. Esta grandeza vem a ser o valor da tensão ou corrente alternada medida por meio de voltímetros e amperímetros comumente comercializados e não os valores de pico (Tipler, 1999). O valor rms de uma corrente, i_{rms} , é definido pela Equação 2.6.

$$i_{rms} = \sqrt{i_{med}^2} \quad (2.6)$$

No caso de uma corrente senoidal pode-se estabelecer uma relação entre a corrente i_{rms} e a corrente máxima, i_{max} , por meio da Equação 2.7 (Tipler, 1999).

$$i_{rms} = i_{max} / \sqrt{2} \quad (2.7)$$

Para materiais Ôhmicos, a validade da lei de Ohm em circuitos de corrente alternada é mantida (Tipler, 1999), mas neste caso é preciso definir os valores envolvidos, se são correntes e tensão rms ou os de pico. No caso de valores rms, a lei de Ohm pode ser escrita sob a forma da Equação 2.8.

$$i_{rms} = \frac{\varepsilon_{rms}}{R} \quad (2.8)$$

Na qual ε_{rms} é a voltagem rms do circuito alternado.

O cone resistivo funciona emitindo uma corrente elétrica entre os eletrodos alternadamente. Em uma solução aquosa a introdução de uma corrente contínua induz uma alteração da distribuição de íons com o tempo, ou seja, cargas positivas tendem a se deslocar para a região próxima ao eletrodo negativo e as cargas negativas para a região próxima ao eletrodo positivo. Este fenômeno é denominado de “polarização dos eletrodos” e será abordado no Item 2.3.3.

2.1.2.3- Fenômeno da condução em meios porosos

Em condutores metálicos a condução de corrente elétrica ocorre devido ao deslocamento de elétrons, partículas carregadas negativamente, quando um campo elétrico é aplicado. No solo e em rochas a condução elétrica pode ocorrer devido a diferentes fenômenos de condução (Miranda Neto, 2002): (i) a eletrônica, (ii) a eletrolítica e (iii) a dielétrica.

A condução eletrônica ocorre em condutores e obedece à lei de Ohm, por esse motivo também recebe a denominação de condução Ôhmica. Nos solos esse tipo de condução ocorre nas superfícies de alguns tipos de solo constituídos de minerais condutores (Weemes, 1990). Esse tipo de condução é mais comum em argilas do que em partículas granulares devido à elevada superfície específica e à forma das partículas lamelares.

A condução eletrolítica ocorre pelo deslocamento de carga originada pela migração de íons. Esse tipo de condução ocorre em soluções eletrolíticas na presença de um campo elétrico. Como existem íons dissolvidos nos interstícios do solo, a condução eletrolítica é, em geral, a que tem mais influência sobre a condutividade total do solo (Campanella et al., 1990, Robertson et al., 1997).

O último tipo de condução elétrica que pode ocorrer em um meio poroso é a dielétrica que ocorre em materiais pouco condutores quando é aplicado um campo elétrico variável no tempo. Essa condição pode promover a polarização de algumas moléculas (Weemes et al., 1990) ou então de pequenos conglomerados de solo (Bodmer

et al., 1968). A questão da polarização do solo será discutida com mais detalhe no Item 2.2.7 deste capítulo.

Ao realizar a medição da resistividade do solo, obtém-se uma medida que é o resultado da sobreposição de diversos fenômenos de condução. A resistividade do solo depende de características do meio, como a condutividade do fluido intersticial, da porosidade, da tortuosidade dos canalículos, da superfície específica e da capacidade de troca catiônica e mineralogia das partículas sólidas, entre outras.

A Figura 2.3 mostra uma comparação esquemática entre as linhas equipotenciais que se desenvolvem em um meio aquoso e as que são geradas em um meio poroso. Em meios aquosos formam-se superfícies esféricas de mesmo potencial elétrico e a diferença entre elas promove o movimento de íons. Como as partículas sólidas são elementos isolantes, não podem ser atravessadas pelas linhas de corrente e isso faz com que L , o caminho percorrido pelos íons aumente. Com base na Equação 2.5, observa-se que o aumento de L aumenta a resistência do meio. Ou seja, a resistividade medida em um meio poroso é, em geral, mais elevada do que a do fluido intersticial (Weemes, 1990). Na Figura 2.3 L está associado a r , o raio de uma equipotencial genérica.

2.1.3- Modelo matemático para o fenômeno físico

A Figura 2.4 apresenta as considerações realizadas para desenvolver o modelo físico-matemático aplicado ao cone resistivo de dois eletrodos. A formulação feita admite que, em vista de elevação, as linhas equipotenciais sejam esferóides concêntricos gerados pelo eletrodo de potencial (Fukue et al., 1998). Na Figura 2.4a está mostrada uma linha equipotencial média a uma distância r da extremidade do eletrodo, que possui diâmetro d , como sugere a Figura 2.3. A Figura 2.4b ilustra a mesma situação em vista superior. São apresentados, a seguir, dois desenvolvimentos que associam a resistividade do meio às características geométricas do cone.

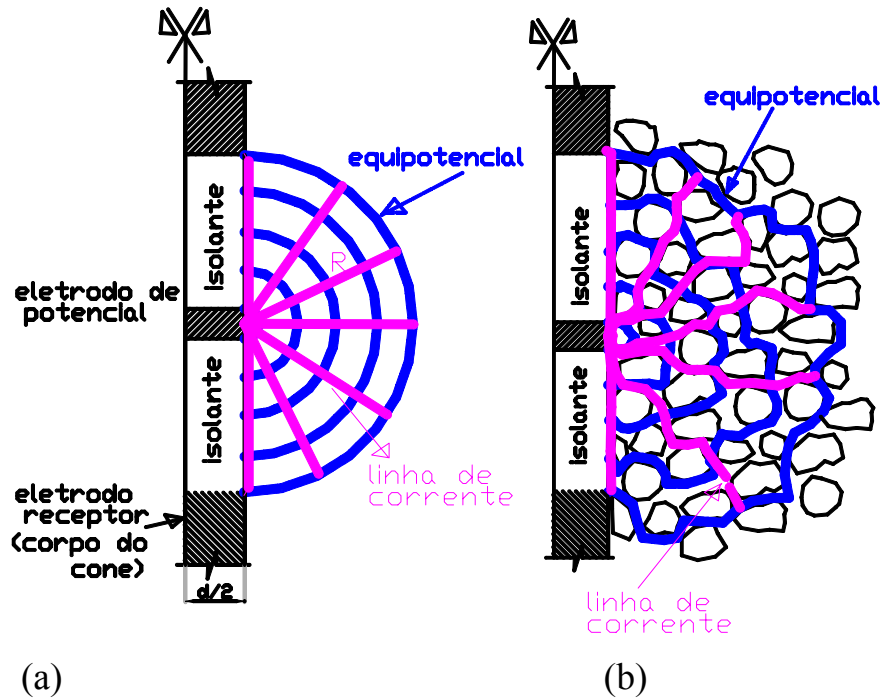


Figura 2.3- Representação esquemática do desenvolvimento de linhas equipotenciais e as de corrente (a) no modelo idealizado, ou em meio aquoso e (b) em um meio particulado.

Para ambos os desenvolvimentos, é necessário determinar a área da superfície de uma equipotencial média. Segundo Fukue et al. (1998), o raio médio de uma equipotencial genérica pode ser obtido a partir de um ângulo de 60° com o corpo do cone, como mostrado na Figura 2.4a e 2.4b. O autor não deixa claro o motivo da escolha deste ângulo, pode ter sido obtido empiricamente ou devido ao fato do $\cos(60^\circ) = \frac{1}{2}$. No caso aqui abordado, a superfície foi determinada retificando-a, conforme sugerido por Miranda Neto (2002). Esta simplificação está apresentada na Figura 2.4c. O lado do retângulo representado na horizontal do modelo retificado tem o comprimento igual à circunferência do raio médio (destacado na Figura 2.4b) e o lado vertical tem a dimensão do semicírculo de raio r (destacado na Figura 2.4a). Nessas condições a área da superfície equipotencial distante a uma distância r do eletrodo pode ser calculada pela Equação 2.9

$$A_m = \pi r \times 2\pi \left(\frac{r}{2} + \frac{d}{2}\right) = \pi^2 r(d + r) \quad (2.9)$$

na qual A_m é a área da superfície e d o diâmetro do cone.

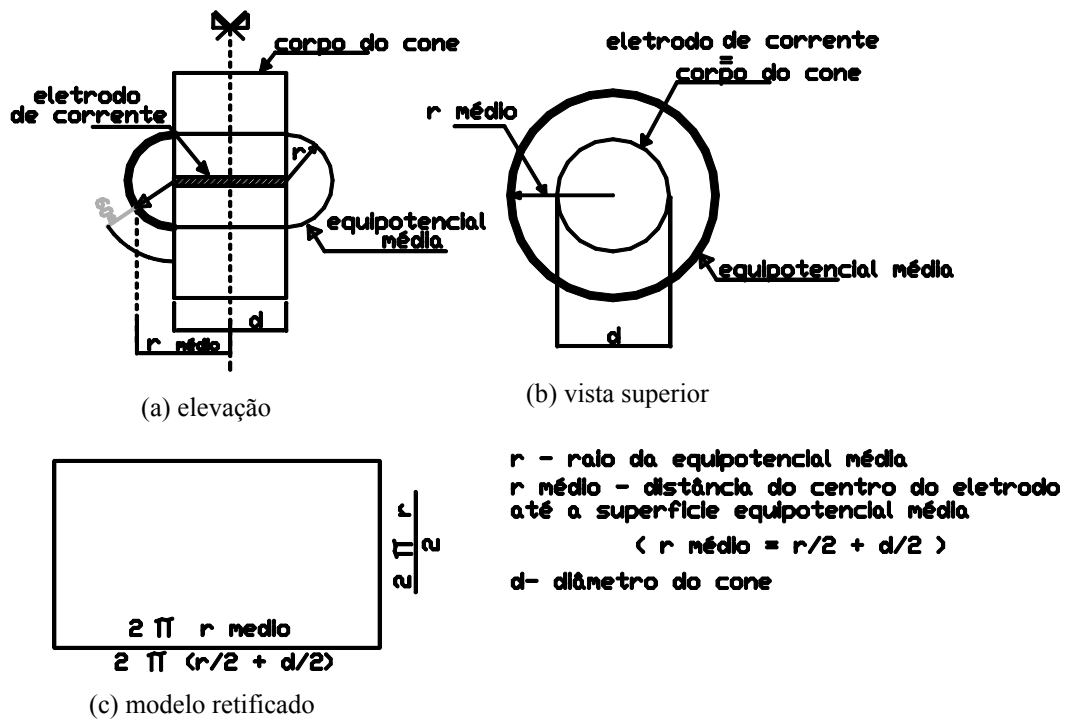


Figura 2.4- Modelo utilizado para a determinação da superfície equipotencial média, (a) em vista de elevação, (b) em vista superior e (c) no modelo retificado.

Fukue et al. (1998) desenvolveram um modelo combinando as Equações 2.9, 2.4 e 2.5. Desta maneira o valor da resistividade foi obtido em relação a uma equipotencial genérica a uma distância r , mostrada na equação 2.10.

$$V = \frac{\rho L i}{\pi^2 r (d + r)} \quad (2.10)$$

Onde L é o comprimento médio das linhas de corrente e i é a corrente elétrica. De acordo com a Figura 2.4a, verifica-se que o comprimento da linha de corrente (L) é igual ao raio (r), então a expressão 2.10 pode ser simplificada, conduzindo à Equação 2.11.

$$V = \frac{\rho i}{\pi^2 (d + r)} \quad (2.11)$$

O outro desenvolvimento foi realizado por Miranda Neto (2002), que diferencia as Equações 2.4 e 2.5, o que leva às Equações 2.12 e 2.13 respectivamente. Combinando essas duas equações chega-se à Equação 2.14.

$$\partial V = \partial R \times i \quad (2.12)$$

$$\partial R = \rho \times \frac{\partial L}{A} \quad (2.13)$$

$$i = \frac{A}{\rho} \frac{\partial V}{\partial L} \quad (2.14)$$

A Equação 2.14 é uma equação diferencial na qual a $V(r)$ é uma função inversa da forma:

$$V = C_2 + \frac{C_1}{r} \quad (2.15)$$

onde C_1 e C_2 são constantes de integração.

Sabendo que, para essa geometria, L é igual ao raio do esferóide (r) e que este tende ao infinito, a imagem da função V tende a zero. Portanto, para atender a esta condição de contorno, o valor da constante C_2 é necessariamente igual a zero, resultando na Equação 2.16

$$C_1 = r \times V \quad (2.16)$$

Derivando a Equação 2.16 e combinando-a com a Equação 2.14 junto com a equação da área da superfície (2.9) tem-se:

$$i = \frac{[\pi^2 r(r+d)]}{\rho} \times \frac{-C_1}{r^2} \quad (2.17)$$

Operando esta equação a fim de isolar o C_1 e aplicando-a à Equação 2.16 chega-se à Equação 2.18, que é igual à Equação 2.11 com a resistividade isolada no lado

esquerdo da equação. Nesta equação, $\pi^2(r+d)$ é uma constante que depende da forma do cone (C_f).

$$\rho = [\pi^2(r+d)] \times V/i = C_f \times V/i \quad (2.18)$$

Esse modelo, como outros correspondentes a arranjos de eletrodos distintos, resulta num valor de resistividade dada em função da corrente aplicada (i), da diferença de potencial (V) que é uma grandeza medida e da geometria do cone. A influência da geometria pode ser dada por um fator de forma relacionado ao arranjo dos eletrodos. No caso do cone adquirido pela COPPE/UFRJ, cuja distância entre os eletrodos de medição $r = 0,05\text{m}$ e o diâmetro $d = 0,0437\text{m}$, obtém-se o fator de forma geométrico $C_f = 0,9248\text{m}$ (Miranda Neto, 2002).

A Equação 2.18 relaciona a resistividade (condutividade) do meio às grandezas elétricas impostas e ao fator geométrico do cone. Na prática a resistividade não é determinada dessa maneira. Na etapa de calibração do equipamento a condutividade de uma determinada solução é medida, com equipamento específico, e este resultado comparado ao resultado do cone resistivo, cujo dado de saída é uma voltagem. Desta maneira obtém-se uma curva de calibração que associa diretamente a voltagem medida à resistividade ou condutividade do meio.

2.2- Resistividade do solo

Por muitos anos a medição da resistividade do solo foi realizada com o intuito de estimar a porosidade de solos não coesivos (Lunne et al., 1997). Robertson et al. (1998) relata que os primeiros estudos nesse sentido foram realizados por Kroezen no ano de 1981. Em tempos mais recentes esta ferramenta tem sido utilizada para fazer investigações em sítios contaminados (Campanella et al., 1998). A Tabela 2.1 mostra valores de resistividade de solo em diversos meios.

Jackson et al.(1978) afirma que o estudo das características do solo por meio da resistividade elétrica é uma prática realizada há mais tempo por pesquisadores na área de hidrologia. A medição da resistividade do solo é uma metodologia de investigação

indireta que vem sendo correlacionada com diferentes propriedades físicas do solo, tais como a porosidade e a condutividade hidráulica e propriedades físico-químicas associadas ao potencial de corrosão (Lunne et al., 1997).

Para a interpretação dos resultados o solo é considerado um material trifásico constituído por sólidos, líquido e ar. A resistividade medida é função de todas as fases, mas o ar é sempre considerado um corpo isolante. A princípio a maior parte da corrente elétrica é conduzida pelo fluido intersticial, pois é nesse meio que ocorre mais facilmente o transporte de cargas, gerando a corrente eletrolítica (Campanella et al., 1998, Lunne et al., 1997) . O tipo de líquido é, portanto, uma variável extremamente importante para a interpretação de resultados medidos, como pode ser observado na tabela 2.1. Como o tipo de solo tem grande relevância, é importante que o perfil de solo também seja conhecido. Essa prospecção pode ser realizada diretamente por uma sondagem, com recolhimento de amostras, ou indiretamente interpretando dados do piezocone.

Tabela 2.1- Valores típicos de condutividade integral e de fluidos (Lunne et al, 1997).

tipo de material	condutividade integral ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	condutividade do fluido ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Resistividade integral ($\Omega\text{-m}$)	Resistividade do fluido ($\Omega\text{-m}$)
água do mar	---	50,000	---	0,2
água potável		<665	---	> 15
Areias de rejeitos de minério com drenagem ácida	10,000 - 250	5,000 - 370	1-40	2 – 27
Areias de rejeitos de minério sem drenagem ácida	145 - 100	665 - 200	70 – 100	15 – 50
APL em areias	20,000 - 6,000	33,000 - 20,000	0,5 – 1,5	0,3 – 0,5
NAPL em areias	80	210	125	48
100% ED*	---	0,5	---	20.000
50% ED* e 50% água em areias	14	---	700	---
17% ED* e 83% água em areias	36	---	275	---
argilas	10,000 - 100	---	1 – 100	---
Aluviões e areias	1,000 - 12	---	10 – 800	---
Areias com óleo	2,500 - 12	---	4 - 800	---

* ED_ Dicloretoano

A medida da resistividade do solo por meio de testes de cravação direta para fins geo-ambientais tem aumentado em anos recentes e por esse motivo é necessário conhecer bem as variáveis que influenciam o comportamento dessa propriedade. A seguir será feita uma discussão sobre a influência das propriedades do solo mais relevantes para a resistividade do solo.

2.2.1- Grau de saturação

Na condição não saturada o solo é composto por duas fases praticamente isolantes, a sólida e a de ar, e uma que pode ser condutora que é a de líquido. Quanto menor for o grau de saturação do solo, menor será o espaço disponível para a condução de corrente elétrica, ou seja, maior a resistividade

A possibilidade de investigar um meio não saturado ainda não está bem definida pois as observações de diferentes autores são contraditórias. Watabe et al (2002) recomenda que os resultados obtidos nessa região sejam desconsiderados, tendo em vista a dificuldade de correlacionar os parâmetros medidos às propriedades físicas. Por outro lado Hassanein et al. (1996) relata que existe uma relação única entre o grau de saturação inicial de solos compactados e a resistividade elétrica medida. Esta relação, proposta por Keller e Frischknecht (1966) é dada pela razão entre a resistividade de um meio não saturado ($\rho_{n\ sat}$) e um saturado (ρ_{sat}) reproduzida na Equação 2.19

$$\frac{\rho_{nsat}}{\rho_{sat}} = S\%^{-B} \quad (2.19)$$

onde S% é o grau de saturação e B é um parâmetro empírico associado ao tipo de solo.

A discussão sobre solos na condição não saturada está complementada no Item sobre a resistividade de solos compactados (Hassanein et al., 1996).

2.2.2- Tipo de solo

O tipo de solo tem influência sobre a resistividade medida, principalmente, devido à forma dos grãos. Quanto maior o índice de vazios maior é a área para

passagem de corrente. Sob essa ótica é de se esperar que o mesmo material em diferentes índices de vazios tenha maior condutividade com o aumento do índice de vazios.

Ao diminuir o tamanho das partículas muda também a forma dos grãos, passam de uma forma arredondada para uma lamelar, o que aumenta a superfície de contato entre as partículas e isto pode alterar o comportamento resistivo do meio. Isto pode resultar na geração de corrente pela superfície das partículas finas (Weemes, 1990), além de possuir uma elevada condutividade devido ao alto índice de vazios. Será apresentada a seguir uma discussão sobre a resistividade de diferentes tipos de solos.

O tipo de solo pode ter pouca influência em meios cujo fluido intersticial seja muito condutivo. Em regiões próximas ao mar a diferença entre os valores de resistividade medidos para diferentes extratos de solo pode não ficar evidente. Isso ocorre pois a condução acontece muito facilmente pelo fluido por haver muitos íons na solução intersticial. Assim, mesmo que os caminhos de fluxo mudem, a diferença não é tão expressiva (Weemes, 1990).

2.2.2.1- Areias

As partículas de areia, em geral, formadas por partículas de quartzo, são consideradas como elementos isolantes dentro de um meio condutor, caso o meio esteja saturado (Weemes, 1990). Esse mineral caracteriza-se por ser constituído por cristais eletricamente descarregados. Além disso, a área de contato entre as partículas é pequena, o que resulta em uma corrente superficial praticamente nula. Devido a estes aspectos é de se esperar que as areias apresentem resistividades maiores que as das argilas (Fukue et al., 1998).

Ao introduzir o cone no solo, sucedem-se conseqüentes processos de ruptura no solo (Lunne et al., 1997) e com isso muda o estado de compactidade próximo ao corpo do cone. No processo de ruptura os solos mais fofos tendem a sofrer compressão e os mais compactos tendem a se expandir. Existe, portanto, uma alteração entre os resultados medidos para areias no estado intacto e outro no após a ruptura (Weemes,

1990). Havendo alteração no estado de compacidade do solo é esperado que haja também mudanças nas resistividades medidas. Este aspecto será discutido com mais detalhe no Item 2.3.2 deste capítulo.

2.2.2.2- Argilas

De modo geral as argilas apresentam condutividade elétrica maior que a das areias. O principal motivo é que o índice de vazios é superior da argila é superior ao da areia. Além disso, nas argilas ocorrem outras formas de geração de corrente como a superficial. A condução desse tipo acontece devido a propriedades específicas das partículas sólidas, como uma elevada capacidade de troca catiônica ou elevado percentual de matéria orgânica (Weemes, 1990). Em ambos os casos há cargas na superfície das partículas sólidas: no primeiro localizadas na dupla camada (Souza Santos, 1975) e no segundo devido à matéria orgânica e por isso sofrem ação do campo elétrico.

Ao introduzir o cone no solo argiloso ocorre um amolgamento na região próxima ao corpo do cone. Entretanto, como a permeabilidade das argilas é muito baixa, a cravação ocorre a volume praticamente constante. Admitindo que o comportamento resistivo seja, neste caso, dependente exclusivamente do índice de vazios e da umidade, não há variação de resistividade entre o solo amolgado e o intacto (Weemes, 1990).

2.2.2.3- Misturas

Os solos que têm distribuição granulométrica bem distribuída são os que apresentam o menor índice de vazios, tendo em vista que as partículas com menores dimensões ocupam os espaços dos poros. Nessas condições o caminho de fluxo de íons fica reduzido, diminuindo assim a área para que ocorra a condução eletrolítica.

Não é em todas as ocasiões em que solos com granulometria bem distribuída resultam em baixo índice de vazios. Dependendo da porcentagem de finos contida no solo e sua gênese, o solo pode apresentar-se com uma estrutura meta-estável em glóbulos. Nessa condição as partículas com maiores dimensões ficam envoltas com

partículas mais finas o que gera microporos entre essas partículas e macroporos entre os glóbulos (Futai, 2002). Dessa maneira o transporte de íons pode ocorrer dentro dos poros de maior dimensão gerando, portanto, condução eletrolítica. Nestes tipos de solo ocorrem ainda correntes de natureza dielétrica (Bodmer et al., 1968) como será detalhado no Item 2.2.7, referente à polarização do solo.

Com um aumento na porcentagem de finos em um solo arenoso, a resistividade elétrica pode ser afetada de três maneiras (Weemes, 1990). Na primeira o índice de vazios diminui devido à ocupação de vazios por partículas finas, o que resulta em um aumento da resistividade do solo. O segundo comportamento que pode ocorrer é de uma redução na resistividade caso as partículas possam ser polarizadas. O terceiro comportamento, que também é possível, age no sentido de reduzir a resistividade devido ao aumento da superfície específica e do contato entre as partículas sólidas. Isso resulta em uma maior geração de corrente superficial. Em geral a resistividade elétrica aumenta à medida que os solos se tornam mais grossos (Hassanein et al., 1996).

2.2.3- Influência da compactação

Existem diversos fatores que influenciam a qualidade da compactação de solos. Por esse motivo diferentes condições de compactação resultam em diferentes medidas de resistividade. Em tempos recentes o cone resistivo tem sido utilizado para efetuar o controle de compactação de “liners” argilosos (Hassanein et al., 1996). Para isso é necessário saber interpretar como as variáveis influenciam o resultado da resistividade medida.

2.2.3.1- Energia de compactação

Uma das maneiras de elevar o peso específico de um solo compactado é aumentar a energia de compactação, mantendo as demais variáveis constantes. Isso leva a acreditar que a resistividade aumenta tendo em vista que o índice de vazios tende a diminuir. Entretanto, essa afirmativa não é correta. Segundo a relação entre índices físicos, apresentada na Equação 2.20, para uma umidade constante a redução do índice de vazios acarreta em uma elevação do grau de saturação. Como a condutividade

elétrica é significativamente maior para meios mais próximos à saturação o aumento na energia de compactação diminui a resistividade (Hassanein et al., 1996).

$$S \times e = w \times G \quad (2.20)$$

Hassanein et al., 1996 realizou medidas de resistividade em laboratório com dez tipos de solos distintos. A Figura 2.5 mostra os resultados de diversas medições de resistividade elétrica realizadas em laboratório fazendo variar a umidade e a energia de compactação em dois tipos de solo distintos. Estão apresentadas também as umidades ótimas referentes a cada energia de compactação. O referido autor observou que em todos os casos, para uma dada umidade de moldagem, a resistividade diminuiu ao elevar a energia de compactação.

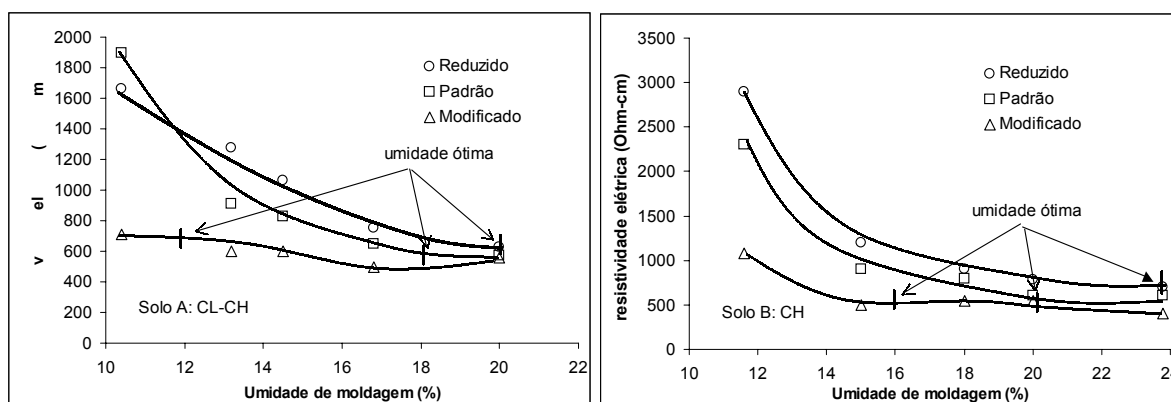


Figura 2.5 Relação entre a resistividade elétrica, umidade e a energia de compactação (Hassanein et al., 1996)

2.2.3.2- Umidade de compactação

Sabendo que a condutividade elétrica ocorre em grande parte pela fase líquida do solo, mesmo em condições não saturadas o aumento da umidade de compactação diminui a resistividade do solo (Weemes, 1990). A Figura 2.5 mostra ensaios realizados a diferentes umidades para três energias de compactação diferentes. Hassanein et al., 1996, observou que para umidades acima da ótima a variação da umidade não resulta em diferenças expressivas no resultado da resistividade, o mesmo não ocorreu no ramo seco. Nesta região pequenas mudanças na umidade resultaram em variações

significativas de resistividade. Isto é explicado pelo referido autor por existir muito ar contido nos vazios do solo, que é um elemento isolante.

2.2.3.4- Grau de saturação em solos compactados

Combinando os valores encontrados para o peso específico seco e a umidade de compactação de cada corpo de prova ensaiado, Hassanein et al. (1996) calculou o grau de saturação, e apresentou os resultados medidos em função desse parâmetro. Os resultados obtidos estão reproduzidos na Figura 2.6. Neste cálculo um aumento no grau de saturação pode ser atribuído a um aumento na umidade ou a um aumento na energia de compactação.

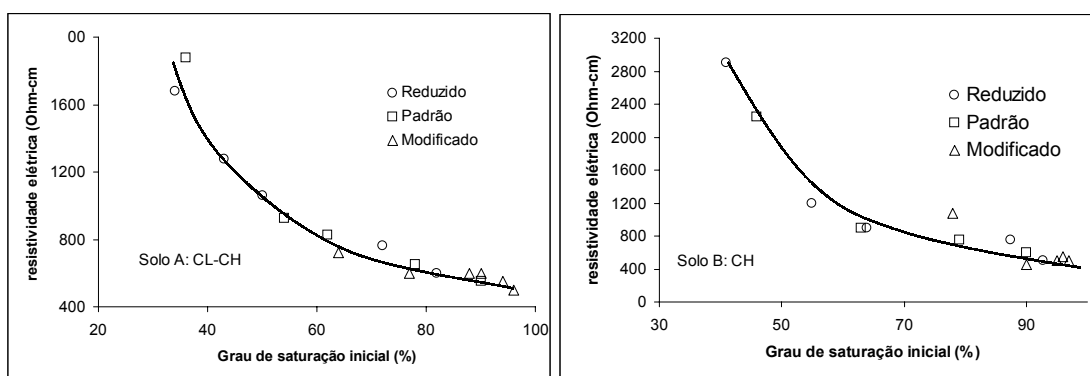


Figura 2.6- Relação entre a resistividade elétrica e grau de saturação inicial (Hassanein et al., 1996)

Hassanein et al, 1996 observou que para cada tipo de solo existe uma relação inversa entre a resistividade e o grau de saturação. O referido autor destaca ainda que a relação encontrada é independente da energia de compactação aplicada. Essa relação merece destaque na avaliação da compactação de “liners”. No plano $w \times \gamma_s$, a linha de umidade ótima é uma linha com grau de saturação constante. Tendo uma curva $\rho \times S(\%)$ pode-se estimar se o solo foi compactado no ramo úmido ou seco.

Ainda nesta pesquisa Hassanein et al., 1996 aplicou a equação (2.19) a fim de estabelecer uma relação entre a resistividade medida em condições saturadas e não

saturadas. Os valores de B variaram entre 0,64 e 2,29 com valores de coeficiente de correlação da ordem de 0,92.

2.2.3.5-Anisotropia

Na construção de aterros com argila a compactação induz uma orientação das partículas no sentido horizontal. Isto gera a anisotropia do solo e se reflete em diversas propriedades tradicionalmente estudadas na mecânica dos solos, como por exemplo na condutividade hidráulica. Além disso a anisotropia reflete-se também na resistividade (Hassanein et al., 1996). Isso ocorre porque, em geral, as medições realizadas são por meio de um campo elétrico tridimensional, portanto, a grandeza medida é uma média das condições do meio.

Hassanein et al., 1996, realizou ensaios em diversos tipos de solos compactados nos quais além de medir a resistividade ao longo do eixo principal, dos corpos de prova cilíndricos, mediu também a resistividade em duas outras direções: uma a 45° e outra a 90° do eixo vertical. Para isso os corpos de prova foram esculpidos nestas direções a fim de realizar as medições. Os resultados obtidos para quatro tipos de solo estão reproduzidos na Tabela 2.2, pela qual observa-se que existe anisotropia em relação à resistividade. Em relação à medição na horizontal a resistividade desses solos mostrou-se menor que na vertical, na média de 84% do valor e com uma pequena variabilidade. O mesmo não se repetiu para as medições realizadas a 45°. Neste caso houve uma variabilidade nos valores medidos, os quais foram iguais ou inferiores à resistividade medida na vertical.

Foi realizada ainda outra campanha de ensaios por Hassanein et al., 1996 a fim de avaliar a influência da anisotropia. Nesta campanha, usou-se apenas um tipo de solo, compactado em diferentes umidades, e com duas energias de compactação distintas: SP, Proctor normal; e RP, energia inferior ao Proctor normal. Os resultados obtidos estão reproduzidos na Figura 2.7. O referido autor observou que o grau de anisotropia, verificada pela variação de medidas da resistividade em direções distintas, diminui à medida que a umidade de compactação aumenta no ramo seco. No ramo úmido da curva de compactação a resistividade horizontal é da ordem de 93% da vertical,

enquanto que no ramo seco a resistividade horizontal diminui para aproximadamente 78% da medida realizada na vertical.

Tabela 2.2_ Anisotropia em relação à resistividade (ρ).

solo	ρ vertical (Ω -cm)	% de ρ vertical	
		90°	45°
A	620	86	100
B	550	85	102
C	3003	82	88
D	2010	84	76

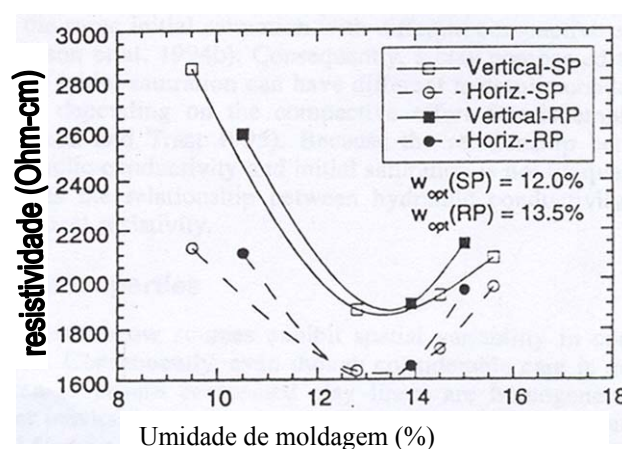


Figura 2.7_ Resistividade elétrica medida na vertical e na horizontal plotados contra a umidade de compactação para duas energias de compactação distintas (Hassanein et al., 1996).

2.2.4 - Propriedades índices do solo

Tendo em vista que as propriedades índice do solo variam em função de diversos fatores associados às partículas, como por exemplo a granulometria e a mineralogia, a resistividade varia em função das propriedades índice. Hassanein et al. (1996) realizou ensaios com diferentes solos compactados na umidade ótima e correlacionou a resistividade às diferentes propriedades índices desses solos. Os resultados destes estudos estão apresentados nos itens abaixo.

2.2.4.1- Limite de Liquidez

O limite de Liquidez traduz a porcentagem e a composição da fração fina do solo. A relação entre o limite de liquidez (w_L) e a resistividade medida está apresentada na Figura 2.8. Hassanein et al. (1996) observou que solos com maior w_L tendem a ter

uma resistividade inferior. No entanto, foi encontrada uma exceção, no caso do solo identificado como o “c” que apresenta tanto a resistividade elétrica, como o w_L , elevados. A explicação para tal discrepância entre os resultados se dá pelo fato de haver uma porcentagem elevada de partículas granulares neste solo, que agem como elementos isolantes. Ao remover as partículas maiores, passando o solo em uma peneira número 200, a resistividade medida caiu para um valor consistente com os demais solos. Nesta curva, observa-se também que para w_L acima de 40%, a influência do w_L torna-se pequena.

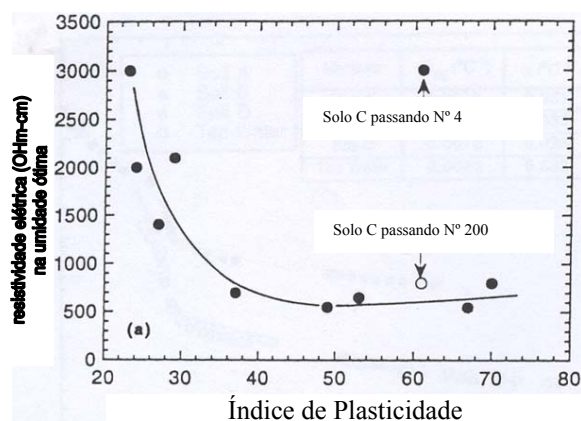


Figura 2.8- Relação entre a resistividade obtida na umidade ótima de compactação contra o limite de liquidez (Hassanein et al., 1996).

2.2.4.2- Índice de Plasticidade

A forma da curva no plano da resistividade contra o índice de plasticidade, apresentada na Figura 2.9, tem a mesma forma da curva apresentada na Figura 2.8. De maneira semelhante ao ocorrido em relação ao limite de liquidez, o solo “c” teve um resultado discrepante em relação aos demais tipos de solo. Ao passá-lo numa peneira 200 verificou-se um valor compatível com os demais solos. Observa-se também, por meio desta figura, que quando o índice de plasticidade supera os 20% a resistividade atinge um valor aproximadamente constante.

2.2.5- Temperatura

A temperatura (T) é um fator que afeta a mobilidade de íons de maneira indireta, alterando assim, a resistividade do meio. A aceleração das partículas em um campo elétrico imerso em uma solução, sofre uma resistência devido ao atrito viscoso do meio

(Weemes, 1990). A magnitude das forças resistentes depende de fatores tais como a concentração do meio e o tamanho dos íons e a temperatura. Como a temperatura e a viscosidade do meio são grandezas inversamente proporcionais, o aumento de uma delas leva a redução da outra. Dessa maneira o aumento da temperatura leva a uma maior mobilidade dos íons reduzindo, portanto, a resistividade do meio.

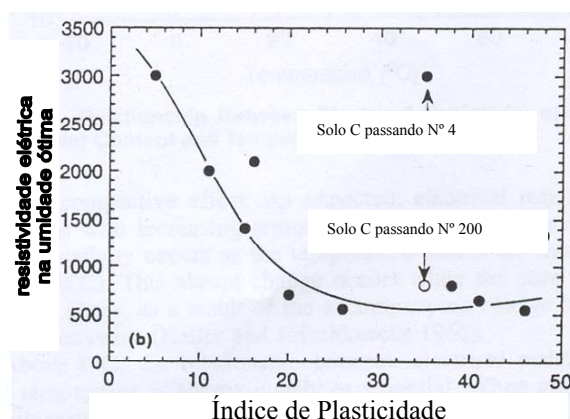


Figura 2.9- Relação entre a resistividade obtida na umidade ótima de compactação contra o índice de plasticidade (Hassanein et al., 1996).

Hassanein et al. (1996) realizou ensaios com diversos tipos de solo compactados a umidade ótima e verificou a influência da temperatura sobre a resistividade. Este ensaio mostrou que a relação entre a temperatura e a resistividade tem uma forma exponencial acima de 0°C. Com a resistividade em escala logarítmica obtém-se a curva reproduzida na Figura 2.10, na qual percebe-se que há uma relação ligeiramente curvilínea, até uma temperatura pouco superior a 0 °C, a partir de onde a curva passa a ter uma forma praticamente linear, mas com uma inclinação mais suave. Observa-se também que para temperaturas superiores a 10 °C as inclinações de todas as curvas, inclusive a da água, são semelhantes. Isto sugere que a sensibilidade da resistividade desses tipos de solo às variações de temperatura é igual e por sua vez é igual à sensibilidade da água. Essa inclinação é referida como “*thermoelectric coefficient*”, abreviado por C_{te} (Hassanein et al., 1996).

A fim de normalizar as medidas encontradas a uma temperatura qualquer em relação a uma temperatura ambiente de 25°C, existem duas relações que podem ser

utilizadas. Na primeira Hassanein et al. (1996) utiliza o conceito do C_{te} e apresentou a Equação 2.21.

$$\rho_T = \rho_{25} \times 10^{-C_{TE}(T-25)} \quad (2.21)$$

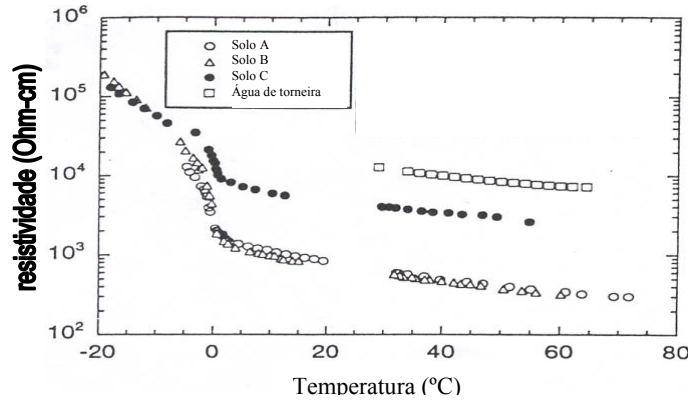


Figura 2.10- Relação entre a resistividade elétrica na umidade ótima e a temperatura (Hassanein et al., 1996).

Hassanein et al. (1996) apresenta ainda uma segunda expressão que foi proposta por Keller e Frischknecht que é uma normalização para uma temperatura de 18°C e baseia-se em um parâmetro empírico α , que é da ordem de $0,025^{\circ}\text{C}^{-1}$. Esta relação está apresentada na Equação 2.22.

$$\rho_T = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18)} \quad (2.22)$$

2.2.6- Fluido intersticial

6)

Em um meio poroso saturado, em geral, a maior parte do transporte de íons ocorre na porção líquida devido à condução eletrolítica (Campanella et al., 1999; Robertson et al., 1998; Lunne et al., 1997). A transferência de carga através dos eletrodos se dá por meio de reações de oxi-redução entre os elementos presentes na solução (Campanella et al., 1990). Por esse motivo, a maior ou menor resistividade é função dos elementos presentes no fluido, que ainda é afetada por fatores externos, tais como a temperatura (Hassanein et al., 1996). Em geral, quanto mais íons presentes no fluido intersticial, maior será a condutividade. Entretanto, considerando um íon

específico, outros fatores afetam a condutividade eletrolítica (Weemes, 1990) como o tamanho do íon e a sua valência. Por exemplo a resistência viscosa ao deslocamento de um íon é diretamente proporcional às suas dimensões. Sob esse ponto de vista íons pequenos conduzem corrente melhor que íons grandes, mas íons de valência elevada possuem mais carga elétrica.

2.2.6.1- Concentração do fluido intersticial

Avaliando exclusivamente a concentração eletrolítica, a condução aumenta à medida que a quantidade de íons dissolvidos aumenta (Campanella et al, 1990; Watabe et al., 2002; Robertson et al., 1998; Lunne et al., 1997). Isso acontece porque quanto mais partículas carregadas existem em solução, mais elementos carregados estarão em deslocamento. Entretanto a taxa de variação entre a resistividade e a concentração do meio não se dá por uma forma linear. Weemes (1990) observou que resistividades medidas para diferentes concentrações podem ser aproximadas a segmentos de reta em diferentes faixas de concentração. Dessa maneira, existe uma relação da forma apresentada na Equação 2.23.

$$c = \sigma \times K_i \quad (2.23)$$

onde c é a concentração de sólidos dissolvidos (mg/l), σ é a condutividade ($\mu\text{s/cm}$) e K_i é o fator de condutividade, uma constante que depende da faixa de concentração no fluido intersticial. A taxa de variação da condutividade para concentrações mais elevadas não é tão expressiva como é para concentrações menores, pois passa a haver choque entre os íons, o que leva à redução da mobilidade. Portanto, para concentrações mais elevadas K_i tende a diminuir.

Além de variar a relação com a concentração, diferentes íons têm diferentes fatores de condutividade (K_i). Por esse motivo, um contaminante composto por diferentes íons terá um fator de condutividade igual à média ponderada entre os diversos elementos que o constituem (Weemes, 1990). Dessa maneira a concentração do fluido intersticial pode ser estimada se a quantidade relativa entre os constituintes não estiver sendo alterada.

2.2.6.2- pH do fluido intersticial

Variações no valor do pH estão associadas à quantidade de íons de hidrogênio (H^+), ou hidroxilas (OH^-), encontrados na solução. Na Equação 2.23 para baixos valores de pH, pode-se associar um elevado valor de K_i à quantidade de íons de hidrogênio (que possuem carga positiva) presentes na solução. O mesmo ocorre no caso de pH elevado devido à abundância de hidroxilas que são carregadas negativamente, portanto, responsáveis pela condução elétrica (Campanella et al, 1990).

2.2.6.3- Viscosidade

A viscosidade é uma propriedade dos fluidos que afeta sua facilidade de se deslocar em qualquer meio, seja poroso ou não. As características viscosas de um determinado fluido são, por sua vez, função do tipo de fluido, da temperatura e da pressão. A influência da temperatura age quase que exclusivamente sobre a viscosidade do fluido, por isso os aspectos mais relevantes sobre a influência da viscosidade foram apresentados no Item 2.2.5, sobre a temperatura.

2.2.6.4- Pressão

A viscosidade de um fluido pode variar para diferentes níveis de pressão, diminuindo para pressões muito elevadas. Contudo, os níveis de pressão gerados em ensaios de cone não chegam a alterar a viscosidade do fluido intersticial, principalmente considerando os fluidos normalmente encontrados em geotecnia (Weemes, 1990).

2.2.6.5- Tipos de contaminantes

Tendo em vista que a maior parte da corrente elétrica é conduzida por meio da fração aquosa do solo, é necessário apontar as diferenças resistivas e físicas dos diferentes tipos de contaminantes que podem ser encontrados.

Na análise da resistividade medida em uma situação envolvendo um sistema poroso saturado contendo dois tipos de fluidos é de fundamental importância saber se são miscíveis ou imiscíveis. Admitindo que alguma porcentagem, ou algumas substâncias, possam se solubilizar, podem alterar a resistividade total do meio. É de se esperar que haja uma variação brusca de resistividade na região de contato entre duas

substâncias não miscíveis, se tiverem propriedades elétricas distintas (fisicamente segregadas devido à diferença de massa específica).

Os contaminantes miscíveis em geral conduzem corrente elétrica e por isso são detectados mais facilmente por meio do cone resistivo. Exemplos de fontes de tais contaminantes podem ser aterros industriais, sanitários ou de rejeitos de mineralogia. Em geral os melhores condutores são os sais inorgânicos, ácidos e bases. Exemplos destes são a contaminação do subsolo por meios antrópicos e a intrusão salina, em lugares próximos a mares, baías e lagoas.

A presença de contaminantes que conduzam bem correntes eletrolíticas em ambientes marinhos pode não ser facilmente detectada pela medição da condutividade (Campanella et al., 1990). Isso acontece porque a corrente elétrica conduzida é pouco sensível à presença do contaminante devido à elevada quantidade de sais dissolvidos na água marinha.

Os líquidos não miscíveis (NAPLs) são, em geral, contaminantes orgânicos que são isolantes do ponto de vista elétrico (Campanella et al., 1990; Lunnes et al., 1997; Robertson et al., 1998). Assim, a presença destes contaminantes em um meio poroso saturado tende a aumentar a resistividade total, pois ocuparão um determinado volume de vazios por onde não haverá condução eletrolítica.

Os líquidos não miscíveis diferenciam-se em relação ao peso específico: com maior densidade que a água, DNAPL (dense non aqueous phase liquid); e os com menor densidade que a água, LNAPL (light non aqueous phase liquid). Os DNAPLs tenderão a se deslocar no sentido vertical para baixo, devido à gravidade, até encontrar um material menos permeável e será sujeito a deslocamentos na horizontal por influência do fluxo advectivo ou difusivo. Na região de fronteira entre os líquidos ficará evidenciada uma variação brusca de resistividade. No caso de LNAPL, como estes encontram-se, em geral, na interface com a região não saturada, na qual a condução eletrolítica é reduzida, fica difícil de detectar a presença de substâncias isolantes.

2.2.7- Polarização do solo

A origem da polarização induzida baseia-se no fato de que alguns tipos de solo têm comportamento resistivo dependente da frequência de voltagem aplicada (Bodmer et al., 1968). Este comportamento é consequência do surgimento de uma camada com carga elétrica na superfície das partículas. A espessura desta camada adsorvida é da ordem de 100 microns, mas isto varia de acordo com a concentração do meio e os íons presentes na solução.

Quando os argilominerais estão distribuídos dentro dos poros de uma rocha ou partículas arenosas as camadas adjacentes às partículas, adsorvidas e difusas, podem bloquear o poro inteiramente ou parcialmente. Bodmer et al. (1968) reporta que este fato gera um região seletiva de íons, que bloqueiam ânions enquanto os cátions passam rapidamente. Como a partícula de argila está fisicamente imóvel, quando se aplica uma diferença de potencial alternada há um acúmulo de carga na região seletiva que se alterna em função da diferença de potencial.

Existe um atraso no desenvolvimento da região de acúmulo de carga em relação à voltagem aplicada. Este comportamento é análogo ao de um capacitor e por isso as propriedades resistivas são dependentes da frequência aplicada.

Vacquier et al. (1957) e Sumi (1965) fizeram uma discussão sobre a origem da polarização induzida em sedimentos normalmente adensados. Está apresentado a seguir um resumo dos principais fenômenos envolvidos.

- Em um depósito aluvionar a polarização induzida ocorre quando as superfícies dos grãos apresentam uma cobertura constituída de partículas de argila;
- Quartzo puro em água apresenta quase nenhuma polarização induzida;
- A magnitude da polarização induzida depende da resistividade da solução, da porcentagem e do tipo da argila existente e dos íons que a saturam. Para solos com

porcentagem de argila com mais de 3%, depende ainda se a argila encontra-se floculada ou dispersa;

- Saturação com Na ou K tende a fazer com que as partículas inchem, fechando muito os poros da matriz o que conduz a uma redução da polarização quando a porcentagem de argila é elevada. Se a mesma argila for saturada com Ca flocula, formando agregados. Quando as partículas de argila floculam o potencial de polarização aumenta à medida que aumenta a porcentagem de argila até 5 a 9% em peso seco;
- Em geral, o potencial de polarização* decresce com a diminuição da resistividade, portanto, a argila presente em um ambiente marinho tende a apresentar polarização induzida;
- O potencial de polarização é, em linhas gerais, proporcional à atividade da argila. Assim, montmorilonitas tendem a gerar mais polarização que caulinitas;

Em geral, solos compostos por partículas granulares que contêm uma pequena porcentagem de argila apresentam polarização induzida apreciável. O mesmo não ocorre para a argila pura, neste caso a polarização induzida depende do tipo e do estado da argila.

* tradução da palavra da língua inglesa “Polarizability”, com valor semântico de potencial de sofrer polarização

origem de polarização que pode ser encontrada na natureza. Alguns minerais metálicos, presentes em 1% de um tipo de solo ou rocha, podem produzir uma polarização superior à gerada pela argila devido ao efeito capacitivo.

2.3- Cone resistivo

O método superficial de prospecção geofísica de eletrorresistividade utiliza técnicas não invasivas para investigar o subsolo. As medições são consideradas pontuais mas envolvem uma região do semiespaço entre os eletrodos, posicionados na superfície, que formam o circuito elétrico e admite-se que o meio seja homogêneo. No

que diz respeito à acurácia dos resultados medidos, o uso do cone resistivo mostra-se promissor pois pode-se realizar medições com um erro de 1%, enquanto técnicas de superfície requerem diferenças da ordem de 5 a 10% (Campanella et al., 1990), a fim de interpretar os resultados.

A denominação genérica de cone resistivo resulta do fato de que a resistividade pode ser medida por um sensor acoplado ao CPTU, denominado de módulo resistivo. O nome ponteira resistiva refere-se ao cone resistivo que mede exclusivamente a resistividade. Este instrumento pode ser utilizado em terrenos cuja estratigrafia seja conhecida, seja pelo CPTU, seja por sondagens. Na presente pesquisa refere-se à ponteira utilizada pelo nome genérico de cone resistivo.

Como ocorre com os cones utilizados em geotecnia, o material que o constitui tem que ser mecanicamente resistente às solicitações durante a cravação e a extração. Além disso, como os cones resistivos podem ser cravados em locais contaminados, o material que os constitui não pode ser susceptível às agressões químicas do meio. Os eletrodos têm que ser constituídos por um material que seja um bom condutor e separados entre si por um outro material isolante, além da resistência mecânica e química. No caso do equipamento estudado o eletrodo é constituído do mesmo material que o corpo do cone, aço inoxidável, e o material isolante de resina.

O número de eletrodos de um cone resistivo pode variar de dois a oito (Weemes, 1990). É necessário fazer uma interpretação do fenômeno físico de acordo com a configuração adotada. Para o módulo resistivo que contém quatro eletrodos o modelo físico está apresentado na Figura 2.11. Neste caso o eletrodo mais próximo da ponta do cone é o de potencial, o que gera corrente elétrica (Campanella et al., 1990). Este eletrodo fica posicionado no centro do módulo para maximizar a distância do corpo do cone, separado por um material isolante. O eletrodo mais longe da ponta é o de potencial nulo e os dois internos servem para medir diferença de potencial (voltagem).

2.3.1- Número de eletrodos

O número de eletrodos em um cone resistivo depende exclusivamente dos objetivos que se pretende alcançar. Existem, na literatura, diversos modelos que têm quantidade e distribuição de eletrodos distintos. Os que apresentam um maior número de eletrodos são mais sofisticados. Além de constituir um cone de dimensão maior, o que aumenta o atrito lateral e, portanto, exige uma estrutura de reação mais forte, requer uma tecnologia eletrônica mais sofisticada na placa geradora de sinal.

Os resultados medidos com cones resistivos com diferentes configurações podem variar se não for ajustada uma frequência de sinal adequada. Uma frequência da corrente elétrica muito reduzida pode causar a polarização dos eletrodos (Weemes, 1990). Este fenômeno faz com que a impedância entre os eletrodos varie ao longo do tempo (no Item 2.3.3 será apresentada uma discussão sobre a polarização dos eletrodos), o que impossibilita a realização de medições confiáveis. O cone resistivo desenvolvido na UBC (University of British Columbia) por Weemes et al., 1990, possui quatro eletrodos justamente para não haver polarização nos eletrodos de medição de voltagem.

Outra vantagem do cone resistivo com quatro eletrodos é que podem ser realizadas medições em diferentes pares de eletrodos (Lunne et al., 1996). Tomando como exemplo o cone representado na Figura 2.11, os eletrodos internos são os que realizam medições de diferença de potencial e os externos são os responsáveis pela geração da corrente. Os eletrodos externos também podem medir a diferença de potencial aplicada entre eles. Neste caso, além de variar a região investigada, são realizadas duas medições que podem ser comparadas entre si (Campanella et al., 1990; Lunne et al., 1996). A interpretação dos resultados deve ser consistente com o espaçamento entre os eletrodos. No Item 2.3.2, será apresentada uma discussão a respeito do espaçamento entre os eletrodos e sua aplicabilidade.

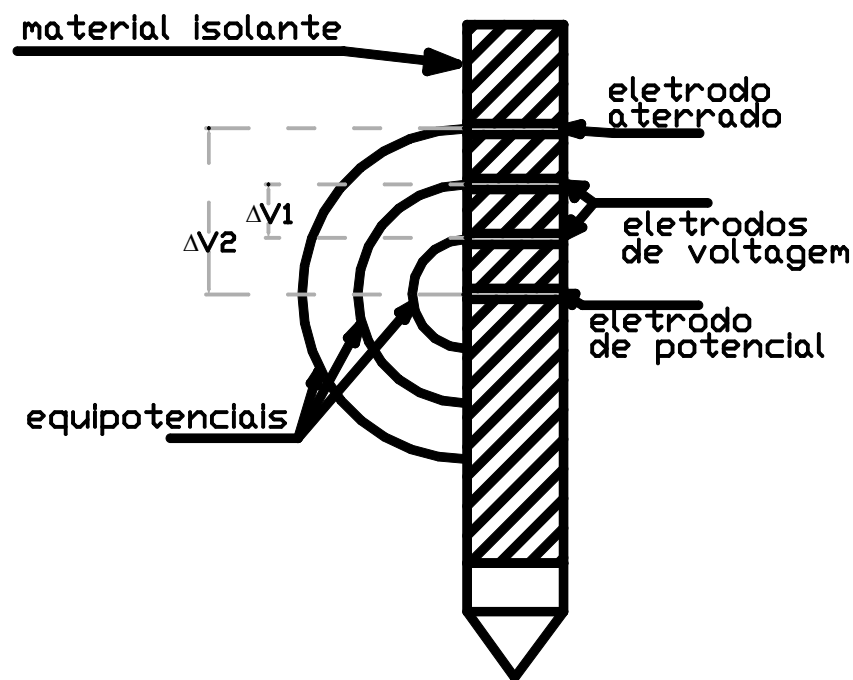


Figura 2.11- Representação esquemática das equipotenciais desenvolvidas pelo cone resistivo de quatro eletrodos (Weemes, 1990-adaptado).

O projeto de um cone resistivo de dois eletrodos tem como principal vantagem a relativa simplicidade do projeto eletrônico (Weemes, 1990), mas tem também suas limitações. A primeira é que tem, necessariamente, que trabalhar com uma corrente alternada dentro de uma faixa de frequência apropriada para não haver polarização dos eletrodos, como discutido no Item 2.3.3. Além disso, podem ocorrer anomalias provocadas pela presença de bolhas de ar próximo ao cone (Lunne et al., 1997) o que tenderia a aumentar a resistividade medida sem que houvesse outra medição para aferir o resultado medido.

2.3.2- Espaçamento entre os eletrodos

Segundo o modelo de condução apresentado no Item 2.1.2, a corrente elétrica é gerada por um único eletrodo de potencial. A partir deste elemento são geradas linhas equipotenciais que se desenvolvem para dentro do solo. Desta maneira, quanto maior a distância entre os eletrodos, maior será a região investigada (Lunne et al., 1997). Por este motivo as medições realizadas com eletrodos mais afastados entre si resultam em uma região “amostrada” maior do que quando a medição é feita com os eletrodos mais próximos.

No caso dos eletrodos estarem próximos entre si, as linhas equipotenciais geradas localizam-se próximas ao corpo do cone e não penetram muito no solo. Isso faz com que a região analisada seja muito pequena e possibilite a detecção de lentes finas de diferentes solos ou uma lente de algum contaminante. Em investigações geo-ambientais pequenas lentes de areia, ou de argila, podem exercer um papel fundamental no transporte ou na retenção de contaminantes.

Como a resistividade é uma propriedade intrínseca do meio, seja a de um condutor (como um fio de cobre) seja a de um meio poroso, a distância entre os eletrodos não deve afetar as medidas realizadas. Como, ao cravar o cone, ocorrem processos sucessivos de ruptura de solo no contato com a ponta do cone (Lunne et al., 1996) na região próxima ao corpo do cone o solo passa para um estado amolgado. Devido ao campo elétrico gerado os eletrodos mais afastados tendem a medir a resistividade da região intacta, enquanto os mais próximos medem a resistividade da região amolgada. A distância entre os eletrodos é, portanto, função dos objetivos da investigação. Para investigações geo-ambientais é fundamental detectar pequenas lâminas de contaminantes, por isso eletrodos mais próximos podem ser mais indicados (Campanella et al., 1990).

A medição da resistividade utilizando cones equipados com eletrodos com diferentes espaçamentos entre si torna-se uma ferramenta útil para a avaliação do estado de compactação de um terreno arenoso. No momento da cravação as areias compactas tendem a sofrer dilatação e as fofas tendem a sofrer compressão (Lambe, 1969). Ao alterar o índice de vazios do meio, altera-se também a medida da resistividade. Portanto, em um cone resistivo que faça simultaneamente medições em eletrodos próximos e afastados é possível interpretar os resultados associando a diferença entre eles ao estado de compactação da areia ensaiada (Lunne et al., 1996; Weemes, 1990).

2.3.3- Polarização dos eletrodos

A polarização nos eletrodos ocorre devido ao acúmulo de íons na região próxima aos eletrodos. Este fenômeno produz uma impedância em série com o solo. Na região

próxima aos eletrodos ocorrem reações de oxi-redução para haver transferência de carga (Weemes et al. et al., 1990). A taxa na qual as reações ocorrem é controlada pela concentração de íons que se acumulam à medida que a corrente elétrica é conduzida. Como os íons não podem reagir quimicamente com os eletrodos, eles se acumulam próximo aos eletrodos, gerando assim o fenômeno da polarização.

Como a polarização é uma função da corrente elétrica o problema pode ser mitigado fazendo com que a corrente passe por outro par de eletrodos, utilizados exclusivamente para realizar a medição da voltagem. O efeito da polarização dos eletrodos pode ser visto na Figura 2.12, na qual a resistividade medida está normalizada pela resistividade medida na frequência de 1000Hz e pautada contra a frequência para três configurações distintas de eletrodos, duas configurações com dois eletrodos e outra com quatro. Weemes (1990) observou que a configuração de dois eletrodos mostra-se dependente da frequência devido à polarização. A medida que a frequência de 1000Hz se aproxima o efeito da polarização diminui. Isto ocorre porque os íons não têm tempo de se acumular no eletrodos. Por esse motivo uma configuração de dois eletrodos pode ser utilizada com sucesso se for aplicada uma frequência adequada.

2.4- Fator de formação

A expressão “fator de formação” (FF) é uma tradução literal da expressão “*formation factor*”. Trata-se de um parâmetro adimensional igual à razão entre a resistividade integral do solo (ρ_{int}) e a resistividade do fluido intersticial (ρ_f), segundo a Equação 2.24.

$$FF = \frac{(\rho_{int})}{(\rho_{flu})} = \frac{(\sigma_{flu})}{(\sigma_{int})} \quad (2.24)$$

Este termo refere-se à forma dos grãos, pois admite-se que a condução elétrica varia exclusivamente em função da geometria dos canalículos formados entre os grãos.

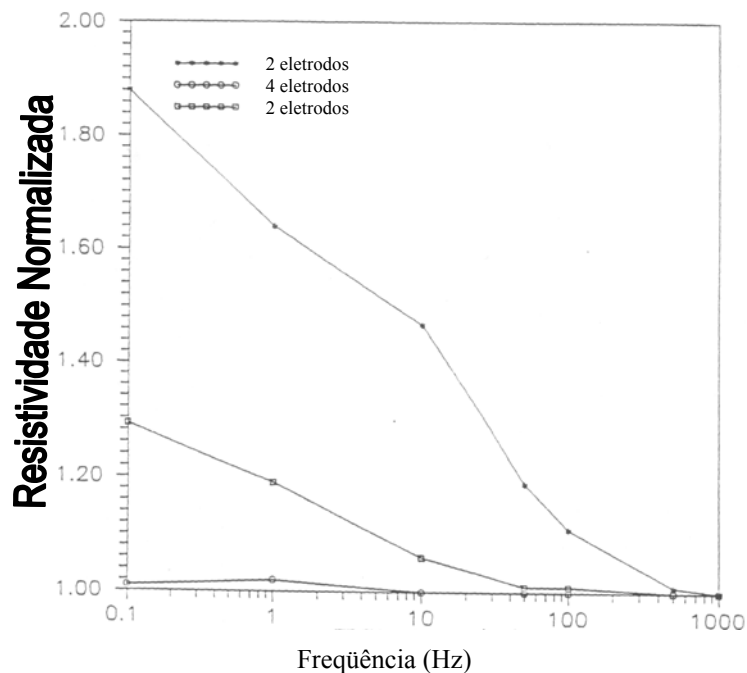


Figura 2.12- Resultados experimentais obtidos por Weemes (1990) para resistividades medidas em função da frequência aplicada para diferentes configurações de eletrodos

Uma das principais considerações é que não haja condução elétrica pela superfície das partículas (Weemes, 1990). Em situações práticas de geotecnia, a forma dos vazios está diretamente associada à forma dos grãos e, portanto, à mineralogia. Como os argilominerais podem conduzir carga elétrica e a medição da resistividade não distingue os fenômenos, mede-se um fator de forma aparente (Jackson et al., 1978).

Diversas relações empíricas têm sido produzidas para descrever o fator de formação. Archie foi o primeiro autor a propor uma expressão matemática, obtida de maneira empírica, para o fator de formação (FF), apresentado na Equação 2.25.

$$FF = n^{-m} \quad (2.25)$$

Nesta equação n é a porosidade do solo e m , uma constante que é admitida ser dependente do grau de cimentação entre as partículas, da ordem de 1,6 para areias; 1,3 para esferas de vidro e 2,0 para argilas (Jackson et al., 1978).

A fórmula de Archie é muitas vezes apresentada na literatura sob a forma apresentada na Equação 2.26.

$$FF = a \times n^{-m} \quad (2.26)$$

Jackson (1978) relata que Winsauer em 1952 introduziu a constante a na equação proposta por Archie. Contudo esta equação não é consistente com a condição na qual a porosidade (n) é igual a um pois neste caso o fator de formação teria que ser igual à unidade. Resumindo o trabalho de diversos pesquisadores Keller e Frischknecht, (1966) observaram que o parâmetro a é menor que a unidade para meios porosos, maior que a unidade para meios fraturados e que m depende da cimentação entre as partículas sólidas (Jackson et al., 1978).

Na condição não saturada, a Equação 2.19 pode ser utilizada. Combinando esta expressão com a Equação 2.26, chega-se à Equação 2.27 que é apresentada por diversos autores (Campanella et al., 1999; Hassanein et al., 1996).

$$FF = a \times n^{-m} S^{\% -B} \quad (2.27)$$

Nesta equação $S^{\%}$ é o grau de saturação do solo e B um parâmetro empírico (Hassanein et al., 1996).

Jackson et al. (1978) apresentou um trabalho no qual a forma, o tamanho e a distribuição granulométrica influenciam o fator de formação. Para realizar os ensaios o referido autor utilizou uma variedade de amostras, naturais e artificiais, e assim observou a relevância de cada variável. Uma das principais observações foi que a fórmula de Archie pode ser aplicada da maneira que foi proposta inicialmente (Equação 2.25, ou com $a = 1$ na Equação 2.26).

2.4.1- Efeito da forma dos grãos

A influência da forma das partículas sobre o fator de forma foi estudada por Jackson et al. (1978) utilizando amostras artificiais e naturais. Foram usadas amostras de esferas de vidro, areia cujos grãos eram arredondados, areia com formas alongadas, uma razão de 1 para 1 de esferas de vidro e fragmentos de conchas e exclusivamente fragmentos de conchas. Os resultados obtidos pelo referido autor podem ser verificados na Figura 2.13. O autor observou que à medida que as partículas de cada amostra se tornam menos esféricas a posição e a inclinação da reta, no plano do fator de forma contra a porosidade, variam. O referido autor constatou que quanto menos esféricas forem as partículas, maior será o parâmetro m da fórmula de Archie.

Ensaando amostras com diferentes porcentagens de fragmentos de conchas, Jackson et al. também observou a influência da forma das partículas. Os resultados desses ensaios estão apontados na Figura 2.14 e podem ser expressos em função da fórmula de Archie. O referido autor observou que quanto menor a porcentagem de conchas, menor é o parâmetro m . Isso reforça a hipótese de que quanto mais esféricas forem as partículas, menor é o parâmetro m .

Outra série de experimentos foi realizada por Jackson et al. (1978) com diferentes tipos de areias. A fim de verificar se o tamanho e a distribuição granulométrica influenciam o comportamento resistivo do solo, o referido autor realizou ensaios com corpos de provas feitos de areias com o mesmo diâmetro médio e distribuição granulométrica variada. Após determinar a fórmula de Archie (2.26) para cada solo, verificou-se que o expoente “ m ” variou pouco, entre 1,41 e 1,45. Isso sugere que a dimensão dos grãos não influencia muito o valor do expoente “ m ”. Portanto, em uma porosidade fixa, o decréscimo da esfericidade dos grãos implica em maiores valores de FF, enquanto que a distribuição granulométrica apresenta um efeito muito pequeno.

2.5- Conclusões parciais

A condução elétrica, de maneira genérica, existe devido ao movimento de partículas com carga elétrica. Em condutores as cargas elétricas pertencem aos elétrons, que entram em movimento ordenado devido à aplicação de uma diferença de potencial. Em meios porosos a condução elétrica pode ocorrer de três maneiras: (i) eletrônica, movimento de cargas pela superfície das partículas; (ii) a eletrolítica, associada ao movimento de íons na solução; e (iii) a dielétrica, que ocorre devido à polarização das partículas do solo. O fenômeno mais expressivo sobre a condução elétrica total é a eletrolítica. Essa condução ocorre devido a características do fluido intersticial enquanto as demais são função de aspectos mineralógicos e por isso podem ou não ocorrer.

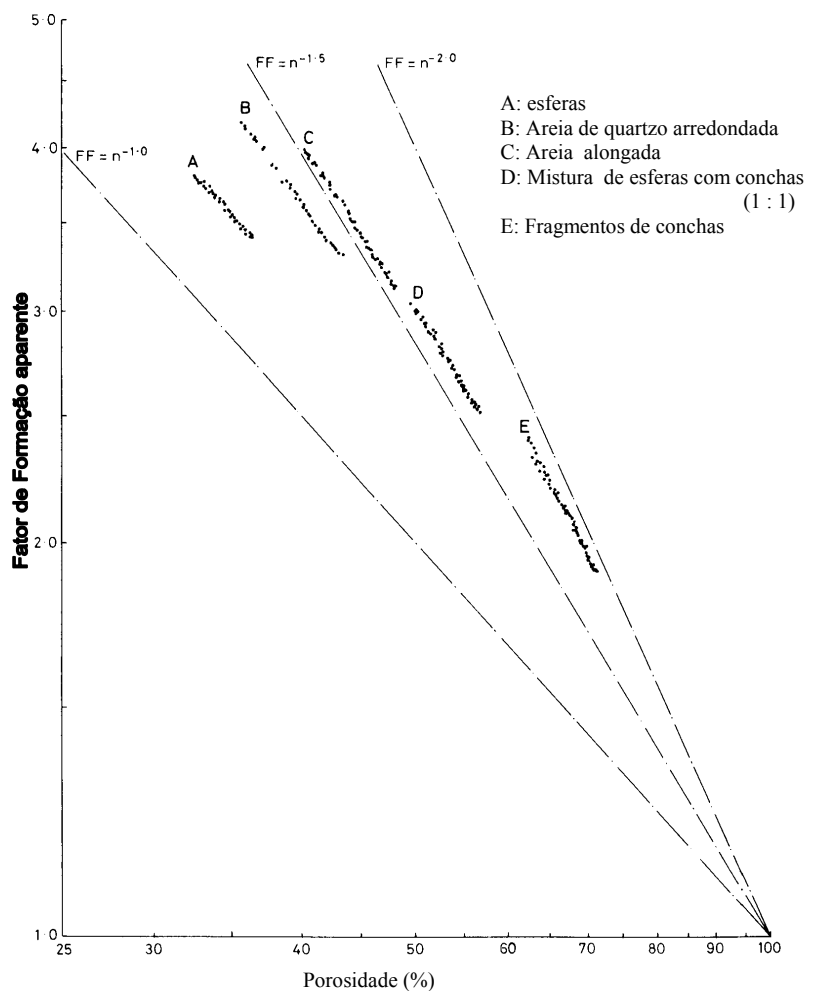


Figura 2.13- Resultados FF obtidos por Jackson et al. (1978) em diferentes porosidades para diferentes tipos de materiais.

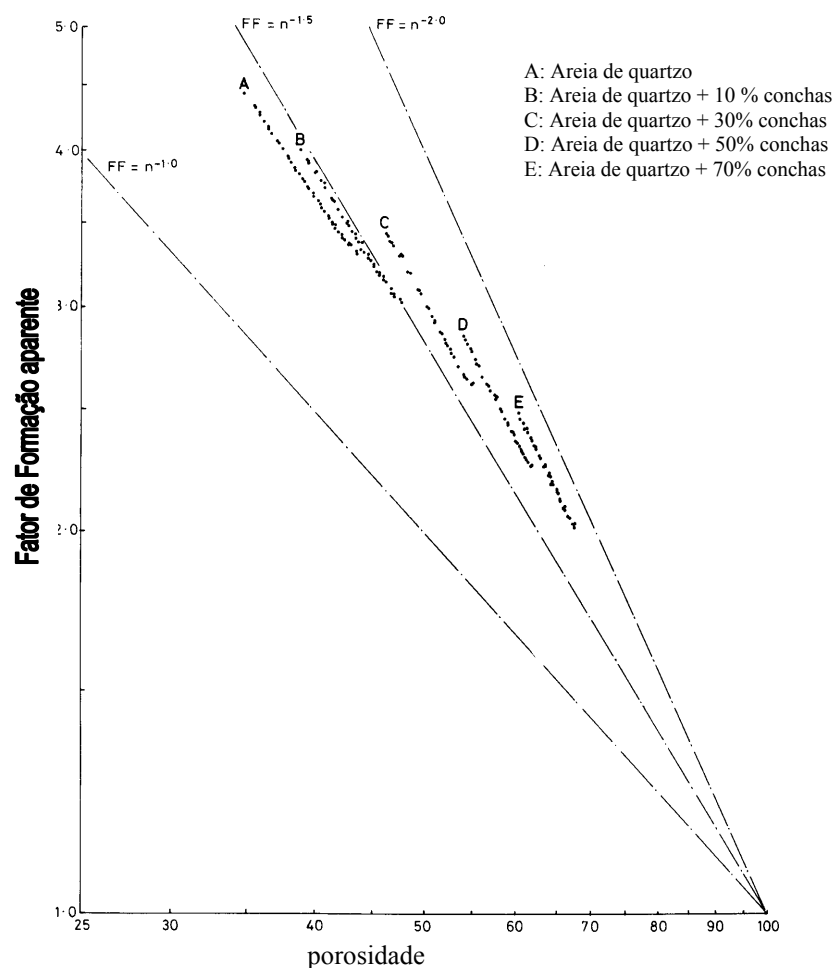


Figura 2.14- Resultados FF obtidos por Jackson et al. (1978) em diferentes porosidades para materiais com diferentes porcentagens de conchas.

Quando uma diferença de potencial é aplicada entre os eletrodos do cone resistivo, forma-se uma rede de fluxo elétrica, na qual podem ser observadas linhas de corrente e equipotenciais. Imerso em um meio aquoso, as linhas equipotenciais têm forma de esferóides, mas no plano tomam forma de semi-circunferências concêntricas com o centro no eletrodo de potencial. A introdução de um sistema particulado altera a geometria da rede de fluxo elétrica, o que implica na redução de condutividade. A geração da rede de fluxo elétrica é um aspecto limitante para determinar as dimensões do recipiente no qual ocorrem a calibração e os ensaios. Recipientes com dimensões insuficientes podem deformar a rede de fluxo alterando, portanto, a rede de fluxo.

A razão entre a condutividade do fluido e a integral é definida como o Fator de Formação (FF), uma grandeza adimensional característica do tipo de solo e da porosidade em que se encontra. Existem algumas equações na literatura que determinam o Fator de Formação. A Fórmula de Archie $FF = n^{-m}$, além de ser a mais antiga, é a que expressa melhor o Fator de Formação em função da porosidade. O Fator de Formação de um determinado tipo de solo é associado à forma dos grãos e por isso não depende da concentração salina do meio.

Em escala bi-logarítmica verifica-se que a relação entre o Fator de Formação e a porosidade é retilínea, cuja inclinação depende do parâmetro m . O parâmetro m aumenta à medida em que as partículas se tornam menos esféricas, fazendo com que sua representação se torne mais inclinada. Outra característica de um solo que colabora para o aumento do parâmetro m é a presença de conchas. O formato e o aumento da porcentagem de conchas também são responsáveis por uma elevação entre a relação do Fator de Formação e a porosidade.

Jackson et al., 1978, observou que a distribuição granulométrica tem pouca influência sobre o parâmetro m da fórmula de Archie. Por isto o Fator de Formação de dois solos diferentes, um com granulometria bem distribuída e outra mal distribuída, mas com forma dos grãos semelhantes, poderão ser definidas pela Fórmula de Archie com parâmetro m quase idênticos. Contudo, é importante ressaltar que a porosidade em solos com granulometria bem distribuída tende a ser inferior à porosidade de solos mal distribuídos. Por esse motivo o Fator de Formação calculado para solos bem distribuídos tende a ser maior que o de solos mal distribuídos.

Capítulo 3

Apresentação do Cone resistivo e dos Solos ensaiados em Laboratório

A ponteira resistiva adquirida pela COPPE/UFRJ (Van Der Berg) em parceria com a UFRGS e a UFPE através do projeto PRONEX tem dois eletrodos e foi estudada a fim de dominar detalhes em relação ao projeto e execução. De posse do conhecimento tecnológico envolvido na construção do cone resistivo, tanto em relação ao próprio cone, bem como em relação à placa geradora de sinal, um novo equipamento foi criado (Nacci, 2004) e utilizado na presente pesquisa.

3.1- A ponteira resistiva

Na ponteira resistiva de dois eletrodos o corpo do cone é considerado como segundo eletrodo que serve de referência para a determinação da diferença de potencial. Isso é de fundamental importância para a concepção eletrônica, pois além de gerar uma diferença de potencial, os eletrodos são responsáveis por realizar a medição da diferença de potencial que chega entre eles. O presente trabalho não tem por objetivo apresentar detalhes do projeto eletrônico a serem discutidos por Nacci (2004), e sim aplicar a ferramenta a solos.

O cone resistivo adquirido por meio do PRONEX está mostrado na Figura 3.1. A seção longitudinal do cone resistivo utilizado nesta pesquisa esta apresentada na Figura 3.2 e possui geometria semelhante à adquirida pela parceria pelo PRONEX. Estão apresentados também detalhes sobre as especificações das roscas, peso e dimensões.



Figura 3.1- Fotografia do cone resistivo adquirido pelo programa PRONEX.

A Figura 3.3 mostra o conjunto de equipamentos necessários para realizar a medição de resistividade. Da esquerda para a direita estão apresentados: o cone resistivo, o cabo, a caixa que contém a placa geradora de sinal e o multímetro. Não estão apresentados o conjunto de hastes, nem o equipamento de cravação. Os equipamentos não mostrados na foto são os mesmos utilizados para ensaios de CPTU. Existe ainda uma peça que faz a conexão entre o cone e a primeira haste. Este elemento de união recebe o nome de “luva” e é constituído de uma peça cilíndrica vazada de aço com duas roscas nas extremidades, uma compatível com a rosca do cone e a outra com a da haste. Uma fotografia deste conjunto está apresentada no Capítulo 6, sobre a investigação em campo.

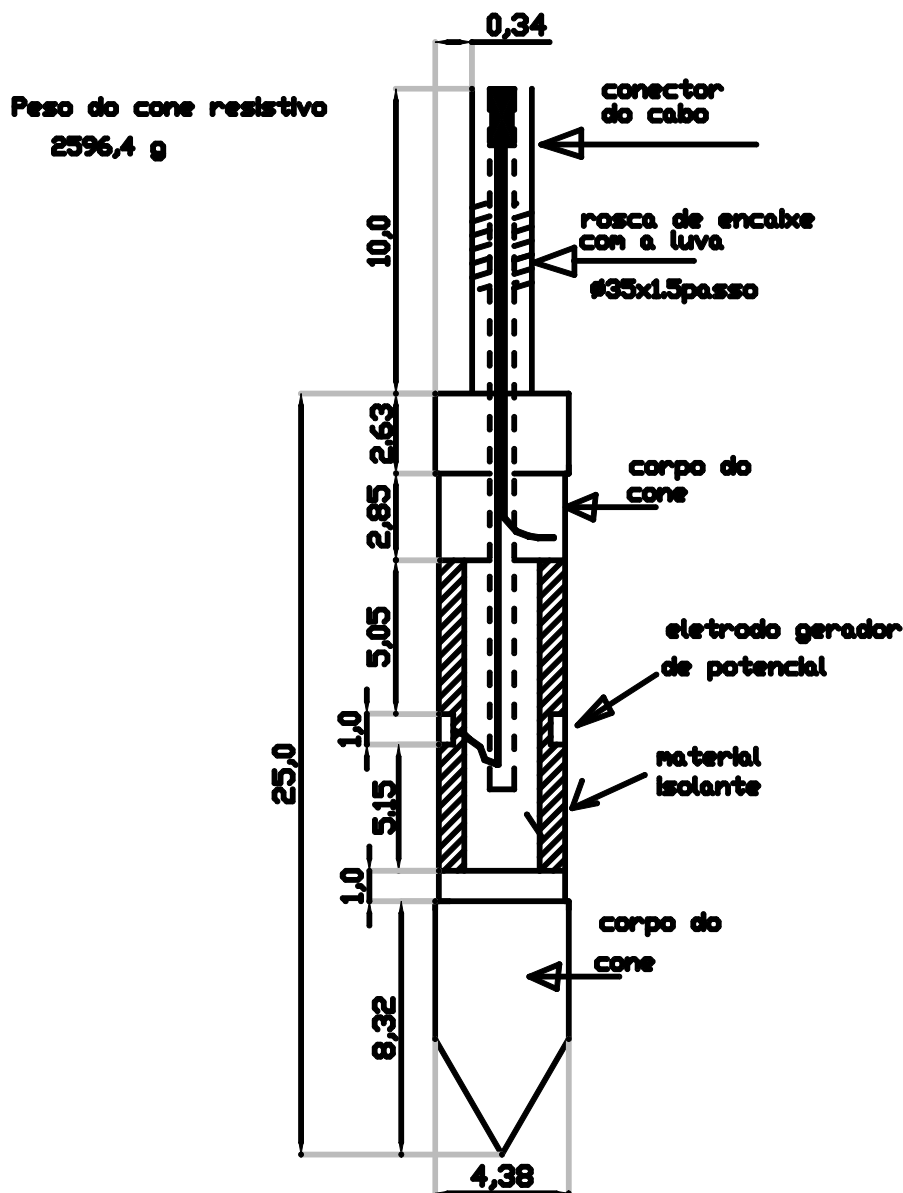


Figura 3.2- Representação esquemática da seção longitudinal do cone resistivo utilizado na presente pesquisa

3.1.1-O cabo / conectores

O cabo é responsável pela conexão entre o cone resistivo e a placa geradora de sinal. Utilizou-se um cabo tipo “manga” de 10 vias, sendo que somente 4 vias são utilizadas e as demais podem substituir alguma que venha a se romper. Na extremidade de conexão com o cone é necessário que a vedação seja garantida a fim de evitar a entrada de água no circuito elétrico. Isso é garantido por dois *o-rings* de borracha no conector como mostra a Figura 3.4. Antes de realizar a conexão, o uso de vaselina é desejável para que o atrito seja minimizado. Com o passar do tempo é necessário que seja feita a substituição dos *o-rings* devido ao desgaste. O mesmo cuidado não é necessário com a extremidade oposta do cabo que possui um conector de conexão rosqueada com a caixa da placa.



Figura 3.3- Conjunto de equipamentos necessários para medição de condutividade elétrica por meio do cone resistivo.

3.1.2- A placa geradora de sinal

As Figuras 3.5 e a 3.6 mostram com detalhe o recipiente no qual fica a placa geradora de sinal. Na Figura 3.5 está a parte traseira na qual está mostrado o interruptor e o seletor de voltagem de alimentação, que pode ser de 110V ou 220V em corrente

alternada. Está mostrado também o fusível de segurança da placa, o pino de aterramento e a tomada de alimentação.

Na Figura 3.6 está apresentada a frente do recipiente , onde existe um seletor de faixa de escala e a conexão com o cabo. O seletor de faixa tem a função de variar a faixa de escala a ser usada na medição. As faixas, denominadas de canais, foram numeradas de tal modo que a número 1 correspondesse a meios menos condutivos. Acima do seletor de canais existem três luzes alinhadas. A do meio é vermelha e a as de cada extremidade são verdes, sendo que a do meio é ligada automaticamente quando a placa é ligada. As luzes verdes têm o objetivo de mostrar que a faixa de escala utilizada está inadequada. Por este motivo, quando estão sendo realizadas medições além da faixa de projeto, acende a luz verde da direita, indicando que é necessário ajustar o seletor para um canal superior, que é feito girando o seletor à direita. A luz verde da esquerda acende quando o meio é pouco condutivo para realizar medições na faixa de escala utilizada, indicando a necessidade de alterar o canal. Nesta face está alocado também o terminal de saída da placa que se conecta ao multímetro, conforme indicado na Figura 3.6. Neste terminal mede-se a diferença de potencial em corrente contínua.

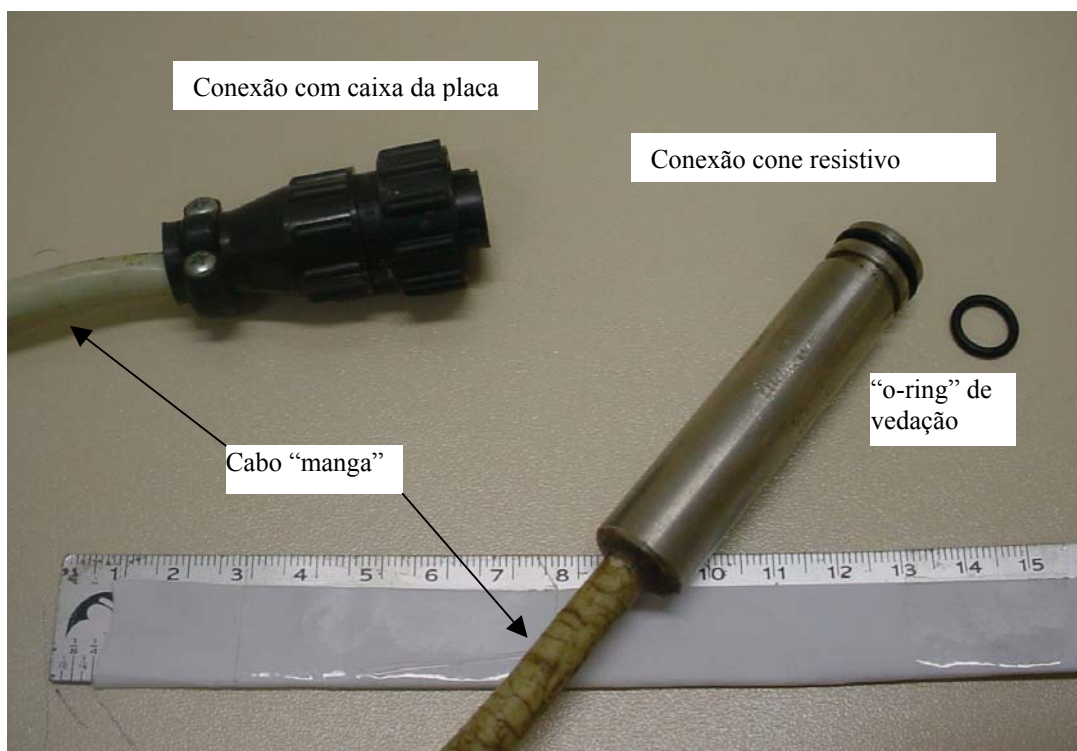


Figura 3.4- Detalhe dos conectores utilizados nas extremidades do cabo "manga".

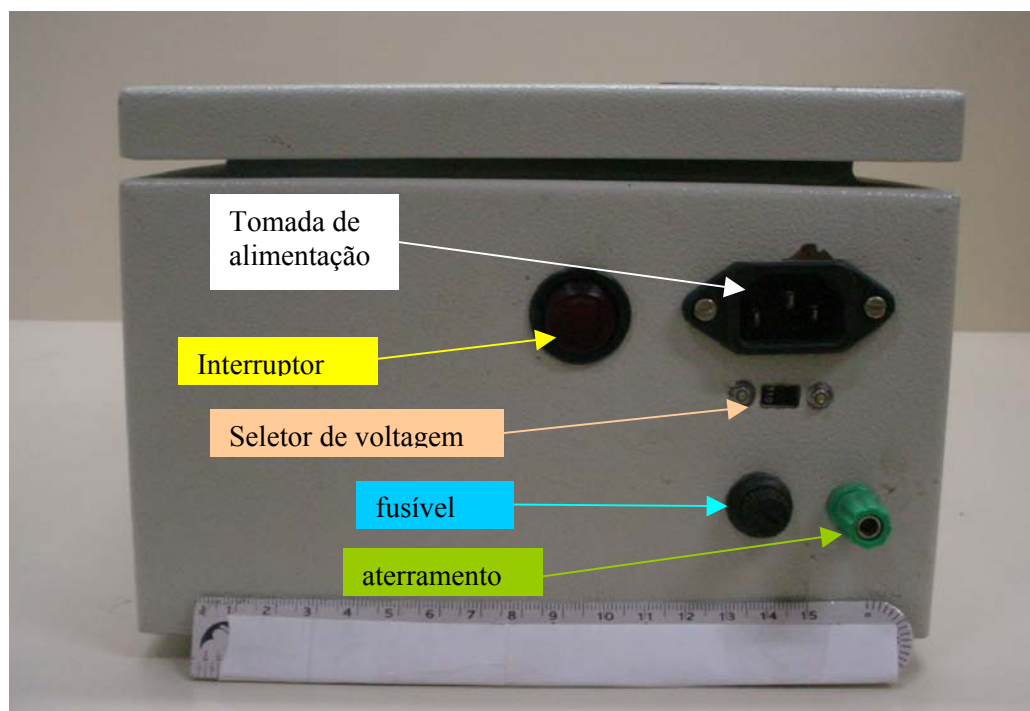


Figura 3.5- Detalhe da parte traseira do recipiente no qual a placa geradora de sinal está contida.

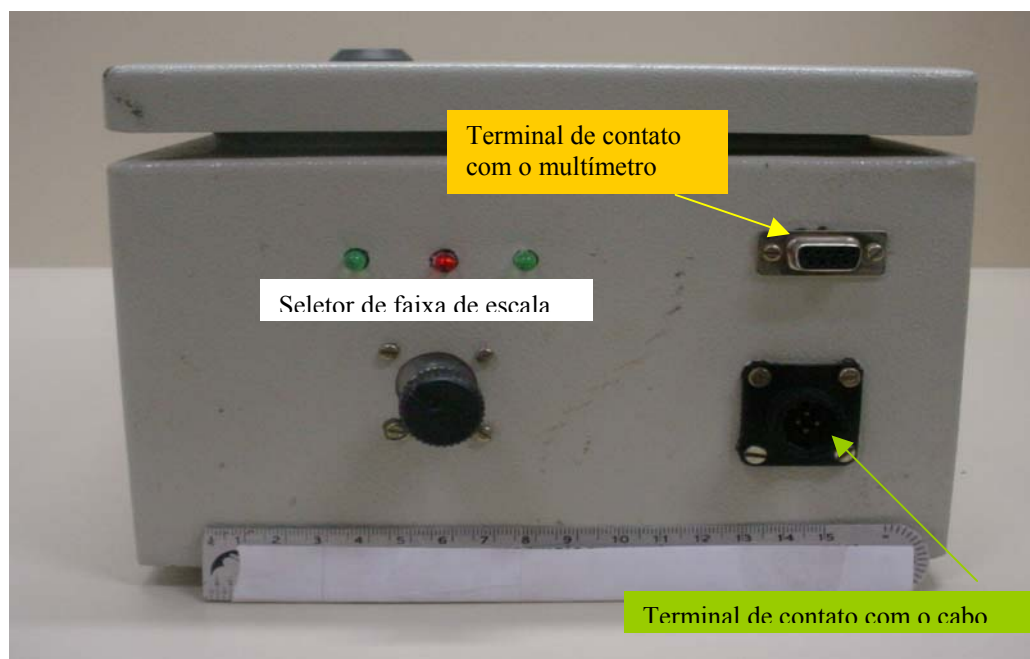


Figura 3.6- Face frontal do recipiente no qual está contida a placa geradora de sinal.

3.2- Solos ensaiados

Nos ensaios realizados em laboratório procurou-se analisar somente o fenômeno da condução eletrolítica e por isso o solo ensaiado era puramente quartzoso, no caso dos ensaios realizados com areias, e caulínítico, para simular solos finos.

3.2.1- Areias ensaiadas

Para que os comportamentos eletro-resistivos de diferentes tipos de areias pudessem ser comparados foram realizados ensaios com três tipos de areia distintos. A primeira foi coletada da praia de São Francisco, Niterói (RJ). Este material consiste de uma areia mal graduada de granulometria fina, cuja identificação mineralógica foi realizada por Oliveira Filho (1987). Por meio de uma lupa binocular foram identificadas partículas abundantes de quartzo dos tipos incolor, branco leitoso, amarelo e incolor com incrustações escuras. Foram ainda encontradas partículas de mica biotita sob a forma de lamelas amarelas e marrons e minerais escuros, como hematita e lecoxênio, também aparecem em pequena quantidade. A forma predominante das partículas varia de subarredondada para subangular, não passando a relação entre a maior e a menor dimensão das partículas de 1,5.

O segundo tipo de areia ensaiada foi recolhido da praia de Itaipuaçu, ao norte da cidade de Niterói, no Rio de Janeiro. Trata-se de uma areia mal graduada com granulometria grossa. Os grãos eram de forma arredondada de coloração incolor, branco e opaco.

O terceiro tipo de areia ensaiado foi fabricado no laboratório e consiste de uma mistura das duas areias descritas acima. As quantidades, em peso, de cada tipo de areia foram iguais, de modo que havia 50% de areia fina, de São Francisco, e 50% de areia grossa, de Itaipuaçu. A homogeneização foi feita colocando 8kg de cada material em um saco plástico grande e resistente. O saco plástico foi então colocado em agitação manual por aproximadamente 15 minutos, com um nó na extremidade do saco plástico a fim de evitar a fuga de grãos. A Figura 3.7 compara as curvas granulométricas obtidas para cada tipo de areia ensaiada.

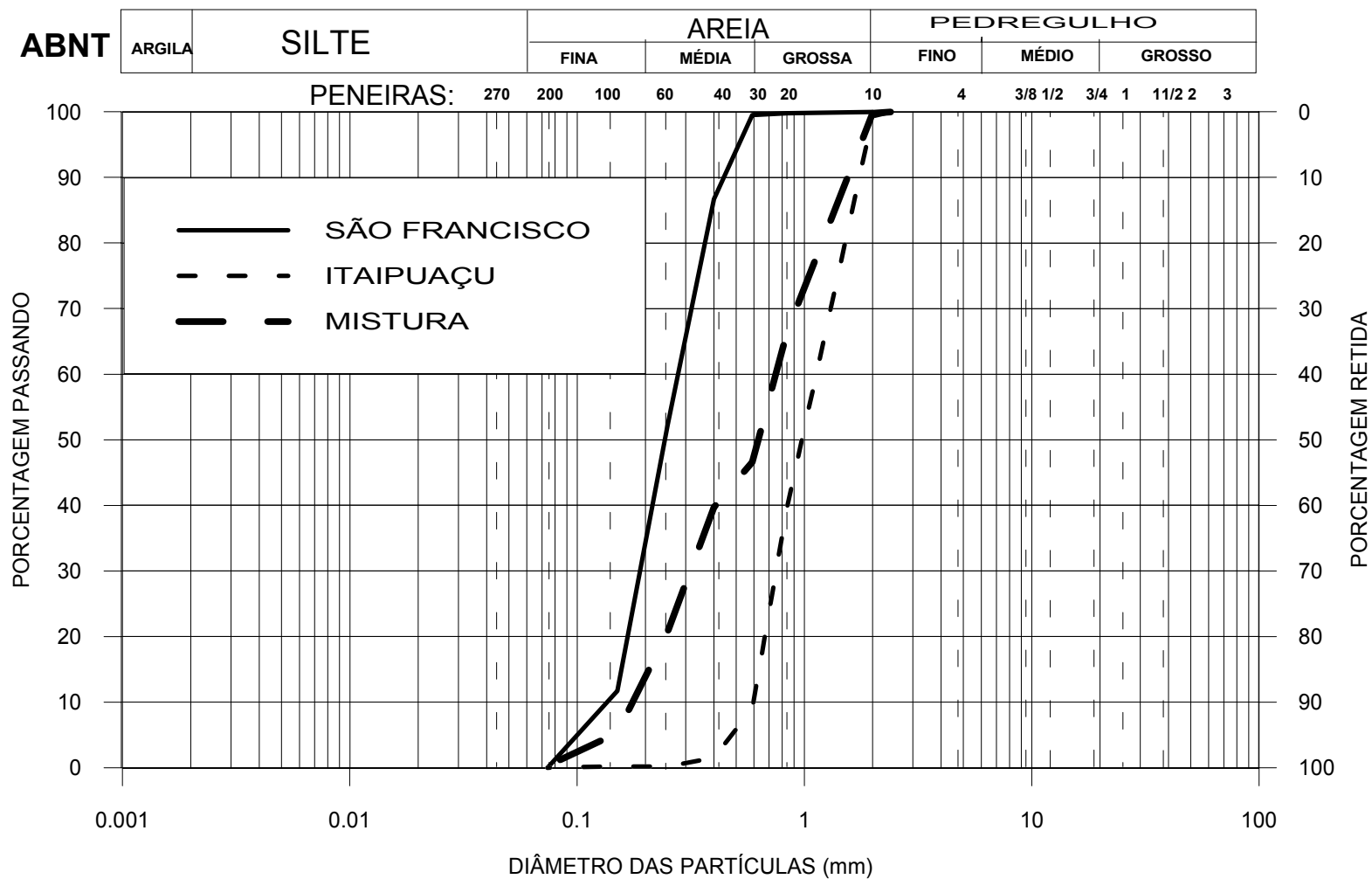


Figura 3.7- Curvas granulométricas de todas as areias ensaiadas em laboratório

Foi ensaiado ainda outro tipo de areia, uma mistura de areia de São Francisco com conchas com o intuito de observar a influência das conchas sobre a resistividade medida. As conchas foram recolhidas da lagoa de Araruama, na cidade de Iguaba, no Estado do Rio de Janeiro, num local onde havia uma dragagem de conchas da lagoa para fins comerciais. A extração foi proibida por órgãos ambientais, mas até a data do recolhimento havia uma camada de conchas de aproximadamente 5cm sobre o solo na margem da lagoa. Para eliminar porções de solo coletadas e fragmentos de conchas, todo o material recolhido foi passado na peneira #100 e foi utilizado somente o material retido. Para recolher plásticos, folhas e conchas de grande dimensão o material foi passado pela peneira USBB # ½. (cuja abertura é de 12,5mm, sem correspondente ABNT). A grande maioria das conchas aproveitadas possuía forma achatada, na qual uma das dimensões era muito inferior às demais, como mostra a Figura 3.8.

Como a densidade do calcário é inferior à da areia quartzosa, optou-se por realizar uma proporção em volume dos dois materiais. Utilizando uma proveta calibrada para 2 litros, foi recolhida uma proporção 2:1 de areia para conchas, ambos os materiais no estado de compactidade mais elevado possível obtido por agitação manual da proveta. O método de homogeneização utilizado para este novo material foi semelhante ao descrito para a mistura das areias, realizado em um saco plástico, sem impacto para minimizar a quebra de conchas.



Figura 3.8- Conchas provenientes da lagoa de Araruama utilizadas para realizar ensaios com conchas misturadas à areia de São Francisco.

3.2.2- Preparo das areias para os ensaios

A areia ensaiada recolhida em um ambiente marinho, continha uma grande quantidade de sais e objetos indesejáveis de diferentes dimensões. Por isso a primeira medida a ser tomada foi passar todo o material recolhido em uma peneira ABNT # 200 (198mm). Objetos tais como plásticos e rochas foram então separados, como mostra a Figura 3.9.

Foi necessário ainda lavar com água de torneira todo o solo coletado. Volumes de areia aproximadamente iguais a meio balde de 14 litros, foram mantidos em um reservatório com constante agitação manual e água corrente. Ao encher o reservatório, esperava-se que as partículas se depositassem e a água era então eliminada tombando o reservatório. A rotina de lavagem da areia está exemplificada na Figura 3.10, que mostra a etapa de agitação do solo, e na Figura 3.11 que mostra a eliminação da água. Esse procedimento se repetiu até que a água eliminada tivesse visivelmente a mesma turbidez de uma lavagem anterior. Ao final de cada ensaio também foi necessário lavar e secar a areia, devido à excessiva presença de íons na solução percolante.



Figura 3.9- Objetos eliminados do material recolhido da praia.



Figura 3.10- Lavagem da areia por meio de agitação manual com água corrente.



Figura 3.11- Eliminação do excesso de água do reservatório de lavagem da areia.

Após a etapa de lavagem a areia foi seca ao ar como mostra a Figura 3.12. A água da torneira possui íons dissolvidos que se aderem às paredes das partículas quando a água da lavagem evapora. A única maneira de livrar completamente o solo dos íons seria lavar a areia com água deionizada, ou esperar que isso ocorresse motivado pela percolação de água deionizada pelo corpo de prova a ser ensaiado. Optou-se pela segunda opção, mas com água destilada que tem condutividade muito reduzida por ser disponível em volumes suficientes.

Após seca ao ar a areia de São Francisco foi passada na peneira #100 (0,149mm) para eliminar a fração granulométrica mais fina, seguindo a orientação de Oliveira Filho (1987) para o preparo dos corpos de prova. Desta maneira obteve-se um material uniforme, sem possibilidade de haver segregação durante a confecção dos corpos de prova.



Figura 3.12- secagem ao ar da areia de são Francisco utilizada nos ensaios de resistividade.

3.4- índice de vazios

Além de analisar a influência do tipo de solo verificou-se o comportamento eletro-resistivo em função da variação do índice de vazios. Adotou-se o método da pluviação ao ar, descrito a seguir, para o preparo dos corpos de prova em diferentes índices de vazios. Este método foi utilizado por Oliveira Filho (1987) e mostrou-se satisfatório quanto à variabilidade de índices de vazios e à repetibilidade dos valores obtidos.

3.3- O método da pluviação ao ar

O preparo de corpos de prova por meio de pluviação ao ar, também chamado de chuveiramento foi realizado com um funil, substituível de modo a variar a abertura da saída, e um conjunto de peneiras semelhante às utilizadas em ensaios de granulometria.

O conjunto de peneiras foi constituído de apenas duas aberturas. Como o material de São Francisco também foi ensaiado por Oliveira Filho (1987) foram usadas seqüências de aberturas semelhantes, entretanto, o referido autor relata ter utilizado um conjunto de 6 peneiras iguais e no presente estudo foram usados apenas 4 com mostra a Figura 3.13. Esta diferença não implicou em diferenças significativas entre os corpos de provas obtidos, como será discutido no item a seguir. Em ambos os casos uma peneira da ABNT # 10 ficou posicionada acima do conjunto de peneiras de mesma abertura, ABNT número 4.



Figura 3.13- Conjunto de peneiras utilizadas para fazer os corpos de prova utilizando a areia de São Francisco, método original.

Como a granulometria da areia de Itaipuaçu é grossa, sua passagem na peneira #10, não é instantânea e necessita de vibração. Por esse motivo a utilização desta peneira mostrou-se inapropriada, tanto para os corpos de prova feitos com areia de Itaipuaçu, como os feitos com a areia misturada. Adotou-se, então, um método adaptado para realizar o chuveiramento, utilizando-se apenas o conjunto de 4 peneiras #4, como mostra a Figura 3.14.

Pelo método da pluviação ao ar existem duas variáveis que podem influenciar o valor do índice de vazios dos corpos de prova, a altura de queda e a abertura do funil. Oliveira Filho (1987) relata que a influência da altura de queda das partículas não repercute em diferenças expressivas nos resultados obtidos. Entretanto, a abertura do funil mostrou-se decisiva sobre o valor do índice de vazios encontrado. Por esse motivo, a areia durante a pluviação deve ocupar toda a seção da abertura do funil. Por este motivo, para realizar a pluviação, o funil era preenchido com areia com a abertura fechada. Ao completar o volume do funil liberava-se a abertura do funil, permitindo que a areia caísse no recipiente desejado como mostra a Figura 3.15a. A Figura 3.15b mostra o detalhe da areia em queda dentro do balde.



Figura 3.14- Conjunto de peneiras utilizadas no método adaptado para a elaboração de corpos de prova com a areia de Itaipuaçu e a misturada.

4 x # 4

No método da pluviação a velocidade de queda da areia é aproximadamente constante e o que varia é a quantidade de areia por intervalo de tempo, regulada pela abertura do funil. Desta maneira o tempo de deposição das partículas varia. Nos funis

com menor abertura há mais tempo para que os grãos se organizem, conduzindo a um estado de compacidade mais elevado.

No caso dos corpos de prova constituídos da areia de São Francisco misturada com conchas foi utilizado um método modificado. Este método consiste da simples queda da areia ao sair do funil diretamente para dentro do balde. A não utilização das peneiras se justifica pelo fato de aumentar a segregação das partículas, o que colabora para diminuir a homogeneidade dos corpos de prova. Para esta metodologia a areia em queda era direcionada manualmente em movimentos circulares para a região próxima à parede do balde como mostra a Figura 3.16. Esta metodologia se fez necessária para evitar o choque do material com o cone, que fica situado na mesma linha vertical que o centro do funil. Nas demais metodologias utilizadas este direcionamento não foi necessário porque as peneiras espalham os grãos evitando o choque direto do material com o cone, portanto, o direcionamento para as paredes do balde não se faz necessário.

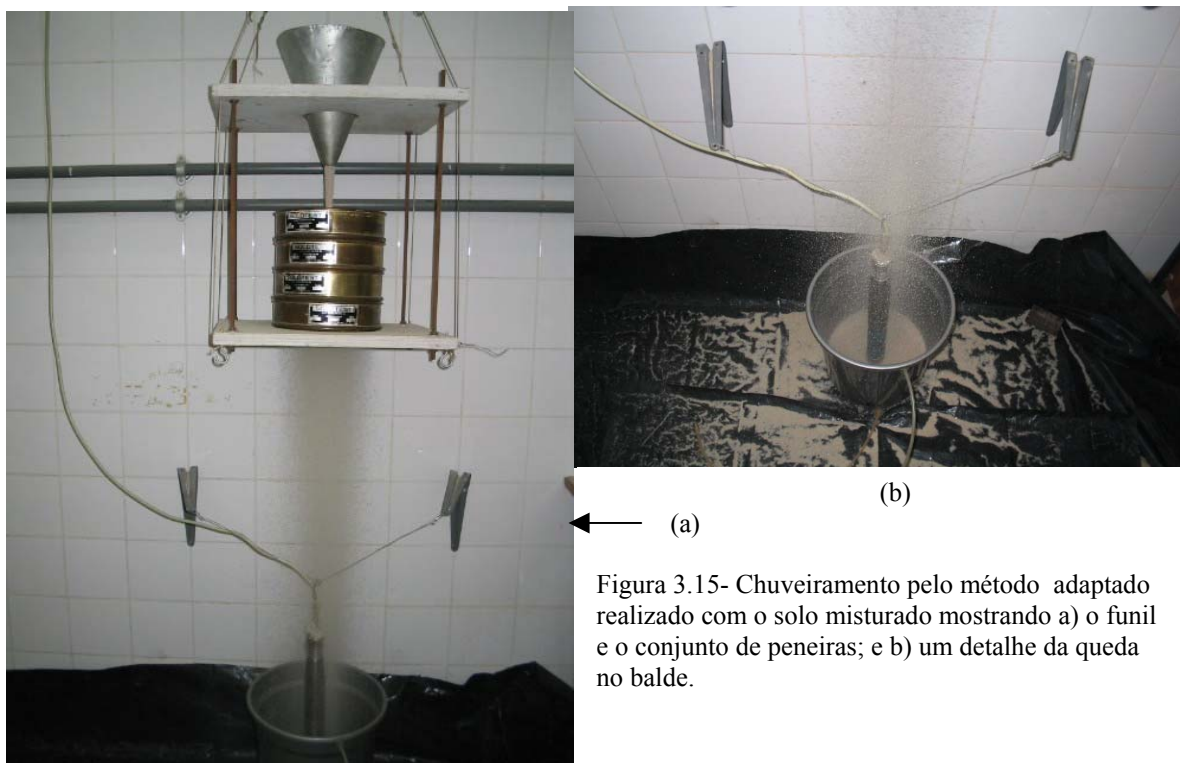


Figura 3.15- Chuveiramento pelo método adaptado realizado com o solo misturado mostrando a) o funil e o conjunto de peneiras; e b) um detalhe da queda no balde.



Figura 3.16- Método modificado de chuveiramento utilizando a areia de São Francisco misturada com conchas.

3.3.1-Determinação do índice de vazios

Apesar de adotar o mesmo material e procedimentos apresentados em Oliveira Filho, (1987) fez-se necessário realizar uma bateria de ensaios a fim de determinar os índices de vazios obtidos em um recipiente grande. Isso se explica porque o referido autor obteve corpos de provas com volume de aproximadamente 0,2 litro, enquanto que os ensaios realizados na presente pesquisa ocorreram em um balde de aproximadamente 14 litros. A necessidade de um recipiente de tais dimensões se explica no item 2.1.2.3.

O índice de vazios foi determinado medindo o volume do recipiente, um balde, e pesando a amostra que ocupava o recipiente após a pluviação e através da densidade real dos grãos, medido em ensaio realizado separadamente. Antes de pesar a areia foi feito o arrasamento na altura da parte superior do balde utilizando um elemento reto e rígido, a fim de deixar a areia ocupando somente o volume do recipiente.

O volume ocupado pelo balde foi determinado pelo peso de água destilada necessário para preenchê-lo, obtido em duas pesagens distintas (P_1 e P_2). Com um termômetro mediu-se a temperatura da água destilada, a fim de obter um fator de

correção relativo à densidade da água. Garantindo a horizontalidade da balança foi possível encontrar valores consistentes, apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Determinação do volume interno do balde utilizado para os ensaios.

P1 = 14,83kg	P médio = 14.885g
P2 = 14,94kg	
tara (g) = 415g	
P água (P médio - tara) = 14470g	
temperatura da água	26°C
fator de correção	0,9968
volume calculado (lts)	14516.45

Após realizar uma bateria de cinco testes com cada abertura de funil, verificou-se que os resultados obtidos nesta pesquisa para a areia de São Francisco eram compatíveis com os resultados obtidos por Oliveira Filho (1987) apesar da diferença de volumes dos corpos de prova. A Tabela 3.2 mostra os resultados obtidos e os compara com resultados obtidos por Oliveira Filho (1987).

Tabela 3.2- Comparação entre os índices de vazios obtidos em testes com valores obtidos por Oliveira Filho (1987)

Índice de vazios medidos no presente estudo					Índices de vazios obtidos por Oliveira Filho (1987)			
índice de vazios / porosidade					índice de vazios / porosidade			
φ (mm)		máximo	mínimo	médio	φ (mm)	máximo	mínimo	médio
50	e ₁	0,748	0,731	0,746	50	0,757	0,735	0,746
	n ₁	0,428	0,422	0,427		0,431	0,424	0,427
21	e ₂	0,613	0,600	0,608	21	0,596	0,589	0,593
	n ₂	0,380	0,375	0,378		0,373	0,371	0,372
18	e ₃	0,590	0,567	0,581	18	0,579	0,575	0,577
	n ₃	0,371	0,362	0,367		0,367	0,365	0,366
6,5	e ₄	0,514	0,506	0,512	8	0,559	0,557	0,558
	n ₄	0,339	0,336	0,339		0,359	0,358	0,358

Como esta bateria de ensaios mostrou que este método conduz a um boa repetibilidade e reprodutibilidade, decidiu-se trabalhar com a hipótese de que cada abertura de funil conduz a um índice de vazios específico. Desta maneira a medição do índice de vazios durante o decorrer dos ensaios não se faz necessário, o que também não seria simples, considerando as dimensões, o volume e o peso de cada corpo de prova. A Tabela 3.3 mostra um resumo dos índices de vazios e porosidades medidas para a areia

de Itaipuaçu, a Tabela 3.4 para a areia misturada e a Tabela 3.5 para a areia de São Francisco misturada com conchas. No Anexo 2 estão apresentadas as planilhas pelos quais foram determinados o peso específico, o índice de vazios e a porosidade referentes a cada tipo de solo.

Tabela 3.3- Índice de vazios e porosidades medidas para a areia de Itaipuaçu.

ϕ (mm)		índice de vazios / porosidade		
		máximo	mínimo	médio
50	e ₄	0,532	0,501	0,514
	n ₄	0,347	0,334	0,339
21	e ₃	0,430	0,424	0,427
	n ₃	0,301	0,298	0,299
6,5	e ₁	0,407	0,404	0,405
	n ₁	0,289	0,288	0,288

Tabela 3.4- Índice de vazios e porosidade medidas para a areia obtida pela mistura da areia de São Francisco com a de Itaipuaçu.

ϕ (mm)		índice de vazios / porosidade		
		máximo	mínimo	médio
50	e ₄	0,529	0,527	0,528
	n ₄	0,346	0,345	0,346
21	e ₃	0,420	0,420	0,420
	n ₃	0,296	0,296	0,296
6,5	e ₁	0,391	0,386	0,389
	n ₁	0,281	0,278	0,2801

Tabela 3.5- Índice de vazios e porosidade medida para a areia de São Francisco misturada com conchas.

ϕ (mm)		índice de vazios / porosidade		
		máximo	mínimo	médio
50	e ₄	0,582	0,578	0,580
	n ₄	0,368	0,366	0,367

3.4- Solos finos

Tendo em vista a dificuldade de reproduzir um determinado tipo de argila, utilizou-se o caulim para simular os solos de granulometria fina. O caulim ⁽¹⁾ é um material argiloso, com pouco ferro e de cor branca ou quase branca. São silicatos de alumínio hidratados, podendo conter outros metais como impurezas. O argilo-mineral predominante no caulim é a caulinita. As características do caulim utilizado estão resumidas na Tabela 3.6.

O índice de atividade das argilas A_c foi criado por Skempton e dá uma indicação da influência da fração argila nas propriedades do solo e da sua susceptibilidade à composição da solução intersticial e dos tipos de cátions trocáveis. O material será mais sensível a esses fatores, quanto maior for a atividade. A densidade real dos grãos (G_s) foi obtida experimentalmente e a rotina de cálculo está apresentada no Anexo 1.5.

Tentou-se realizar ensaios de determinação de limite de liquidez e de plasticidade do caulim utilizando as soluções utilizadas nos ensaios, entretanto o material mostrou-se sem coesão, por isso os ensaios não foram satisfatórios. No limite de liquidez o arrasamento da amostra com a espátula resultou na deformação de todo o solo e no ensaios de limite de plasticidade não foi possível fazer rolos cilíndricos.

Tabela 3.6- propriedades do caulim estudado.

Material	w(%)*	w _L *	w _P *	G _s *	A _c **	CTC**
Caulim	0,10%	---	---	2,755	0,4	2,6meq/100g

(*) resultados experimentais obtidos na presente pesquisa

(**) resultados obtidos por Ritter, 1998

Com base em resultados de difração de raio-X, Ritter (1998) relatou que o mineral argílico caulinita, vendida comercialmente, apresenta-se inerte. Tal se deve aos processos industriais de beneficiamento dados a esses materiais para uso principalmente no uso do papel (cerca de 50%), na confecção de cerâmicas e refratários e, em menor escala, na fabricação de tintas e borrachas.

(1) O termo ingles ‘*Kaolin*’, de origem chinesa, é uma corruptela de “*kauling*”, que significa colina alta, e é o nome de um monte perto de Jauchau Fu, hoje a República Popular da China (Souza Santos, 1975)

Para fins de elaboração de corpos de provas para determinar a condutividade, adotou-se metodologias consagradas pela experiência do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. Utilizando uma bateadeira industrial, apresentada na Figura 3.17 misturou-se uma determinada quantidade de caulim a um volume de solução. A solução foi preparada antes da homogeneização adicionando KCl à água. A bateadeira ficou em funcionamento por aproximadamente duas horas, depois o material era colocado em um balde, com dimensões iguais ao utilizado nos ensaios com areia.

Controlando a umidade, o peso específico, e sabendo a densidade real dos grãos, determinaram-se os índices físicos dos corpos de prova ensaiados. Entretanto, a metodologia utilizada apresenta a deficiência de não garantir a saturação do material, mesmo para umidades elevadas. A metodologia ideal seria a aplicação de vácuo ao longo da mistura, realizada em uma betoneira, a fim de eliminar o ar dentro do material.

Foram realizadas duas baterias de ensaios utilizando o caulim. Na primeira, a medição da condutividade foi realizada exclusivamente após a mistura, na segunda, além da medição após a mistura, deixou-se que o material sedimentasse por 20hs com o cone resistivo inserido no recipiente. Este tempo foi adotado porque deve ser suficiente para que o material se comporte como saturado e permite que possa ser obtido uma umidade superior em outro corpo de prova confeccionado com umidade inicial mais elevada.

Em ambos os casos os procedimentos descritos se repetiram para diferentes volumes de solução misturados a uma quantidade fixa de caulim, a fim de realizar ensaios com diferentes porosidades. Por esse motivo, quando a solução foi preparada, foi feita uma quantidade superior ao necessário para que outros corpos de prova pudessem ser feitos. Usar a mesma solução para confeccionar diversos corpos de prova foi de fundamental importância para o cálculo do fator de formação, para que não houvesse variação de condutividade entre as soluções usadas. A solução foi armazenada na câmara úmida com um saco plástico e tampa, reduzindo assim a possibilidade de alterar a concentração da solução.



Figura 3.17- Batedeira industrial utilizada para homogeneizar os corpos de prova de caulim

3.5- Densidade real dos grãos

A densidade real dos grãos foi determinada segundo a norma da ABNT para todos os solos ensaiados. Os valores encontrados podem ser vistos na Tabela 3.7. Para cada densidade determinada foram realizados três ensaios e foi adotada a média aritmética entre os valores considerados satisfatórios. A rotina de cálculo encontra-se no Anexo 1, no qual o Anexo 1.1 refere-se à areia de São Francisco, o Anexo 1.2 à areia de Itaipuaçu, o Anexo 1.3 à mistura de areia de São Francisco com a de Itaipuaçu, o Anexo 1.4 à mistura da areia de São Francisco com conchas e o Anexo 1.5 ao caulim.

Para determinar a densidade real dos grãos da areia misturada com conchas, foi recolhida uma amostra considerada representativa em quantidade suficiente para realizar 3 ensaios. Com esse material dentro de um saco plástico, foi feita a quebra das conchas com um soquete, de maneira semelhante ao processo de destorroamento. O material composto por fragmentos de conchas e areia foi então homogeneizado e separado em três picnômetros.

A Tabela 3.7 apresenta um resumo das densidades obtidas para cada tipo de material.

Tabela 3.7- Resumo das densidades reais dos grãos obtidos para os materiais ensaiados no laboratório

AREIAS				ARGILAS
São Francisco	Itaipuaçu	São Francisco com Itaipuaçu	São Francisco com cochas	caulim
2,636	2,656	2,651	2,695	2,755

Capítulo 4

Ensaaios realizados no laboratório

4.1- Introdução

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os ensaios realizados em laboratório. Os ensaios foram desenvolvidos de modo a associar a condutividade elétrica medida com o cone resistivo às propriedades do solo tais como a granulometria, o índice de vazios e a condutividade do líquido presente.

4.2- Calibração

A calibração foi o primeiro passo dado para trabalhar com o cone resistivo. Além de comparar uma grandeza medida, uma leitura de voltagem, a uma propriedade conhecida, que é a condutividade de uma determinada solução, a calibração passa ao operador uma noção geral de utilização do equipamento.

A calibração do cone resistivo foi efetivada através de um condutivímetro. Este equipamento é muito utilizado para análises químicas de soluções, mostrado na Figura 4.1a. As placas do eletrodo, mostradas na Figura 4.1b, são constituídas de platina negra e têm uma forma geométrica projetada para gerar um campo elétrico entre elas. O campo elétrico gerado pelo cone resistivo é diferente, mas, por hipótese, a condutividade medida em um líquido com qualquer um dos dois equipamentos é igual. Por isso a calibração do cone resistivo ocorreu submergindo-o em um balde e realizando medições tanto com o condutivímetro, cuja unidade é o Simens por unidade de comprimento (S/cm), como com o cone resistivo, com unidade de Voltagem (V).

Quando o cone resistivo realiza medições em um meio aquoso desenvolvem-se linhas equipotenciais e de corrente, como discutido no Item 2.1.2.3. Por esse motivo foi necessário que a calibração, bem como os ensaios, fossem realizados em um recipiente com dimensões apropriadas para não deformar a rede de fluxo elétrica.

A calibração do cone resistivo foi realizada adicionando-se um composto iônico à água. Isso faz com que os íons se separem com cargas elétricas opostas (dissociação). Os íons presentes na solução foram, portanto, responsáveis pela condução elétrica ao

entrarem em movimento ordenado motivado pela diferença de potencial entre os eletrodos. Para maiores concentrações do composto iônico presentes na solução, mais facilmente ocorreu a condução elétrica, ou seja, maior a condutividade.



Figura 4.1a- Condutivímetro utilizado na etapa de calibração e para medição de condutividade dos fluidos; a) vista frontal e b) detalhe das placas do eletrodo.

O procedimento adotado teve início medindo-se a condutividade da água destilada. Sabe-se que a condutividade elétrica deste fluido é muito baixa, mas diferente de zero. Passou-se a adicionar pequenas quantidades de sal à água e manter a solução em agitação manual com um objeto apropriado para homogeneizar a solução.

O tempo de agitação variou, pois a quantidade de sal adicionada variou. Pequenas variações de concentração implicam em variações de condutividade mais expressivas em meios pouco condutivos do que em meios muito condutivos. Todas as leituras foram realizadas com a solução sem movimento, a fim de evitar a influência da movimentação de íons devido à advecção.

Para que fossem realizados ensaios medindo a condutividade com o cone resistivo, fez-se necessário escolher um recipiente que contivesse menor volume possível, a fim de trabalhar com menores corpos de prova, mas que ao mesmo tempo não deformasse a rede de fluxo elétrica. Por esse motivo a calibração foi realizada em baldes de diferentes tamanhos. Nenhum deles possuía forma cilíndrica, todos tendiam um pouco à forma de tronco de cone, que foi considerado de pouca relevância. Os baldes utilizados podem ser vistos na Figura 4.2.



Figura 4.2- Baldes utilizados na fase de calibração, sendo que a do meio foi utilizada para a execução dos ensaios.

Para não deformar a configuração da rede de fluxo elétrica gerada pelo cone resistivo, o ponto da seção transversal do balde que fica na mesma elevação do eletrodo emissor precisa ter um raio igual à soma do raio do corpo do cone com duas vezes a

distância entre os eletrodos (Weemes, 1990). Em todos os casos esta condição foi garantida, como demonstrado a seguir em relação ao balde utilizado nos ensaios.

Em todos os baldes testados, o cone resistivo foi posicionado com a ponta para baixo distando 2cm do fundo do balde. A Figura 4.3 mostra um modelo esquemático, fora de escala, do cone resistivo inserido no balde com os espaçamentos relativos indicados e a Figura 4.4 mostra o cone resistivo ao lado do balde utilizado na fase de ensaios.

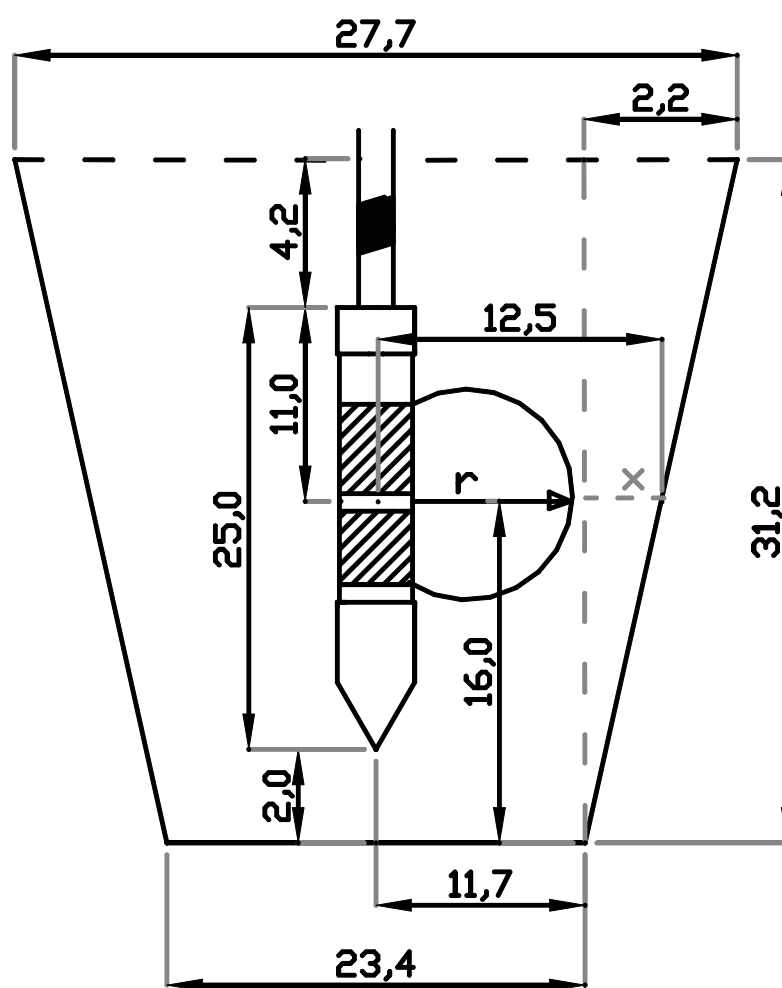


Figura 4.3- Representação esquemática da posição do cone resistivo em relação ao balde. Desenho fora de escala.

Weemes (1990) observou que a distância mínima entre o eletrodo de potencial e a parede do recipiente de ensaio deve ser dado em função da distância entre os eletrodos segundo a Equação 4.1. Esta limitação garante que o recipiente não deforma a rede de fluxo elétrica, portanto, não tem influência na condutividade medida. Por meio das dimensões fornecidas na figura 3.2 determina-se a dimensão mínima entre o centro do eletrodo e a parede do balde.

$$dist_{mi} = \frac{d}{2} + 2 \times dist_{eletrodos} = 5/2 + 2 \times 5 = 12,5cm \quad (4.1)$$

Na Figura 4.3 é possível identificar dois triângulos semelhantes, identificados pelas linhas tracejadas. Como todas as dimensões são conhecidas é possível determinar a dimensão de x , utilizando semelhança de triângulos, por meio da seguinte equação.

$$\frac{31,2}{16} = \frac{2,2}{x} \Rightarrow x = 1,6cm \quad (4.2)$$

somando a dimensão de x com o raio da parte inferior do balde obtêm-se 13,3cm, que é superior aos 12,5cm necessários segundo a limitação relatada por Weemes (1990).



Figura 4.4- Comparação entre o cone resistivo e o balde utilizado nos ensaios.

Foram realizadas medidas em uma ampla faixa de voltagem em cada canal, superiores à de projeto, que é de 0,4V a 4 V. Esta iniciativa foi tomada a fim de observar o comportamento além desta faixa e saber o limite real que apresenta resultados confiáveis. Os resultados estão mostrados na Figura 4.5

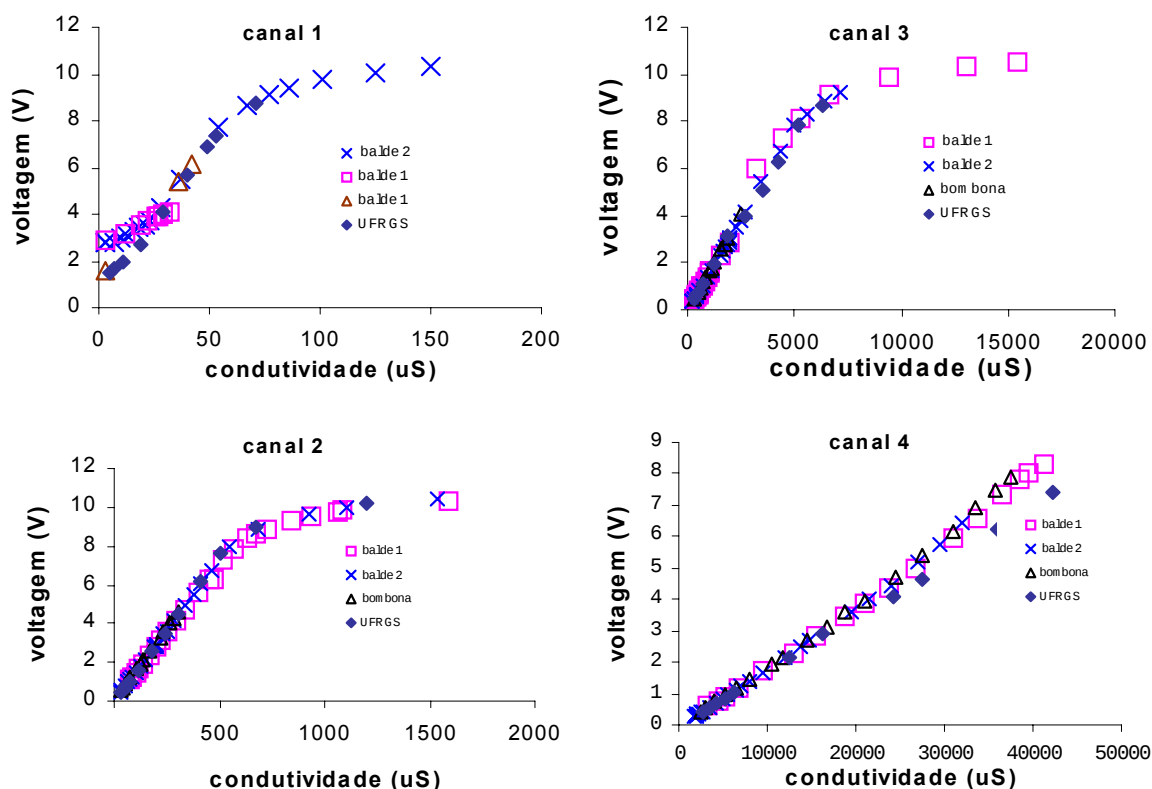


Figura 4.5- Curvas de calibração dos quatro canais, obtidos em diversos recipientes.

Observou-se que o canal 1 apresentou uma variação em toda a faixa de voltagem de projeto. Contudo, a condutividade medida neste canal é demasiadamente pequena, da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} vezes menor que o valor medido durante os ensaios de campo e de laboratório. Por este motivo este canal não recebeu equação de calibração. As equações obtidas para os demais canais estão apresentadas na Tabela 4.1 e a curva de calibração de cada canal, com o respectivo coeficiente de correlação, está apresentada na Figura 4.6.

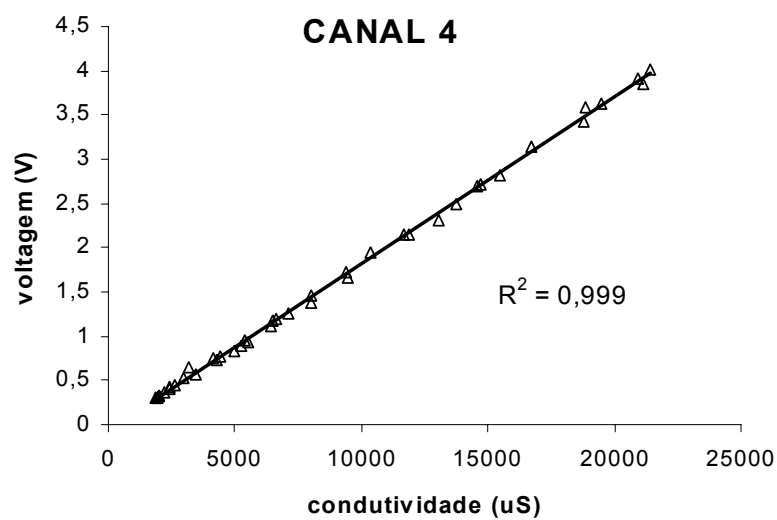
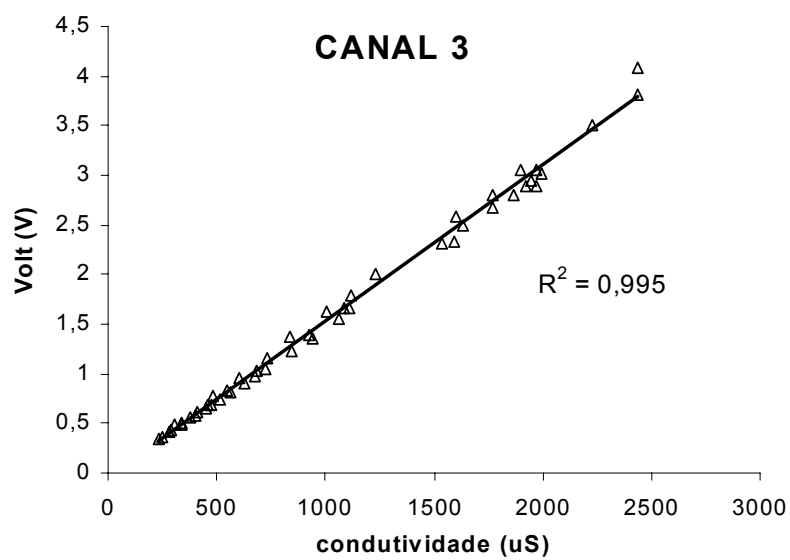
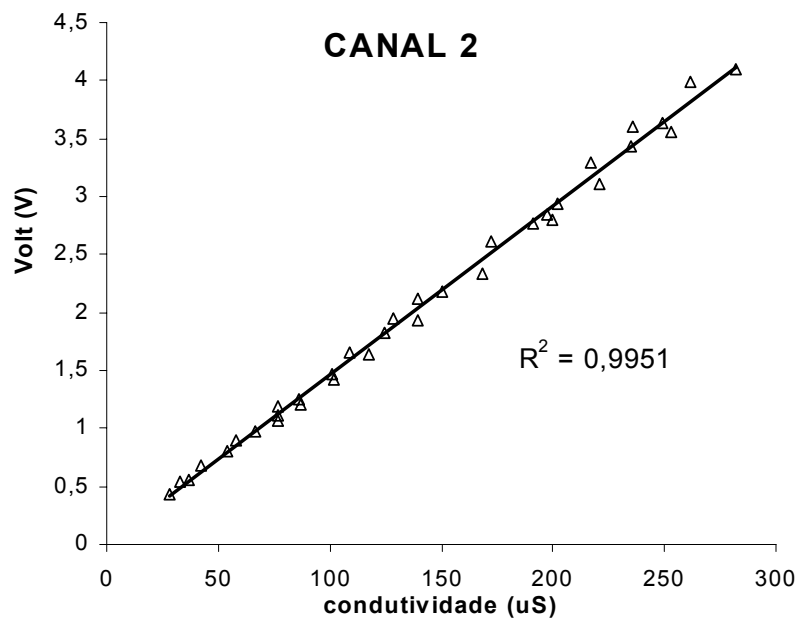


Figura 4.6- Curvas de calibração individualizadas pelos canais e com o coeficiente de correlação calculado por programa de computador.

Tabela 4.1- Equações de calibração obtidas para os canais 2, 3 e 4.

canal	equação $c(\mu\text{S/cm}) = a V + b$
1	sem equação
2	$69V - 0,952$
3	$63V + 25$
4	$5000 V + 311,5$

Como o cone resistivo foi calibrado em diferentes canais para abranger uma ampla faixa de valores de condutividade, é necessário, por consistência, que o valor medido no limite superior de um canal seja próximo do valor medido no limite inferior do canal seguinte. Foi feita uma investigação sobre os limites extremos dos canais 2, 3 e 4, que foram utilizados durante os ensaios de laboratório e de campo. A Tabela 4.2 mostra os valores da condutividade medidos nos extremos dos canais citados, os quais foram calculados pelas equações de calibração, mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.2- Valores calculados nos limites inferior e superior dos canais 2, 3 e 4.

canal	limites ($\mu\text{S/cm}$)	
	inferior	superior
2	26,6	274,9
3	275,0	2525,0
4	2311,5	20311,5

Observou-se que a variação de condutividade medida entre o limite superior do canal 2 e o inferior do canal 3 é irrelevante. O mesmo não ocorre no limite entre os canais 3 e 4. No limite inferior do canal 4 mede-se uma condutividade de 2311,5, isto é 8% menor que o valor calculado no limite superior do canal 3. Apesar de reconhecer que há uma diferença entre as condutividades medidas, ela não chegou a ser determinante sobre os resultados obtidos, nem nos ensaios de laboratório, nem nos de campo.

4.3- Variação de condutividade com a variação de salinidade do meio

Durante a calibração realizou-se uma investigação sobre a variação de condutividade com a variação da salinidade do meio. Dessa maneira foi possível analisar como varia a condutividade em diferentes níveis de concentração. A

condutividade foi medida ao longo da calibração, sendo a salinidade determinada de duas maneiras distintas. Na primeira, a concentração salina foi medida diretamente por meio de um fotômetro, equipamento utilizado no laboratório de química para determinar a concentração de determinados íons, neste caso de K^+ e de Cl^- , e na segunda mediu-se o peso do sal misturado a um determinado volume de água.

O processo químico que ocorre quando um sal, no caso o KCl, é introduzido em água destilada é a ionização. A ligação química do composto ocorre por forças eletrostáticas, por isso se separam num meio aquoso, segundo a Equação 4.1.



Para determinar a concentração do sal a partir da concentração de cada espécie química é necessário verificar a concentração molar de cada íon na solução para que o balanço químico seja obedecido. Pela Equação 4.1 percebe-se que a quantidade de mols de K^+ e de Cl^- é igual.

A concentração molar é calculada dividindo a massa dos íons contido na amostra pelo peso atômico, especificado em tabelas periódicas. A massa de cada íon foi medida por meio do fotômetro, mas essa metodologia apresenta erros que, aliado à presença de impurezas no sal e erros de operação (como na pipetagem por exemplo), resultam em pequenas diferenças entre o número de moles de K^+ e de Cl^- calculado. Como, pela Equação 4.1, o número de moles do sal é igual ao número de moles de cada íon, multiplicou-se a concentração molar média dos íons pela massa molar da solução para determinar a concentração de KCl na solução.

O fotômetro do laboratório da COPPE-UFRJ não ficou disponível ao longo de toda a pesquisa. Por esse motivo a determinação da concentração também ocorreu de outra maneira, dividindo o peso de KCl colocado em um volume de água conhecido. Esta razão não resulta em valores coincidentes com a curva de valores medidos devido à impureza do KCl utilizado. Por este motivo, foi utilizado o artifício de multiplicar a razão medida por um fator constante de modo a aproximar as duas curvas. O fator utilizado para fazer a curva de condutividade contra a concentração salina foi de 0,9 e apresentou a mesma tendência dos dados medidos pelo fotômetro.

Pode-se observar na Figura 4.7 que a variação de condutividade em função da concentração do meio somente é linear em pequenos intervalos de variação de salinidade. Para baixas concentrações a curva apresenta uma tangente menos inclinada do que para concentrações mais elevadas, conforme discutido por Weemes (1990).

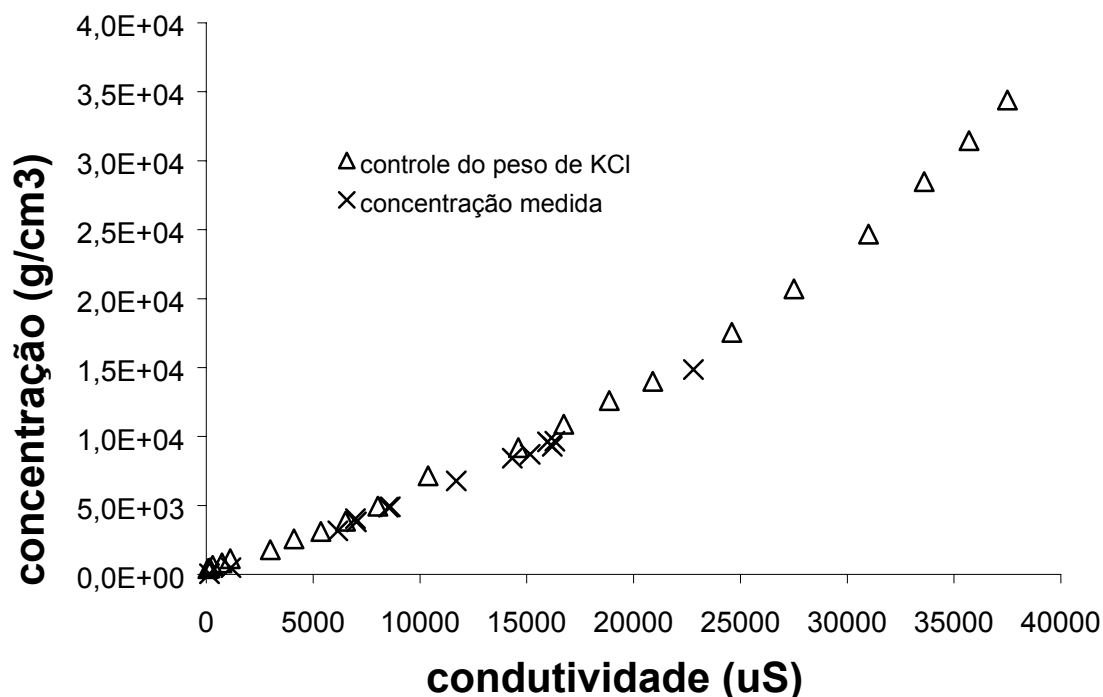


Figura 4.7- Variação da condutividade da solução em função da concentração salina do meio.

4.4- Ensaios realizados em laboratório

Neste item serão descritos os procedimentos referentes aos ensaios realizados com os materiais descritos no Capítulo 3.

4.4.1- Ensaios realizados em areia

Os ensaios realizados com areia foram desenvolvidos admitindo, por hipótese, que os materiais sejam eletricamente inertes, portanto toda a condução elétrica medida foi atribuída à condução eletrolítica decorrente da ionização do sal. Uma característica da areia que foi explorada foi a elevada condutividade hidráulica. Estando os coeficientes de permeabilidade das areias, em geral, dentro da faixa de 10^{-3} cm/s a 10^{-1} cm/s (Vargas, 1977) foi possível percolar uma solução por um corpo de prova. Com o cone resistivo mediu-se a condutividade elétrica do solo e por meio de um condutímetro foi possível medir a condutividade dos fluidos percolantes.

Como foi discutido no Item 2.1.2.3 desta dissertação, os ensaios foram realizados em um recipiente que não atrapalhasse a configuração da rede de fluxo elétrico gerado pelo cone resistivo. Foi escolhido utilizar um balde plástico, amplamente comercializado, tendo em vista a facilidade de adaptar este recipiente às necessidades do ensaio.

Os ensaios com areia consistiram da aplicação de uma carga hidráulica, de soluções com diferentes concentrações salinas, a um corpo de prova e medindo-se a condutividade elétrica integral do solo por meio do cone resistivo. Foi necessário, portanto, suspender o reservatório que continha a solução a percolar no solo como mostra a Figura 4.8. Nessas condições todos os mecanismos de transporte de contaminantes ocorrem simultaneamente (advecção, difusão e dispersão hidrodinâmica), então o comportamento da condutividade elétrica medida ao longo do ensaio foi função de variáveis como o gradiente hidráulico e de concentração aplicados e o índice de vazios. Devido à metodologia empregada o gradiente hidráulico não se manteve constante, entretanto procurou-se deixá-lo aproximadamente igual a 2.

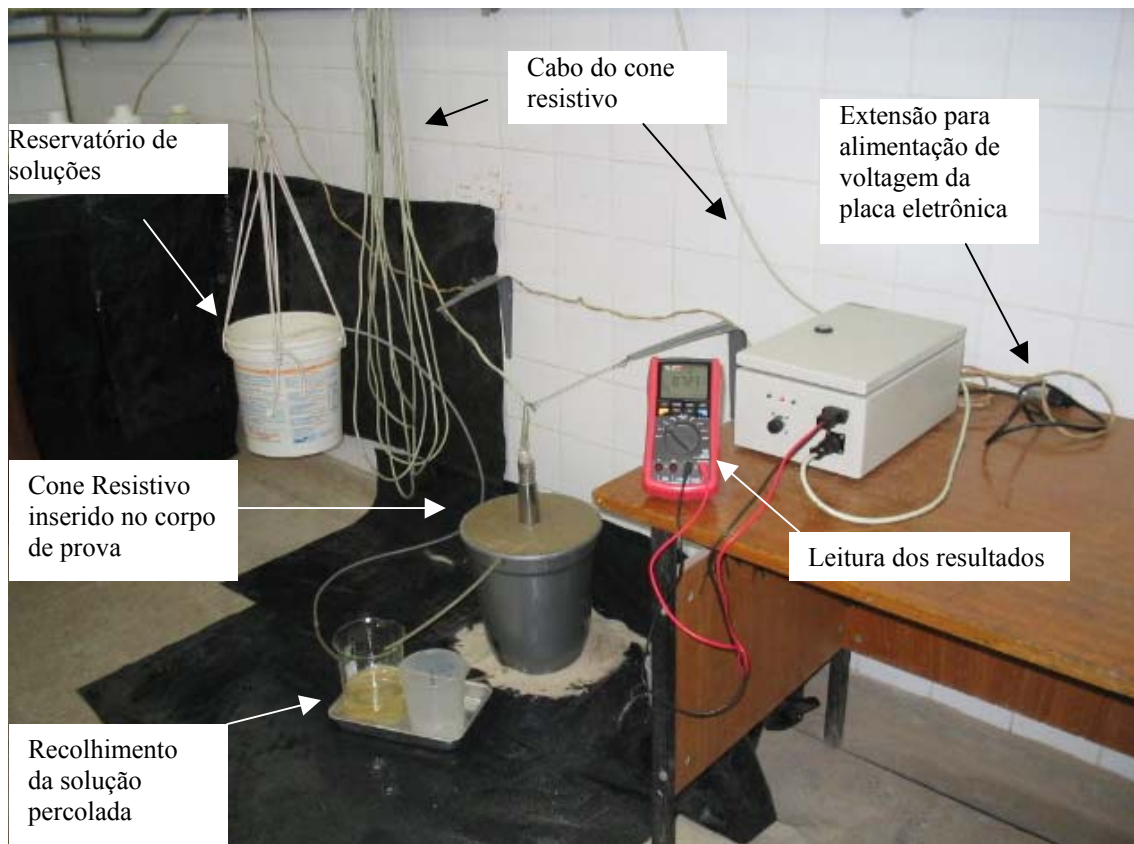


Figura 4.8- Aparato montado para a execução de ensaios com as areias.

Para que a percolação da solução pudesse ocorrer foi necessário fazer algumas modificações no balde com o objetivo de controlar a entrada e a saída das soluções. Optou-se pelo avanço do fluido de baixo para cima, dentro do corpo de prova, pois isso facilita a eliminação do ar presente no solo, apesar de não garantir a saturação. Foram realizadas algumas modificações no balde utilizado que podem ser vistos na Figura 4.9. A entrada de água foi realizada fazendo um furo na lateral inferior do balde utilizando uma furadeira. A vedação do orifício foi garantida por meio de cola de silicone e um tubo garante a alimentação do sistema. Para que a percolação não ocorresse a partir de um único ponto, o de entrada no balde, o tubo de alimentação se estendeu para dentro do balde fazendo um círculo no fundo do balde. Furos com um objeto pontiagudo foram feitos no tubo de modo que a solução pudesse sair do tubo em diferentes pontos. Esta iniciativa foi tomada para que a frente de avanço da solução pudesse ser a mais uniforme possível. Para que não houvesse entupimento destes furos foi utilizado um pedaço de Geotêxtil não tecido com dimensões iguais às do fundo do balde, que ficou posicionado entre o tubo e o solo.

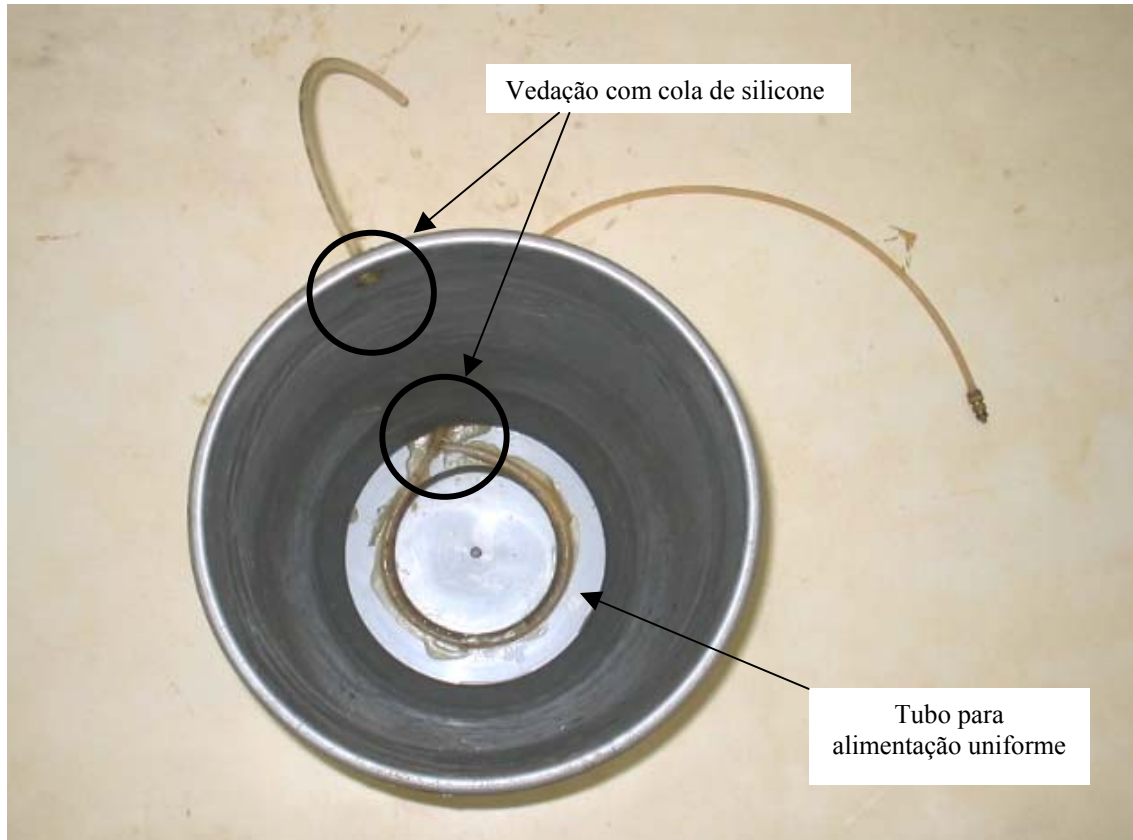


Figura 4.9- balde, com as modificações, no qual foram realizados os ensaios.

A saída do fluido precisou ser controlada a fim de medir o volume percolado e coletar amostras para as análises. Para tal foi feito um furo na lateral superior do balde com uma furadeira e por meio de um tubo o fluido, que percola o corpo de prova, era recolhido em uma proveta graduada, pela qual o volume foi medido.

Os corpos de prova dos ensaios com areia foram obtidos por meio de pluviação utilizando o mesmo material e procedimentos descritos no Item 3.5.2 desta dissertação. Tendo em vista a dificuldade de secar e pesar todo o material que constitui o corpo de prova considerou-se, por hipótese, que o índice de vazios de cada corpo de prova estivesse associado à abertura do funil utilizado na pluviação e determinados por uma bateria de ensaios. Os índices de vazios definidos encontram-se nas Tabela 3.2 a 3.5 desta dissertação.

Observou-se que mesmo que a saída de água não ficasse no ponto mais elevado do recipiente, toda a areia ficou submersa, como mostra a Figura 4.10. Isso se explica pela capilaridade e pelo gradiente hidráulico que ocorre transversalmente ao balde tendo em vista que o extravasamento do recipiente ocorre em apenas um ponto. Neste ponto houve carreamento de algumas partículas, o que não se considerou relevante para as medições de condutividade elétrica, pois ocorre num ponto muito distante do eletrodo gerador de sinal, portanto, sem afetar a rede de fluxo elétrica. A experiência de proteger a saída com um geotêxtil mostrou-se insuficiente pois se não estiver saturado dificulta a passagem do fluido, o que faz com que o extravasamento ocorra pela extremidade do balde, portanto, sem controle. A saturação prévia do geotêxtil seria inviável, tendo em vista que o posicionamento do geotêxtil sobre o orifício de saída ocorre antes do chuveiramento. O tempo entre o preparo do corpo de prova e a execução do ensaio iria levar à perda de água do geotêxtil, formando bolhas de ar e dificultando a passagem de água.

Nos ensaios realizados com areias as soluções utilizadas foram produzidas em laboratório com água destilada e KCl, por se tratar de um produto de fácil disponibilidade e utilizado na etapa de calibração do equipamento. O controle da concentração salina foi realizado com coletas de amostras do reservatório da solução, para análises químicas e para medição de condutividade.

A operação do ensaio inicia-se após a pluviação realizada com o cone resistivo na posição utilizada no ensaio. Para manter-se na posição antes de contar com a sustentação proveniente do confinamento da areia, o cone resistivo ficou suspenso por duas mãos francesas separadas a 60cm entre si (ver Figura 4.8). Um fio de aço, cujas extremidades foram fixas às mãos francesas, sustentou o cone durante a pluviação. Devido às dimensões do fio ($\phi = 15\text{mm}$) considerou-se que a sua relevância fosse muito pequena, portanto, validando ainda a hipótese de estar trabalhando com um índice de vazios conhecido.



Figura 4.10- Balde utilizado no ensaio com areia submersa. No ponto de saída há perda de material, mas que ocorre em proporções pequenas e longe dos eletrodos do cone resistivo.

A primeira etapa da bateria de ensaios com areia ocorreu promovendo a percolação de água destilada e depois da solução, que foi feita com água destilada mais KCl. O objetivo de percolar água destilada foi eliminar ao máximo íons que tivessem ficado aderidos aos grãos da areia durante a secagem ao ar. Enquanto ocorria a percolação de água acompanhou-se a medição da condutividade integral até encontrar

um valor estável de condutividade elétrica, observada com aproximadamente 1,2 volumes de vazios percolados, mas em todos os casos foram percolados pelo menos 1,5. O ensaio seguiu trocando a água destilada presente no reservatório e nas vias de conexão com o corpo de prova, pela solução preparada com KCl. A medição da condutividade elétrica ocorreu até que fosse determinado um valor estável no corpo de prova. Dessa maneira, cada ensaio era composto por um determinado numero de estágios, sendo igual ao número de amostras coletadas do reservatório.

4.4.2- Ensaio realizados em Argila

O procedimento adotado para o preparo dos corpos de prova de argila (caulim), foi descrito no Capítulo 3. Basicamente este ensaio consiste da medição da condutividade utilizando o cone resistivo, inserido no material produzido no laboratório. A Figura 4.11 mostra o cone resistivo inserido no balde com o caulim em adensamento.

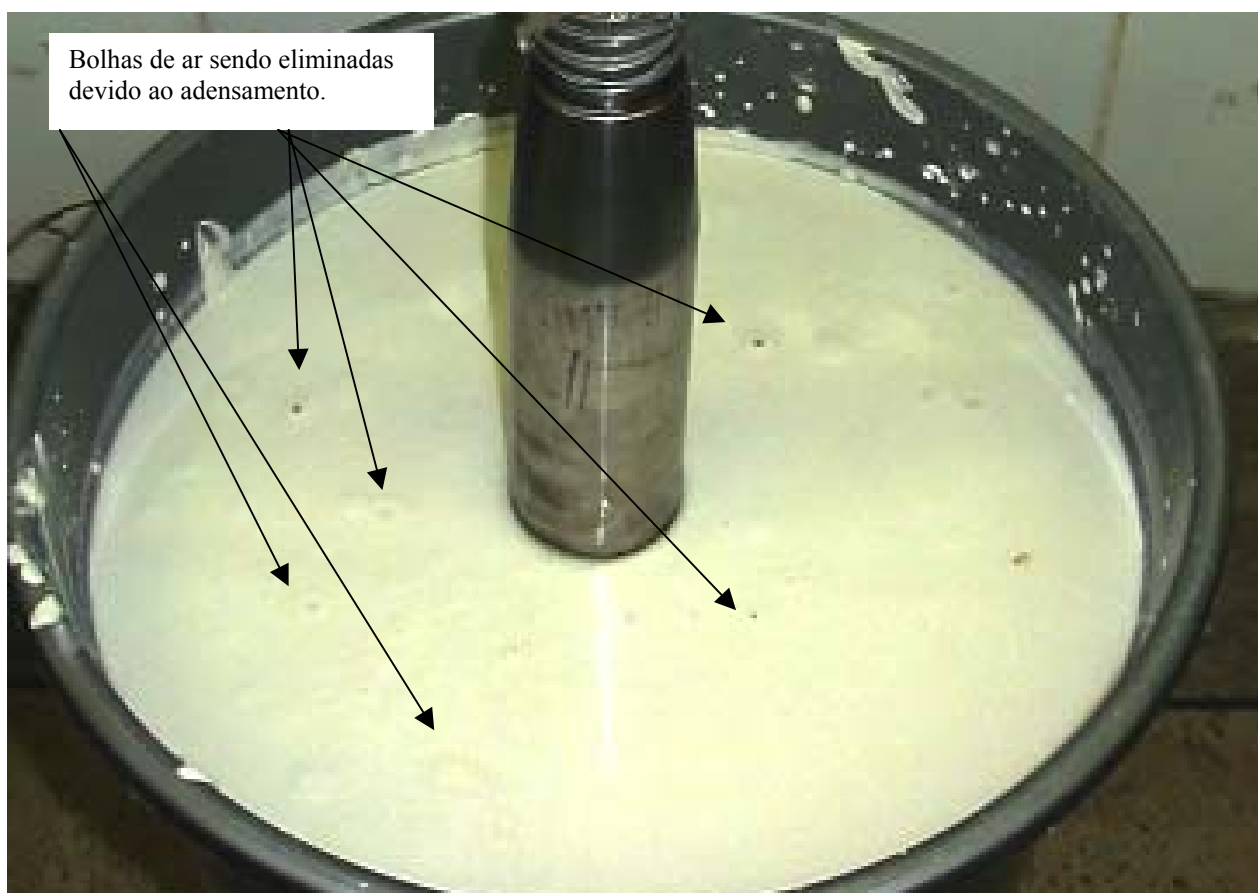


Figura 4.11- Cone resistivo no caulim em processo de sedimentação. Nesta Fotografia pode-se observar bolhas de ar sendo eliminadas.

O peso específico foi medido preenchendo uma proveta graduada com o material preparado. Os resultados deste procedimento mostraram-se satisfatórios somente para o material recém misturado, que é homogêneo. Entretanto esta metodologia não se mostrou adequada para medir o peso específico do material em adensamento, tendo em vista a heterogeneidade das amostras. Por esse motivo o índice de vazios foi calculado medindo-se a umidade do caulim próximo ao eletrodo e admitindo que o material estivesse saturado, usando-se a Equação 4.2. O peso específico foi então determinado pela Equação 4.3.

$$S\% \times e = w\% \times G_s \quad (4.2)$$

$$\frac{G_s \times g}{\gamma_s} - 1 = e \therefore \gamma_s = \frac{G_s \times g}{e + 1} \quad (4.3)$$

A primeira bateria de ensaios com caulim foi realizada somente com a mistura do caulim, sem permitir que o adensamento avançasse. Assim que o caulim foi introduzido no balde o cone resistivo foi posicionado, realizou-se a leitura referente a um grau de saturação um pouco inferior a 100%, da ordem de 93% devido ao método de preparo dos corpos de prova. Este procedimento se repetiu para uma mistura contendo uma quantidade fixa de caulim e aumentando a quantidade de solução de KCl ($3723\text{mg}/\text{cm}^3$), aumentando portanto a porosidade, mas mantendo o grau de saturação aproximadamente constante devido à metodologia de preparo dos corpos de prova.

A segunda e a terceira bateria de ensaios foram realizadas com as concentrações de $7943\text{mg}/\text{cm}^3$ e $13521\text{mg}/\text{cm}^3$, respectivamente, e ocorreram seguindo o mesmo procedimento descrito na primeira bateria de ensaios. Entretanto, entre o preparo de um corpo de prova e outro, permitiu-se que o material entrasse em adensamento por 20hs. Adotou-se este tempo porque desejava-se realizar a medição de condutividade em diferentes porosidades e por isso não permitiu-se que as partículas adensassem completamente. Além disso nenhum tipo específico de solo estava sendo reproduzido, e por isso não houve a necessidade de permitir o avanço do adensamento, como é o caso de diversos solos moles na natureza. Ao final das 20hs o material era reaproveitado e

colocado na batedeira para nova mistura, com mais solução a fim de obter um corpo de prova com maior umidade. Após a nova mistura o caulim era introduzido outra vez no balde para realizar a medição de condutividade.

Foram realizadas ainda medições de condutividade integral em diferentes instantes do adensamento em dois ensaios da segunda bateria e em um da terceira, ao longo das 20hs do ensaio. Esta investigação foi realizada para observar o comportamento da condutividade devido ao fenômeno do adensamento que, além de reduzir o índice de vazios, também resulta na eliminação, pelo menos parcial, de bolhas de ar.

4.5- Nomenclatura dos ensaios realizados

Ao longo desta pesquisa diversos solos foram ensaiados e para que cada ensaio pudesse ser facilmente identificado e associado ao tipo de solo e estado de compactação, foi definido um padrão de nomenclatura. O nome dado a cada ensaio inicia-se com duas letras que designam o tipo de material ensaiado. “Ar” refere-se às areias e “Ca” ao caulim. Após a identificação do tipo de material existem dois números que obedecem ao padrão descrito a seguir.

Como ocorreram ensaios com mais de um tipo de areia, a diferenciação foi feita com números. A areia com o primeiro número igual a 1 se refere à de São Francisco, a 2 à de Itaipuaçu, a 3 à mistura das areias 1 e 2 e a número 4 refere-se à mistura da areia de São Francisco com conchas. O último número da identificação refere-se ao índice de vazios de cada material. O número 1 refere-se ao estado mais fofo e os números subsequentes referem-se a índices de vazios inferiores. No caso das areias ensaiadas, o menor estado de compactação foi obtido pela pluviação com o funil de diâmetro 50mm, portanto, todos os corpos de prova feitos com este funil receberam o número 1 no final da nomenclatura. É importante ressaltar que o funil de diâmetro 18mm apresentou resultados muito próximos ao de diâmetro 21mm e por isso não foi utilizado nos ensaios com a areia de Itaipuaçu nem na areia misturada. Em relação à areia de São Francisco misturada com conchas, o ensaio só foi realizado em um índice de vazios, o obtido com o funil de diâmetro 50mm para que a presença das conchas não interferisse na homogeneidade dos corpos de prova e por isso recebeu o último número igual a 1.

Está mostrado abaixo um exemplo da nomenclatura utilizada para as areias.

Ar-2-4

Este código corresponde ao ensaio realizado com areia (Ar), de Itaipuaçu (2), no maior estado de compactidade. O índice de vazios de cada ensaio deve ser verificado nas Tabelas 3.2 a 3.5 que mostram os índices de vazios obtidos para cada funil.

Como só foi ensaiado um tipo de material fino, o caulim, não foi necessário especificar a origem deste material, mas em cada bateria de ensaios foi utilizada uma concentração salina na solução. Cada corpo de prova ensaiado na menor concentração recebeu o número um (1), os na concentração média receberam o número dois (2) e os ensaiados na maior concentração receberam o número três (3). O segundo número utilizado nesta nomenclatura refere-se à porosidade. Para uma mesma concentração da solução o aumento do segundo número implica numa maior porosidade obtida por variação da umidade. Está apresentado abaixo um exemplo da nomenclatura utilizada para o caulim.

Ca-3-1

Este ensaio refere-se a um ensaio utilizando o caulim, na maior concentração de solução utilizada, na menor porosidade.

A Tabela 4.3 associa o nome de cada ensaio realizado com areia ao material utilizado e às respectivas propriedades. A Tabela 4.4 associa o nome a cada ensaio realizado com caulim às respectivas propriedades, é importante ressaltar que os ensaios, nesta tabela, identificados com um (*) referem-se ao material sedimentado após 20hs.

Tabela 4.3- Identificação de propriedades de cada ensaio realizado com areia.

nome	origem	funil (mm)	e	n	γ_s
Ar -1-1	São Francisco	50	0,743	0,426	14,93
Ar -1-1b					
Ar -1-2		21	0,605	0,377	16,21
Ar -1-3		18	0,578		16,49
Ar -1-4		6,5	0,51	0,338	17,21
Ar -1-4b					
Ar-2-1	Itaipuaçu	50	0,500	0,333	17,28
Ar-2-2		21	0,414		18,42
Ar-2-4		6,5	0,393		18,69
Ar-3-1	mistura, São Francisco e Itaipuaçu	50	0,517	0,341	17,16
Ar-3-2		21	0,41		18,46
Ar-3-4		6,5	0,397		18,88
Ar-4-1	São Francisco com conchas	50	0,543	0,352	17,06

Tabela 4.4- Identificação de propriedades de cada ensaio realizado com argila.

nome	s fluido (uS/cm)	w (%)	e	n	S (%)	γ_s
Ca-1-1	6450	66,4	1,78	0,64	99,3	9,37
Ca-1-2		55,3	1,56	0,61	92,2	10,03
Ca-1-3		49,3	1,38	0,58	96,5	11,03
Ca-2-1	13547	78,8	2,23	0,69	94,1	8,07
Ca-2-1*		58,5	1,56	0,61	100,0	14,03
Ca-2-2		56,5	1,63	0,62	93,0	9,95
Ca-2-2*		50,2	1,33	0,57	100,0	15,37

Capítulo 5

Resultados e análise dos resultados dos ensaios realizados no laboratório

5.1- Introdução

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados obtidos nos ensaios descritos no Capítulo 4. As figuras aqui mostradas foram obtidas por meio de planilhas eletrônicas, desenvolvidas para calcular a resistividade medida utilizando as equações de calibração também mostradas no capítulo anterior.

5.2- Resultados dos ensaios com areias

5.2.1- Condutividade integral versus volume de vazios

A condutividade integral medida dentro da areia passou a ganhar destaque nesta pesquisa com os ensaios de percolação de soluções. O volume percolado foi expresso em termos de volume de vazios, calculado para cada porosidade de cada solo ensaiado. A Figura 5.1 exemplifica o comportamento da condutividade integral observada nos ensaios realizados com as areias. Esta figura é referente ao ensaio “Ar-1-2”, ou seja a Areia de São Francisco ensaiada com o índice de vazios obtido usando o funil de diâmetro 21mm. Pode-se observar que existem patamares de valores de condutividade integral medida ao longo do ensaio. Quando este patamar é atingido, não se pode garantir que todo o recipiente está ocupado pela solução do reservatório, mas a região atingida pelo campo elétrico, sim. Os patamares de condutividade integral foram atingidos após percolar aproximadamente 1,2 volume de vazios de cada solução, que variou de acordo com o índice de vazios e carga hidráulica aplicada.

A posição de cada patamar em relação ao anterior depende da relação entre as soluções utilizadas. A utilização de uma solução mais condutiva eleva o patamar, como pode ser observado na Figura 5.1 entre os estágios 1 e 2; 2 e 3; 3 e 4; e 6 e 7. A utilização de uma solução menos condutiva reduz o patamar, como pode ser observado na mesma figura entre os estágios 4 e 5; e 5 e 6. Nesta figura está indicada, também, a condutividade utilizada em cada estágio, medida por amostragem do reservatório. As demais figuras obtidas para cada porosidade referente a cada tipo de areia estão apresentadas no anexo 3.

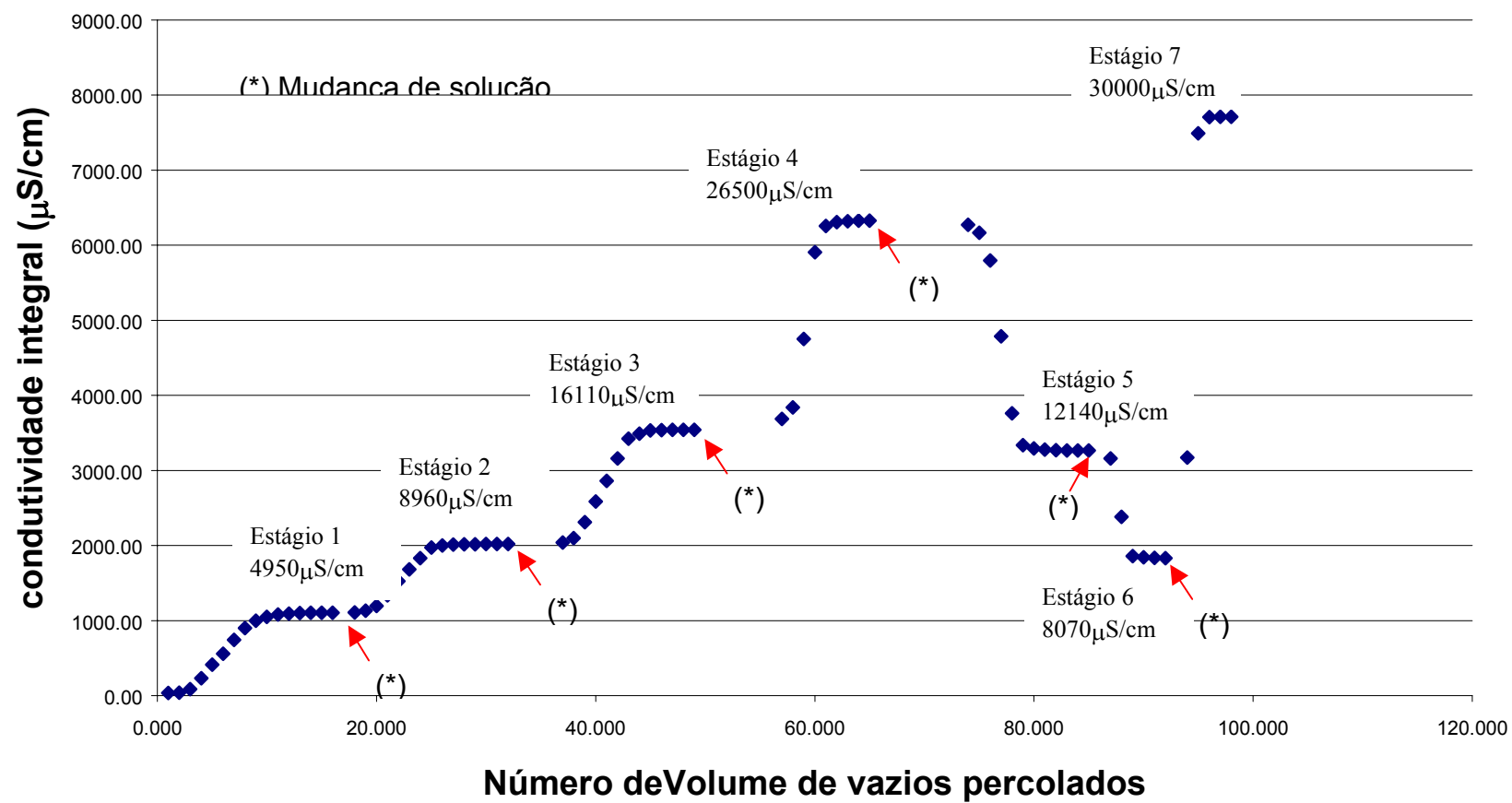


Figura 5.1- Variação da condutividade integral em relação ao volume de vazios percolado no ensaio utilizando a areia da São Francisco com índice de vazios de 0,605.

A influência da difusão faz com que íons da solução do reservatório se antecipem à frente de avanço, no caso da concentração do reservatório ser superior à presente na areia. Ao entrarem na região da rede de fluxo elétrica, os íons presentes na solução passam a colaborar com a condutividade medida. Por esse motivo não há uma variação brusca entre os patamares, o que ocorreria se o único fenômeno de transporte atuando fosse a advecção.

5.2.2- Fator de formação em função da porosidade

Todas as amostras retiradas do reservatório foram analisadas em relação à condutividade. Os resultados foram então comparados com os de resistividade integral medida com o cone resistivo. A razão entre a condutividade do fluido e a integral do solo é definida como o fator de formação (Weemes et al., 1990; Jackson et al., 1978), uma propriedade de um determinado tipo de solo que varia com o índice de vazios. Por esse motivo, a relação entre a condutividade do fluido e a integral é uma reta que passa na origem. O fator de formação (FF) foi calculado como a tangente do ângulo de inclinação da reta que relaciona a condutividade do fluido e a integral, forçando-a a passar pela origem, porque por hipótese a condutividade integral tem que se nula quando a do fluido for igual a zero. Nos casos em que houve mais de um ensaio realizado no mesmo índice de vazios, o fator de formação foi determinado utilizando todos os dados experimentais medidos, no mesmo índice de vazios. A Figura 5.2 mostra a relação entre a condutividade do fluido e a integral medida no ensaio com a areia de São Francisco no índice de vazios obtido com o funil de 50mm de diâmetro. Um resumo dos resultados dos fatores de formação obtidos pode ser visto nas Tabelas 5.1 a 5.4.

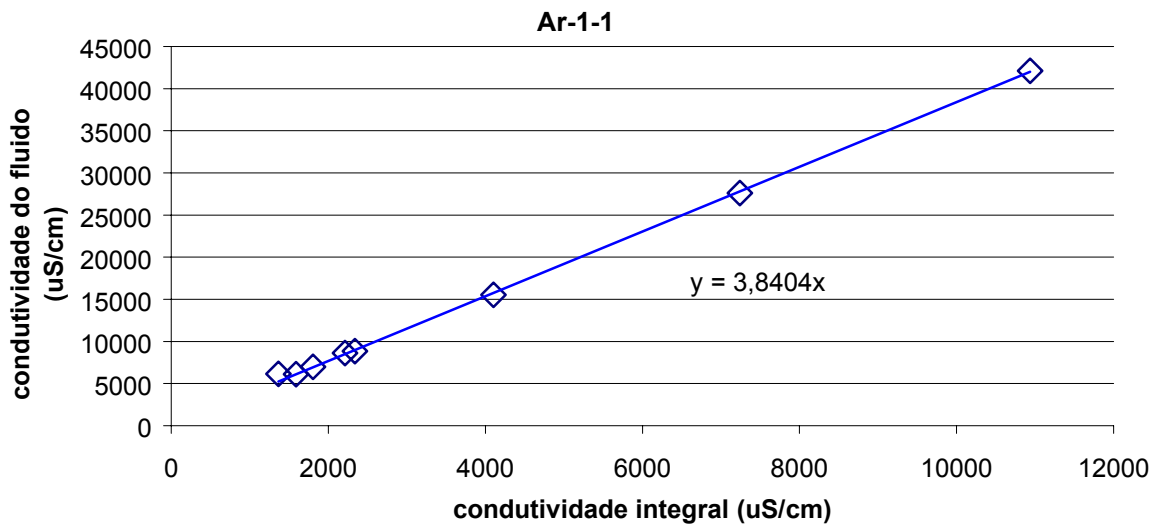


Figura 5.2- Relação entre a condutividade integral e a do fluido para a areia de São Francisco na porosidade de 0,416.

Tabela 5.1- Fatores de Formação obtidos para a areia de São Francisco.

ϕ	porosidade	FF
50	0,427	3,84
21	0,378	3,97
18	0,367	4,21
6,5	0,339	4,56

Tabela 5.2- Fatores de Formação obtidos para a areia de Itaipuaçu.

ϕ	porosidade	FF
50	0,342	3,47
21	0,299	4,61
6,5	0,289	4,66

Tabela 5.3- Fatores de Formação obtidos para a mistura da areia de São Francisco com a de Itaipuaçu.

ϕ	porosidade	FF
50	0,346	4,51
21	0,296	5,75
6,5	0,280	5,78

Tabela 5.4- Fatores de Formação obtidos para a mistura da areia de São Francisco com conchas.

ϕ	porosidade	FF
50	0,367	4,85

Verificou-se que o fator de formação em cada tipo de solo varia com a porosidade e tende a obedecer à fórmula de Archie como mostra a Figura 5.9. O coeficiente “m” foi obtido analisando o melhor ajuste dos pontos experimentais à função. Em escala bilogarítmica a fórmula de Archie assume a forma de uma reta que passa pelo ponto (1,1). Isso significa que quando a porosidade for igual a 1, não existem grãos sólidos, então a condutividade integral é igual à condutividade do fluido.

A Tabela 5.5 compara os valores do parâmetro m da fórmula de Archie ($F.F. = n^{-m}$) obtido por diversos autores aos valores obtidos na presente pesquisa.

Tabela 5.5- Comparação entre o parâmetro m da fórmula de Archie obtidos na presente pesquisa com valores obtidos por outros autores.

Autor	Descrição do material	m
Jackson	Esferas de vidro	1,2
	Quartzo arredondado	1,4
	Quartzo anguloso	1,52
	Areia quartzosa com 25% de conchas	1,58
Presente pesquisa	Quartzo arredondado (Itaipuaçu)	1,19
	Quartzo anguloso (São Francisco)	1,46
	Mistura de São Francisco com Itaipuaçu	1,39
	Mistura de São Francisco com conchas	1,53

A porosidade das areias ensaiadas em laboratório não abrange uma faixa muito extensa, além de cada tipo de areia de ter sido ensaiado em poucas porosidades. Por isso na Figura 5.9 o parâmetro que determina a fórmula de Archie foi determinado com uma correlação não muito boa. Pode-se perceber, contudo, que há consistência entre os valores de m obtidos na presente pesquisa e resultados obtidos por outros autores. A diferença entre os parâmetros m confirma que a forma dos grãos é extremamente relevante na relação entre a porosidade do solo e o fator de formação.

No plano que representa no eixo das ordenadas uma unidade de condutividade, e nas abscissas a condutividade do fluido, o gráfico da condutividade do fluido contra ele mesmo é necessariamente uma reta inclinada a 45°, se as escalas horizontal e vertical forem iguais, como mostra a Figura 5.3. A reta que representa a condutividade integral tem coeficiente angular igual ao inverso do fator de formação e passa pela origem. A região contida entre estas duas retas indica que existe uma região deste plano, a hachurada, que corresponde a uma perda de condutividade devido à presença dos grãos.

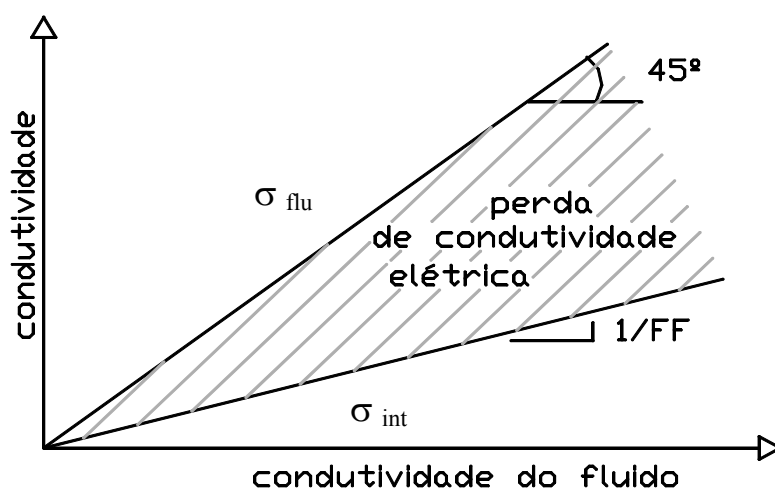


Figura 5.3- Região que corresponde à perda de condutividade elétrica no plano da condutividade contra a condutividade do fluido.

Admitindo que a condutividade elétrica seja proporcional à área disponível para a passagem de carga, a introdução de um sistema particulado leva a uma redução, em percentual, de área igual à porosidade. Por esse motivo a reta que representa a condutividade elétrica integral admitindo exclusivamente perda devido à redução de área (C_{int}^*), portanto sem influência da tortuosidade, é dada pela equação 5.1.

$$\sigma_{int}^* = n \times \sigma_{flu} \quad (5.1)$$

Esta reta localiza-se entre as linhas definidas pela condutividade integral e a do fluido mostradas na Figura 5.3. Isso significa que existe ainda uma parcela de perda de condutividade devido a outra propriedade do solo. Um exemplo em relação à areia de São

Francisco está mostrado na Figura 5.4. Nesta figura a região compreendida entre a reta de condutividade do fluido (σ_{flu}) e a de condutividade devido à redução de área (σ^*_{int}) está associada à redução de área disponível para a passagem de íons, dada pela porosidade do meio. A região entre a reta que representa a condutividade devido à redução de área e a reta de condutividade integral está associada ao aumento das linhas de corrente. Portanto, a redução de condutividade devido à presença dos grãos deve-se a dois fatores: a redução de área e o aumento das linhas de corrente.

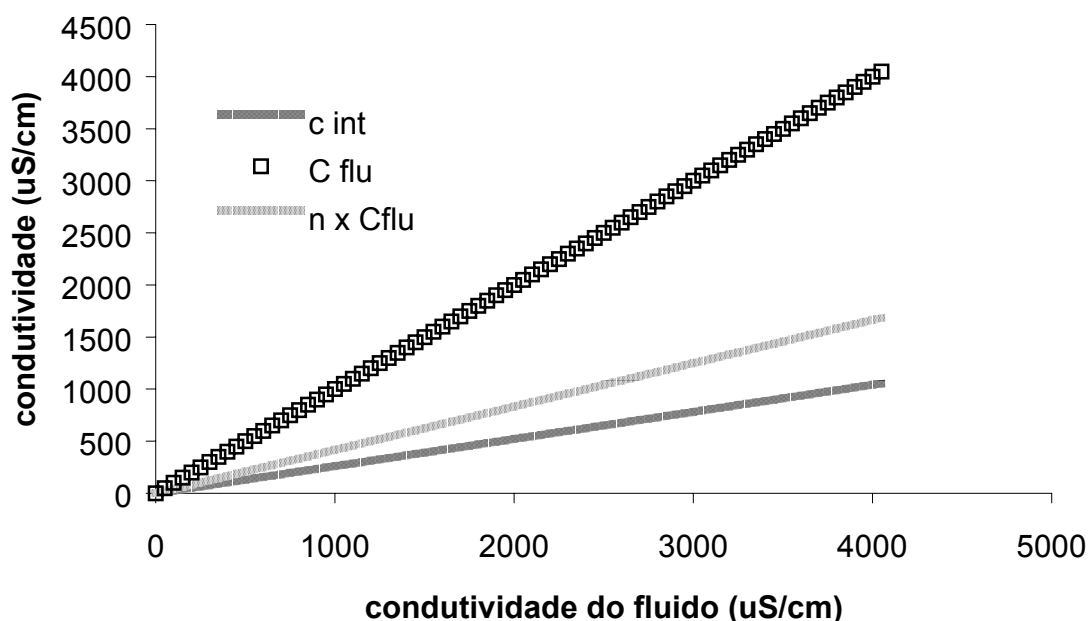


Figura 5.4- Regiões associadas à redução de condutividade devido à presença de grãos

A condutância (C) em um circuito alternado é equivalente ao inverso da resistência elétrica, portanto, a equação abaixo pode ser escrita a partir da equação 2.5.

$$C = \sigma \times \frac{A}{L} \quad (5.2)$$

Como admitiu-se, por hipótese, que toda a condução elétrica ocorre pelo fluido, a condutância medida em um meio aquoso (C_{flu}) pode ser dado pela equação 5.3.

$$C_{flu} = \sigma_{flu} \times A / L \quad (5.3)$$

Ao introduzir um sistema particulado admite-se que há uma redução de área igual à porosidade (n) e aumento do comprimento das linhas de corrente. A condutância entre os eletrodos ainda é dada pela condutância do fluido, alterada pela geometria, o que define C_{int} . Dessa maneira chega-se à Equação 5.4 na qual Ft é a relação entre o comprimento da maior e menor linha de corrente.

$$C_{int} = \sigma_{flu} \times A \times n / L \times Ft \quad (5.4)$$

O esquema da Figura 5.5 mostra que existe uma função linear dada pela lei de Ohm, que leva a condutância à voltagem. Existe ainda outra função que leva a voltagem à condutividade, dada pela equação de calibração. Ambas as funções são do primeiro grau e tanto a voltagem, como a condutividade, aumentam com o aumento da condutância.

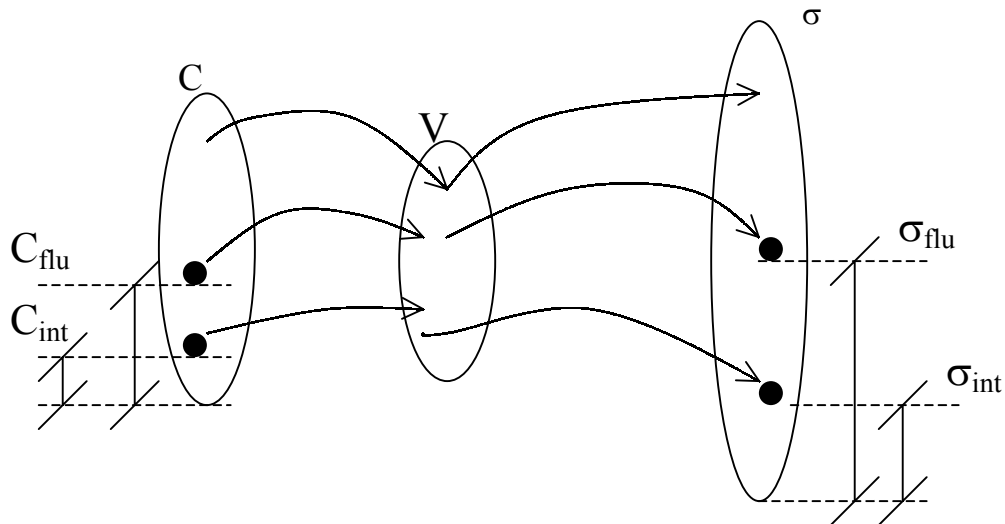


Figura 5.5- Representação esquemática das funções que levam a condutância à voltagem e a voltagem à condutividade.

Segundo Jackson, 1978, Weemes et al., 1990, o fator de formação (FF) é definido como a razão entre a condutividade de um fluido e a condutividade integral (eq 2.24). Como ambas as funções são lineares o fator de formação também pode ser dado pela razão entre a condutância do fluido (C_{flu}) e a integral (C_{int}).

Combinando as equações 5.3 com a 5.4, chega-se à equação 5.5.

$$C_{int} = C_{flu} \times \frac{n}{Ft} \quad (5.5)$$

que também pode ser escrita em função do fator de formação, pela equação 5.6.

$$Ft = FF \times n \quad (5.6)$$

Esta equação mostra que uma porcentagem da condutividade elétrica é perdida devido ao aumento do comprimento das linhas de corrente. Os meios que apresentarão maior acréscimo de comprimento são os que apresentam maior tortuosidade. Com a Equação 5.6 o fator de tortuosidade foi calculado e está mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6- Resumo dos fatores de formação e os de tortuosidade obtidos experimentalmente.

Areia: São Francisco

ϕ	porosidade	Ft
50	0,427	1,6
21	0,378	1,5
18	0,367	1,54
6,5	0,339	1,54

Areia: Itaipuaçu

ϕ	porosidade	Ft
50	0,342	1,16
21	0,299	1,17
6,5	0,289	1,31

Areia: Mistura de São Francisco com Itaipuaçu

ϕ	porosidade	Ft
50	0,346	1,38
21	0,296	1,67
6,5	0,280	1,60

Areia: Mistura de São Francisco com conchas

ϕ	porosidade	Ft
50	0,367	1,71

Observou-se que a presença de conchas dentro da massa de areia elevou o fator de formação da areia de São Francisco. Foram realizados ensaios praticamente na mesma porosidade, ou seja, a perda de condutividade devido à redução de área foi quase igual nos dois casos. Contudo a tortuosidade do meio aumentou devido à introdução de conchas e isto ficou evidenciado pelo aumento do fator de tortuosidade deste material como mostrado na Tabela 5.6.

A influência das conchas sobre a rede de fluxo elétrica é diferente da influência dos grãos devido à geometria das partículas. A Figura 5.6 ilustra uma situação na qual um grão, representado por uma esfera e uma concha estejam inseridos em um campo elétrico uniforme. A Figura 5.8a mostra que a distribuição das linhas de fluxo (coincidentes com as linhas de campo elétrico) gera uma região de mesmo potencial elétrico próximo à superfície da concha, representado pela região hachurada. Esta região pertence aos interstícios do solo, mas não há condução elétrica, pois não tem existência de diferença de potencial. Isso contraria a hipótese de que a redução da condução elétrica deve-se à redução de área e aumento do comprimento das linhas de corrente. Neste caso a redução de área na qual há condução elétrica é maior que a porosidade. Analisando a Equação 5.6 verifica-se que o aumento da porosidade, para um Fator de Formação fixo, implica no aumento do Fator de Tortuosidade. Por este motivo o Fator de Tortuosidade real do solo é diferente do calculado por meio da Equação 5.6 e depende da geometria das conchas.

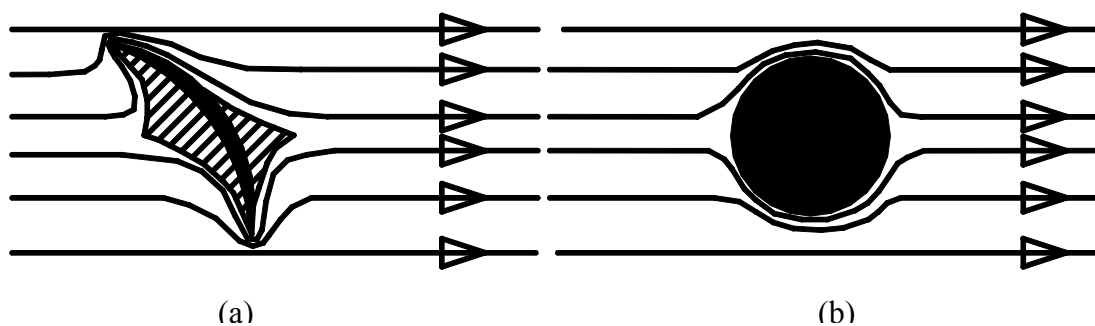


Figura 5.6- Esquema da influência de uma concha (a) e de um grão (b), representado por uma esfera, sobre a deformação da rede de fluxo elétrica

5.3- Resultados dos ensaios realizados com caulim

Analisando a variação de condutividade do caulim com o tempo pôde-se observar que existe um acréscimo, seguido de uma queda de condutividade, como exemplificado na Figura 5.7. Esta figura mostra que não houve um valor estabilizado durante o estágio do ensaio Ca-2-1, que durou cerca de 20 horas. Isso se explica pelo fato do caulim ser muito fino e de alta densidade, que resulta numa sedimentação acentuada e, conseqüentemente, uma variação contínua do índice de vazios.

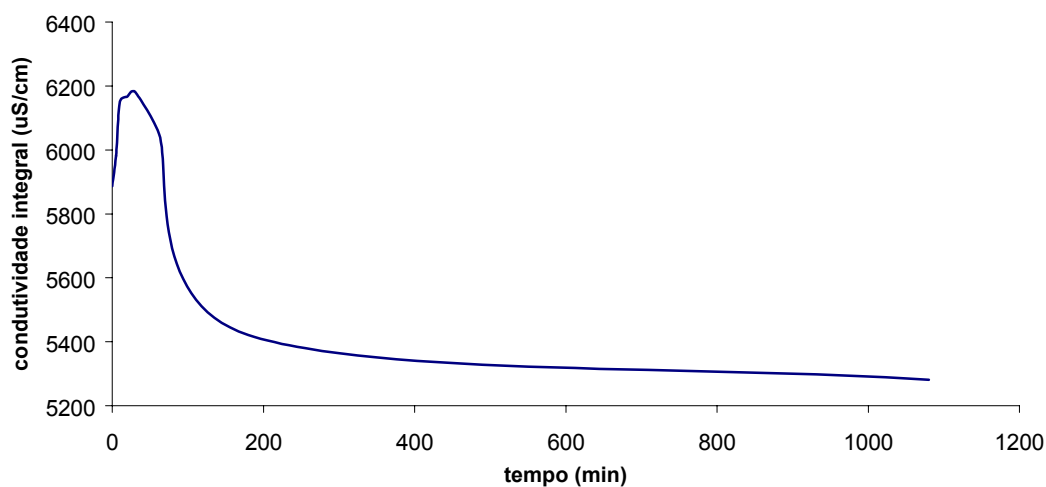


Figura 5.7- Variação de condutividade ao longo do tempo no ensaio Ca-2-1.

Quando o corpo de prova é confeccionado, a metodologia empregada faz com que existam bolhas de ar no interior do solo. O aumento da condutividade nos primeiros instantes do ensaio pode ser explicado pela eliminação das bolhas de ar, implicando no aumento do grau de saturação. Este comportamento foi verificado em diferentes umidades e está exemplificado na Figura 5.7. Em todos os demais ensaios observou-se a mesma tendência e podem ser vistos no Anexo 4. Observou-se que para umidades iniciais mais elevadas o máximo valor de condutividade foi atingido num tempo menor que o máximo atingido nos ensaios com menor umidade. Isso pode ser explicado pela facilidade das bolhas de ar serem eliminadas durante a sedimentação em meios com a umidade elevada.

Observa-se na figura 5.7 que após atingir o pico a condutividade diminui com variação acentuada. Este comportamento se explica pela redução do índice de vazios do material ao longo da sedimentação. Durante o período em que houve um aumento da condutividade, ocorria também a redução do índice de vazios, devido à sedimentação, mas o efeito da saturação superou o da redução do índice de vazios.

Analisando os corpos de prova ensaiados com diferentes concentrações de solução, mas mesmo índice de vazios, foi possível verificar que a relação entre a condutividade do fluido e a condutividade integral é constante. O fator de formação foi calculado, portanto, pelo inverso da inclinação da reta correspondente à condutividade integral mostrada na Figura 5.8.

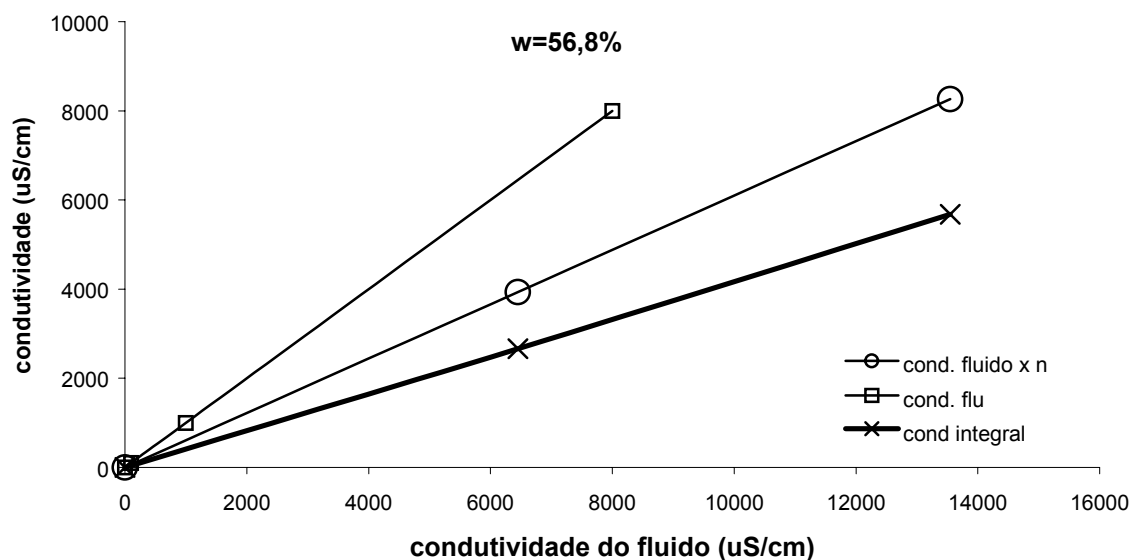


Figura 5.8- Comparação entre a condutividade do fluido, a integral, e a obtida exclusivamente devido à redução de área.

Seguindo a interpretação utilizada para o cálculo do fator de tortuosidade para as areias, foi possível verificar que a condutividade integral medida no caulim também sofre uma redução devido à redução de área e outra devido à tortuosidade. A Tabela 5.7 mostra um resumo dos resultados obtidos com o caulim.

Tabela 5.7- Resumo dos resultados obtidos com o caulim.

Ca-1

Ensaio	umidade	S%	n	σ fluido (uS/cm)	σ integral (uS/cm)
Ca-1-1	49,3	93,4	0,59	6450	2611,5
Ca-1-2	55,3	98,6	0,63		2661,5
Ca-1-3	66,4	96,9	0,66		2686,5

Ca-2

Ensaio	umidade	S%	n	σ fluido (uS/cm)	σ integral (uS/cm)
Ca-2-1	56,5	90,5	0,63	13547	5886,5
Ca-2-1*	50,2	100	0,58		5426,5
Ca-2-2	78,8	92,2	0,7		6161,5
Ca-2-2*	58,5	100	0,62		5676,5

Ca-3					
Ensaio	umidade	S%	n	σ fluido (uS/cm)	σ integral (uS/cm)
Ca-3-1	64,0	88,7	0,67	20200	8686,5
Ca-3-1*	50,3	100	0,58		8221,5
Ca-3-2	76,3	95,1	0,69		9991,5
Ca-3-2*	58,5	100	0,62		8371,5

$w = 50,3\%$
 Fator de Formação = 2,46
 Fator de tortuosidade = 1,55

$W = 58,5\%$
 Fator de Formação = 2,41
 Fator de tortuosidade = 1,49

A Figura 5.9 mostra a relação entre o Fator de Formação para todos os materiais ensaiados. Nesta figura pode-se observar que a porosidade medida para o material fino é superior às medidas para o material granular. Além disso o fator de formação verificado foi inferior, entretanto a curva dada pela fórmula de Archie apresenta uma inclinação superior às demais. Isso significa que o parâmetro m da fórmula de Archie aumenta à medida que o material torna-se mais fino. Esse comportamento já havia sido observado para as areias e agora extrapola-se para diferentes tipos de materiais.

5.4- Conclusões parciais

A condutividade elétrica de um meio aquoso aumenta com o aumento da concentração do meio, mas tal relação não ocorre linearmente. Somente para pequenas variações de concentração é possível admitir que a variação de condutividade seja linear, conforme Discutido por Weemes, 1990. Em meios com baixa concentração a variação de condutividade é mais sensível à variação de concentração do que em meios com maior concentração.

Nos ensaios realizados com areias a percolação de diferentes soluções permitiu determinar o Fator de Formação de cada tipo de solo em diferentes porosidades. Observou-

se que, em cada porosidade, o Fator de Formação mantém-se constante e depende exclusivamente da forma dos grãos.

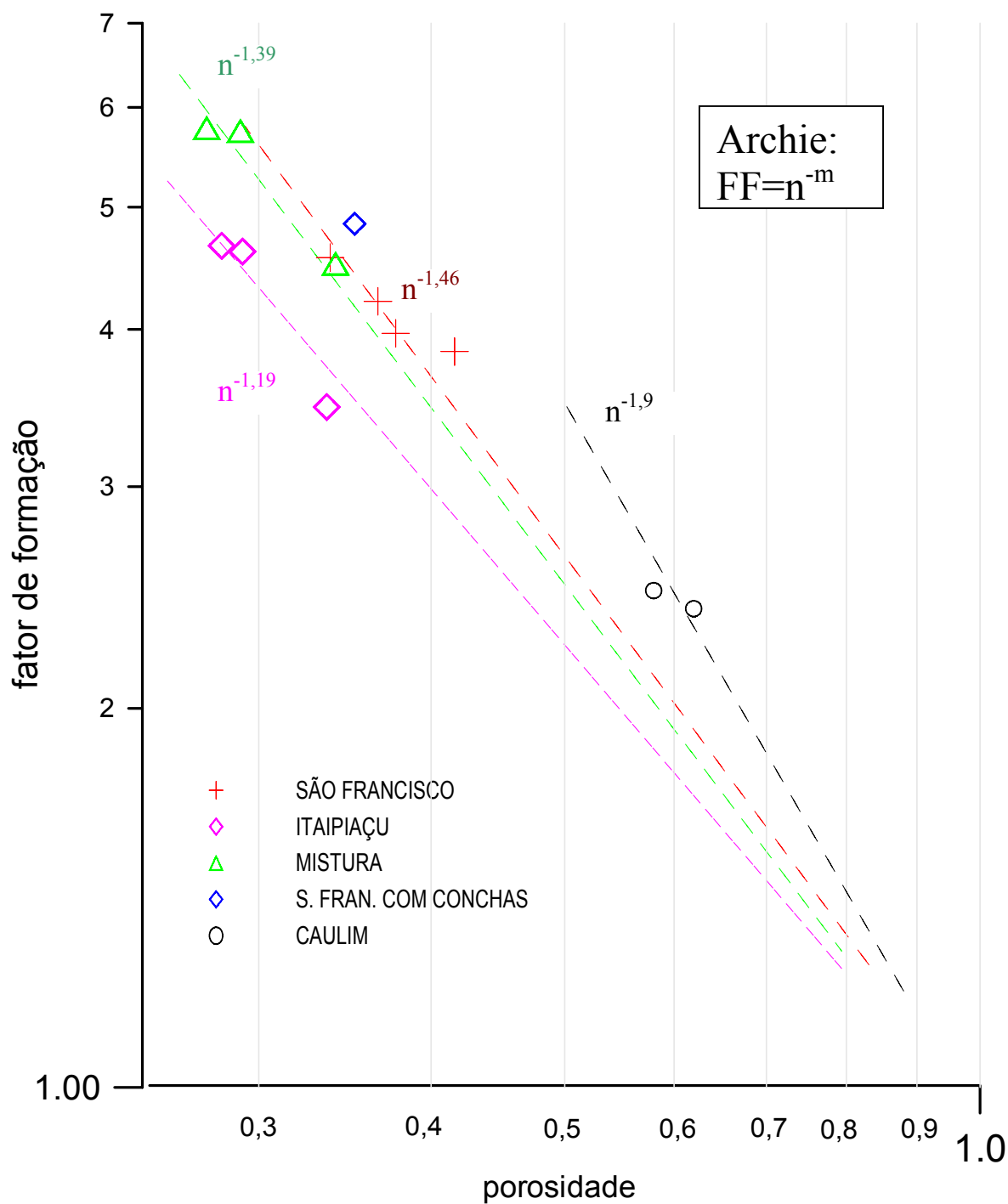


Figura 5.9- Relação entre o fator de formação e a porosidade para todos os materiais ensaiados em laboratório.

A Fórmula de Archie foi utilizada para correlacionar os dados experimentais a fim de comparar os resultados obtidos na presente pesquisa com os relatados por outros autores. O procedimento adotado nos ensaios não permitiu que fossem obtidos uma grande faixa de valores de porosidade e pode explicar o motivo pelo qual a correlação não se mostrou muito boa. Entretanto os parâmetros obtidos são coerentes com os obtidos por outros autores.

O parâmetro m foi determinado para todos os tipos de solo e observou-se que o valor mais baixo corresponde ao solo com grãos mais arredondados, areia de Itaipuaçu. Os parâmetros m determinados para a areia de São Francisco e para a mistura foram aproximadamente iguais, apesar de apresentarem distribuições granulométricas diferentes. Isto confirma que a forma da distribuição granulométrica não influencia o parâmetro m da Fórmula de Archie como foi observado por Jackson, 1978.

O solo que apresentou o parâmetro m mais elevado nos ensaios de laboratório foi o caulim tendo em vista que as partículas finas possuem forma lamelar. Esta observação é consistente com as observações de Jackson, 1978, que relatou que o parâmetro m tende a aumentar à medida que os grãos se tornam menos esféricos.

A redução de condutividade devido à introdução de um sistema particulado pode ser atribuída a dois fatores: (i) redução de área e (ii) aumento das linhas de corrente. A redução de condutividade, em percentual, devido à redução de área é igual à porosidade. O aumento das linhas de corrente foi expresso em percentual pelo Fator de Tortuosidade. O solo que apresentou o menor Fator de Tortuosidade foi a areia de Itaipuaçu, cujos grãos são arredondados.

A introdução de conchas fez com que o Fator de Formação da areia de São Francisco aumentasse. Isso significa que um determinado tipo de solo pode ter a condutividade integral reduzida devido à presença de conchas. Admitindo que seja feita uma comparação em uma mesma porosidade e uma concentração do líquido fixa pode-se observar que a diferença de condutividade dos meios deve-se, exclusivamente ao aumento

de tortuosidade, proporcionado pelas conchas. Isso significa que meios mais tortuosos tenderão a apresentar parâmetros m da Fórmula de Archie mais elevados. Esta característica pode ser o motivo pelo qual o Fator de Formação de areias com grãos angulosos seja superior ao de areias com grãos arredondados.

A aplicação da Equação 5.6 para a determinação do Fator de Tortuosidade tem restrições, pois podem haver regiões nos interstícios nos quais não há diferença de potencial, portanto não há passagem de carga elétrica. Nesse caso a redução de área disponível para a passagem de corrente elétrica é superior à porosidade, por isso o Fator de Tortuosidade real é superior ao determinado pela equação 5.6.

Capítulo 6

Ensaio de Campo

Nos capítulos anteriores foram discutidos como os diferentes tipos de solo foram trabalhados no laboratório e os resultados obtidos. Neste capítulo será feita uma discussão sobre a campanha de ensaios de campo.

6.1- Resultados da Literatura

Lunne et al. (1997), reportaram que o cone resistivo tem sido empregado com sucesso em solos contaminados. Os autores apontam a desvantagem de que a condutividade do solo é fortemente influenciada pela resistividade do solo sem contaminação. Por esse motivo é importante que seja obtido a condutividade do perfil sem contaminação, ou seja, a condutividade referente ao *background* para fins de comparação. Para solos relativamente uniformes é possível desenvolver uma correlação local para correlações específicas entre a condutividade do solo e dos contaminantes selecionados. Os autores destacam que esta comparação pode indicar pontos específicos nos quais devem ser realizadas as amostragens e instalação de poços de monitoramento. Como exemplo foi apresentada a figura reproduzida abaixo, que apresenta resultados do cone resistivo numa área de tratamento de madeira, contaminada por *creosoto*. Pode-se observar regiões que contém anomalias em relação à condutividade. A condutividade elétrica se torna mais elevada devido à presença do contaminante.

6.2-Experiência prévia

O grupo de investigação de campo de geotecnia da UFRGS realizou ensaios na área da Ceasa, zona norte da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, utilizando o cone resistivo adquirido pelo PRONEX como um desenvolvido pela UFRGS. Os objetivos desta investigação foram evidenciar a potencialidade do equipamento e comparar os resultados com o cone adquirido (Nacci et al., 2003).

O perfil geotécnico da área era constituído, basicamente, de uma camada argilosa sobrejacente a uma arenosa. Acima da camada argilosa existia um aterro de

aproximadamente 1,5m executado recentemente, responsável pelo processo de adensamento que estava ocorrendo no local.

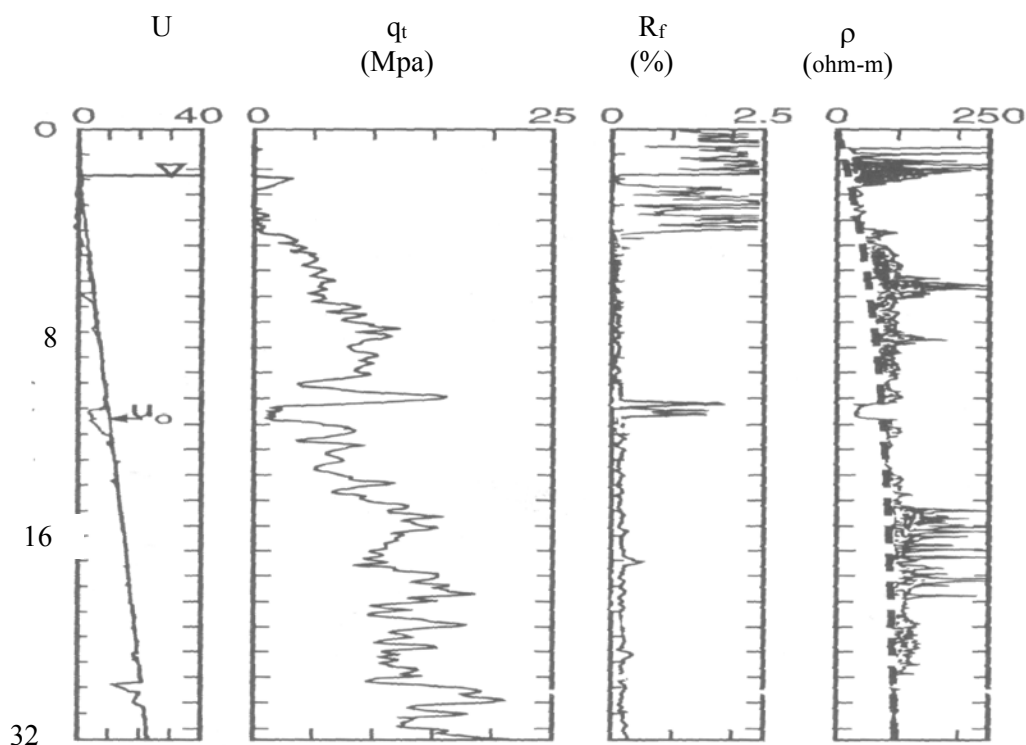


Figura 6.1- Ensaio com cone resistivo em área contaminada por Creosoto (Lunne et al., 1997)

Os resultados das verticais ensaiadas por Nacci et al. (2003) podem ser vistos na Figura 6.2 que iniciam-se a partir da profundidade de 0,5m, após execução de um pré furo a trado. A análise global dos resultados permitiu concluir que o equipamento desenvolvido pela UFRGS pode ser utilizado satisfatoriamente. A diferença entre os valores de condutividade observados, principalmente próximo à superfície, foi atribuída a possíveis variações do perfil geotécnico e não devido à utilização de outro instrumento.

O grupo de investigação de campo de geotecnia da UFRGS produziu, além de um cone resistivo, um módulo resistivo para acoplar ao CPTU a fim de obter resultados na mesma vertical. Existe um projeto para a execução de um módulo resistivo para o CPTU da COPPE-UFRJ, que será importante para o trabalho em investigações futuras.

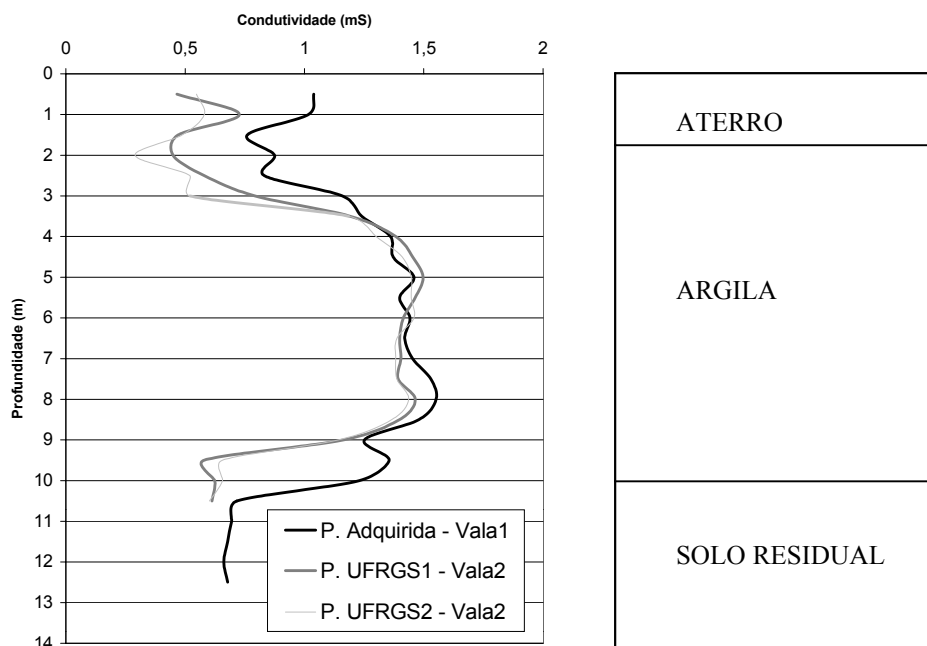


Figura 6.2- Resultados de condutividade obtidos no Aeroporto Salgado Filho por Nacci et al, 2003.

6.3- Ensaios na área do Pan-Americano

Os ensaios de campo foram realizados nos dias 20 de Dezembro de 2003 e 3 de fevereiro de 2004 na Vila do Pan-Americano na Barra da Tijuca, na Cidade do Rio de Janeiro como detalhado no item a seguir. Além da medição da condutividade, foram realizados outros ensaios *in situ*, e de laboratório, que complementam os do cone resistivo. Foram realizadas sondagens à percussão, ensaios de CPTU, palheta, T bar, ensaios oedométricos e de caracterização, que foram fruto da pesquisa de Macedo (2004). O motivo da escolha deste local se deu pela oportunidade de estudos em paralelo realizados por Macedo (2004). Além disso, esta área é adequada para realização de ensaios de cravação contínua, como é o caso do CPTU e do cone resistivo, pois o terreno é de consistência mole.

Foram realizados no total três verticais, uma na primeira campanha e duas na segunda. Todos os ensaios ocorreram até que o equipamento de cravação atingisse a camada mais resistente de solo residual, indicado quando o equipamento era suspenso.

6.4- Localização da área ensaiada

A área onde foram realizados os ensaios de campo encontra-se no bairro da Barra da Tijuca, cidade do Rio de Janeiro. A figura 6.3 é um mapa de parte da cidade

do Rio de Janeiro e nela está indicada a posição da área estudada. A localização fica na Avenida Airton Sena 3400, próximo ao início da Linha Amarela.

O acesso até o local onde foram realizados os ensaios deu-se por uma estrada de terra de aterro jogado, que serve para o tráfego de equipes que estão trabalhando na área. A Figura esquemática 6.4 mostra uma planta de locação do local dos ensaios. Um caminhão transportou os equipamentos necessários à execução dos ensaios até o ponto da estrada mais próximo do local dos ensaios.

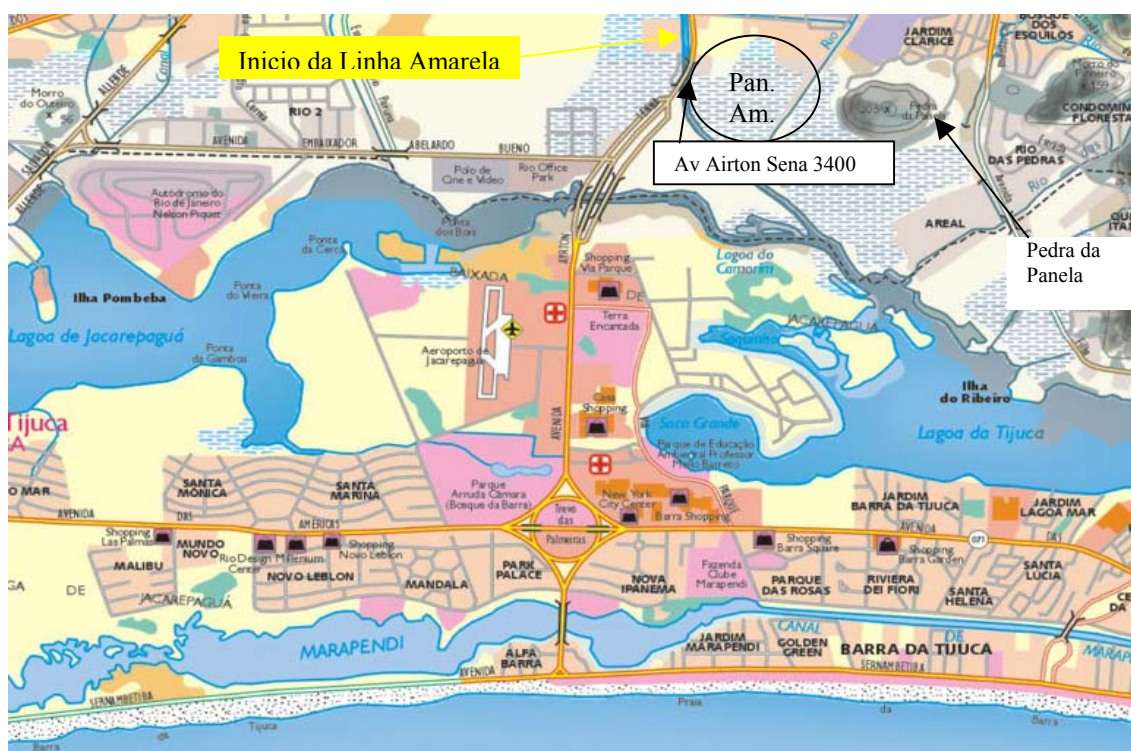


Figura 6.3- Planta de parte do bairro da Barra da Tijuca, na qual está locado a área na qual serão realizados os jogos Pan-Americanos.

A Figura 6.5 mostra o local ensaiado. Pode-se observar que, para transportar o equipamento de cravação para o ponto dos ensaios, foi necessário utilizar pranchas de madeira a fim de minimizar as tensões no solo. Caso esse procedimento não fosse realizado os pneus afundariam no material mole da superfície. Nesta fotografia também é possível observar a Pedra da Panela, que também está mostrada no mapa da Figura 6.2 no lado direito da área do Pan-Americano.

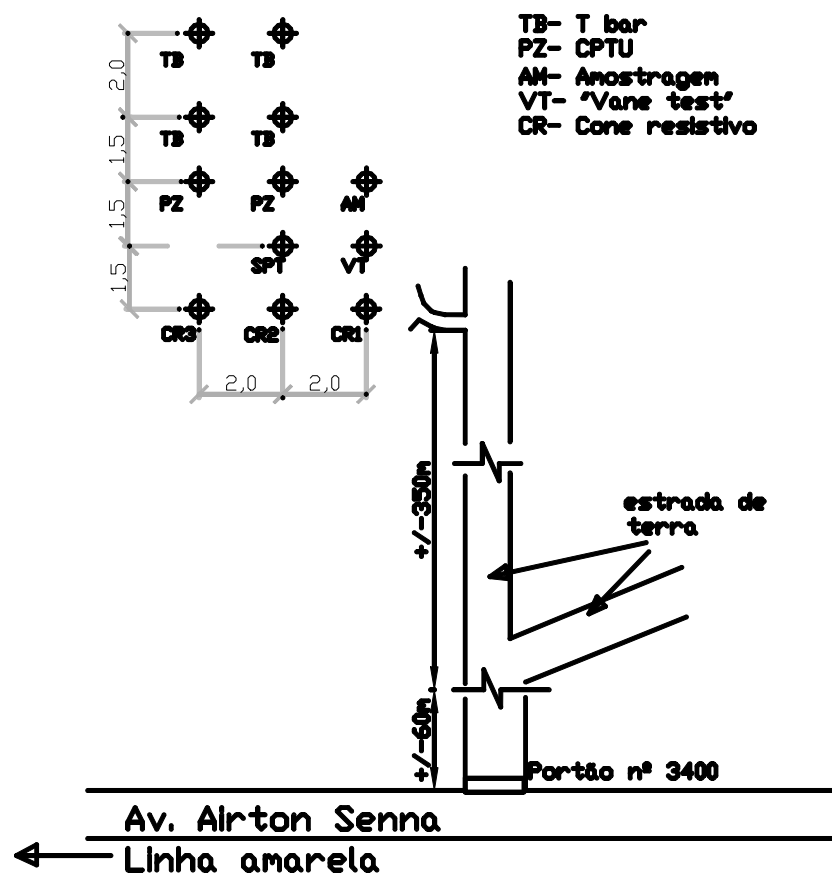


Figura 6.4- Planta de localização dos ensaios realizados em campo



Figura 6.5- Local onde foram realizados os ensaios, com destaque às pranchas de madeiras utilizadas no transporte do equipamento de cravação.

6.5-Perfil geotécnico

Segundo o boletim de sondagem SPT mostrado na Figura 6.6, o perfil de solo na área de ensaios é constituído de um material mole desde a superfície, sem a presença de aterro. Com exceção da camada de crosta superficial que suporta apenas um golpe do martelo, nas demais profundidades, até a profundidade de 11m, o conjunto desce com o peso próprio do conjunto martelo-hastes.

Foi identificada uma argila siltosa muito mole da superfície até a profundidade de 1,6m. Desta profundidade até 3,0m o solo foi classificado como uma argila turfosa, também de consistência muito mole, a partir de onde o solo passou a ser classificado como uma argila siltosa orgânica, mas sem alterar a consistência. O solo somente ganha resistência na sondagem à percussão na profundidade de 11m, quando passa a ser uma argila muito arenosa, e a resistência passa a aumentar um pouco com a profundidade até os 14,6m de profundidade. Neste ponto em diante o solo passa a ser residual, o que resulta num aumento da resistência até o limite da sondagem que ocorreu na profundidade de 18,45m.

O nível d'água verificado nas sondagens foi de 0,80m medido ao término da sondagem e 24hs depois. Durante os ensaios o nível d'água foi medido após a extração do cone resistivo, por meio de uma fita graduada, e verificou-se que o nível variou entre 0,23m e 0,27m. A sondagem foi realizada em um período mais seco comparado ao período em que foram realizados os ensaios com o cone resistivo e por isso houve diferenças nos níveis d'água medidos.

Foi realizada a caracterização geotécnica do material compreendido entre as profundidades de 7,75m e 8,45m para a pesquisa de Macedo (2004), em andamento na COPPE-UFRJ. O peso específico do solo nesta profundidade é de 12kN/m^3 , e a umidade natural é de 199,11%. Os limites de Atterberg são: $w_L = 210,0\%$ e $w_P = 89,5\%$, gerando $IP = 120,5\%$. O solo nesta profundidade era constituído de 21% de areia, 47% de silte e 32% de argila e apresentou uma densidade real dos grãos (G_s) igual a 2,353.

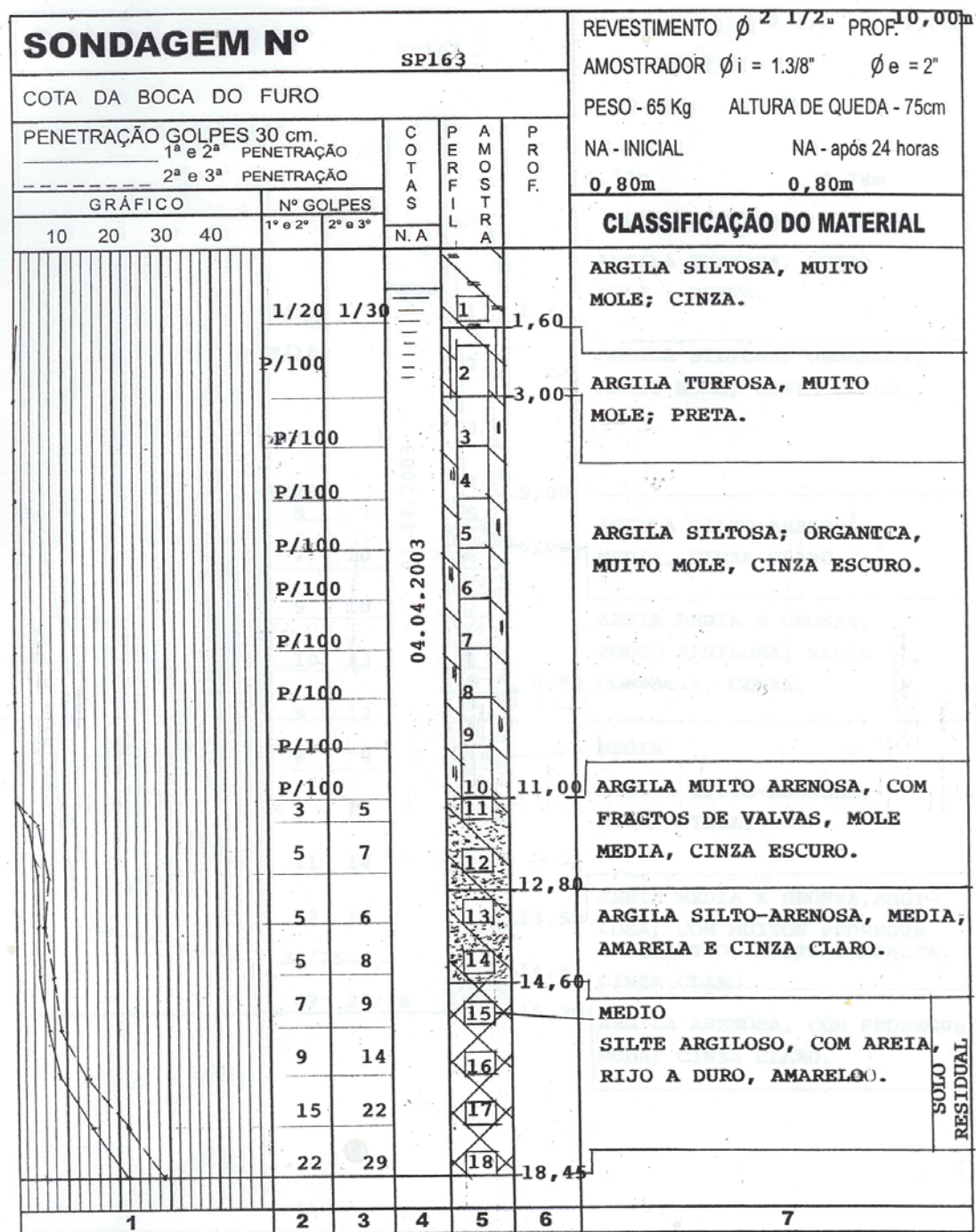


Figura 6.6- Boletim de sondagem do local dos ensaios.

6.6- Metodologia do ensaio *in situ*

A metodologia empregada na campanha de ensaios com o cone resistivo foi semelhante à empregada na realização de ensaios com o CPTU sem, no entanto, adotar determinados cuidados especiais como assegurar a saturação. O equipamento de cravação utilizado nas duas campanhas é o mesmo e pode ser visto na Figura 6.7. Este equipamento possui um motor elétrico que realiza a cravação a velocidade constante, que pode ser ajustada. Neste ensaio a velocidade não é importante, como é para outros

ensaios como o T bar e o CPTU, pois a medição é feita com o cone parado em um ponto fixo. Na presente pesquisa adotou-se um espaçamento de 20cm entre cada ponto de medição. A medição da profundidade é geralmente realizada por meio de um medidor de deslocamento vertical, melhoria implementada por Bezerra (1996). Entretanto na época da realização dos ensaios o medidor da COPPE/UFRJ estava com defeito e por isso a profundidade foi determinada utilizando marcações com giz no equipamento de cravação, espaçados a cada 20cm.

O equipamento de cravação da COPPE-UFRJ foi desenvolvido por Danzinger, (1990) e funciona com uma alimentação de 220V em corrente alternada. Por esse motivo foi necessário deslocar para a área de ensaio um gerador com potência compatível. A Figura 6.6 mostra o gerador, com potência de 35 KVa utilizado na segunda campanha de ensaios. Na primeira campanha de ensaios foi utilizado um gerador de 7,5Kva, que teve rendimento satisfatório.



Figura 6.7- Gerador de energia utilizado na segunda campanha de ensaios sendo descarregado do caminhão munk.

O equipamento de cravação possui garras que, por atrito, empurram o sistema de hastes para baixo quando da cravação ou para cima, no momento da extração do instrumento de medição, seja o cone resistivo, seja o CPTU. Cada haste possui comprimento de 1m e por isso a cravação precisa ser interrompida a cada metro para o encaixe de nova haste. Como o cone resistivo possui diâmetro superior ao das hastes, não passa pelas garras no equipamento de cravação. Por esse motivo o cone, já conectado à luva, deve ficar posicionado abaixo das garras para que sejam rosqueadas. É importante ressaltar que o cone deve ficar fixo e a haste deve ser girada, caso contrário existe a possibilidade do cabo se romper.

Para fixar o cone resistivo no sistema de hastes usa-se uma luva mostrada na Figura 6.8. A conexão é feita por meio de roscas do tipo fêmea nas duas extremidades cujas especificações estão apresentadas no Anexo 5. A Figura 6.9 mostra o conjunto posicionado no equipamento de cravação.

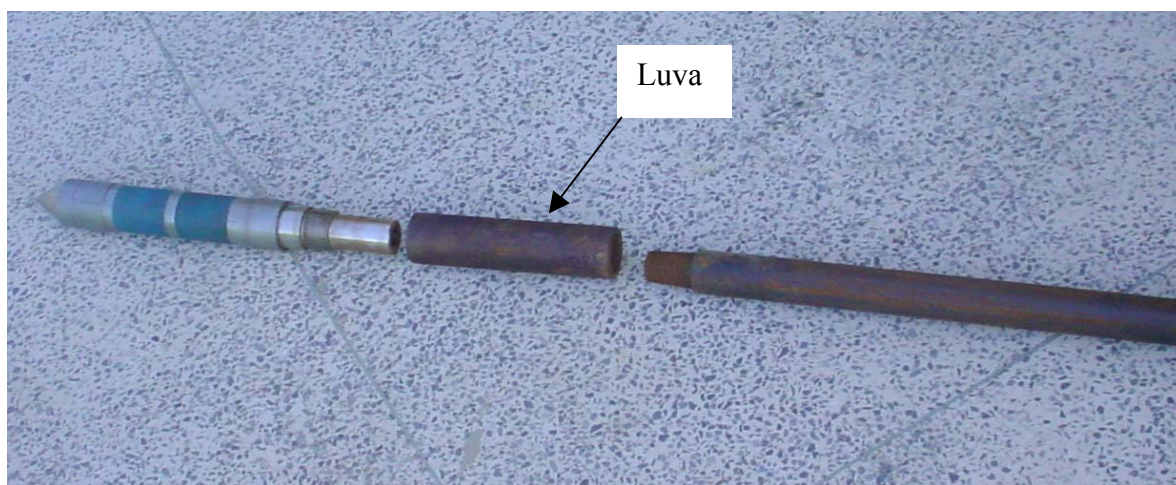


Figura 6.8- Conjunto que é introduzido no solo pelo equipamento de cravação: cone resistivo, luva e haste.

6.7- Coleta de água do lençol freático

Na última campanha de ensaios, após a extração do cone resistivo, foram extraídas três amostras da água do lençol freático, duas do primeiro furo e uma do segundo. Utilizou-se uma técnica simples, mas que apresentou resultados consistentes, que consistiu em introduzir um tubo flexível no furo até a profundidade de aproximadamente 0,4m, coletando-se então, uma amostra por meio de sucção aplicada com a boca. O objetivo de coletar amostras da água do lençol foi estimar o fator de

formação, correspondente à profundidade na qual foi coletado e compará-lo com os fatores de formação medidos em laboratório.

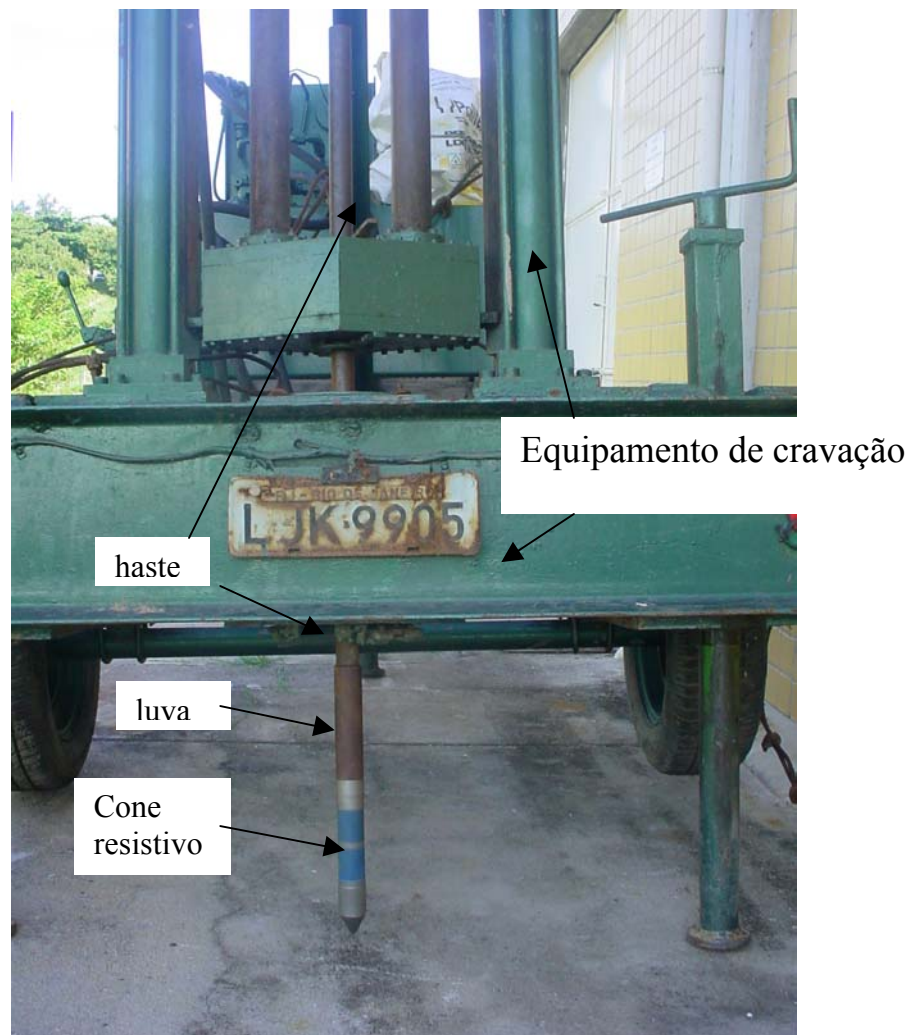


Figura 6.9- Equipamento de cravação com o cone resistivo conectado à primeira haste. Fotografia ilustrativa tirada no laboratório

6.8-Aquisição de dados

Os resultados medidos pelo cone resistivo são obtidos em função da voltagem de saída da placa geradora de sinal, como foi discutido no Capítulo 3. O multímetro funciona com bateria própria, entretanto a placa geradora de sinal não. A placa é alimentada por uma voltagem alternada que pode ser de 110V ou 220V, de acordo com o ajuste. Nesta campanha de ensaios aproveitou-se a voltagem proveniente do gerador para alimentar a placa geradora de sinal com a voltagem de 110V. Como a voltagem aplicada não é constante, a placa foi ligada a um estabilizador de corrente.

A aquisição de dados foi realizada manualmente, anotando a voltagem de saída da placa nas profundidades especificadas. Esta metodologia apresenta a vantagem de não necessitar de muitos equipamentos para a realização do ensaio, mas apresenta a desvantagem de não possibilitar a aquisição automatizada dos dados.

6.9-Resultados

Os dados obtidos na campanha de investigação de campo foram calculados em função das curvas de calibração, mostradas no Capítulo 5. Apesar das medições terem sido pontuais, o conjunto formado por elas gera uma medição quase contínua com a profundidade. A sequência para obtenção dos resultados está esquematizada na Figura 6.10.

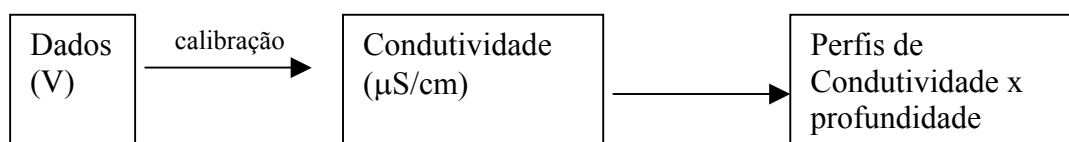


Figura 6.10- Esquema da sequência utilizada para obter os perfis de resistividade.

6.10- Análise dos resultados

A Figura 6.11 reúne os resultados obtidos nas três verticais realizadas na campanha de ensaios de campo, junto com resultados de CPTU, obtidos por Macedo, 2004. Nas verticais de resistividade a linha preta corresponde ao ensaio CR1, a roxa ao ensaio CR2 e a vermelha ao ensaio CR3. Pode-se observar que, de maneira geral, há um acréscimo irregular de condutividade da superfície até a profundidade de 2,8m. Nesta profundidade iniciou-se uma redução da condutividade observada em todos os ensaios, a qual se estendeu por apenas 20 cm. A partir da profundidade de 3m a condutividade apresentou um acréscimo constante com a profundidade até os 8m, exceção feita a pontos esporádicos nos quais ouve uma redução seguida de acréscimo imediato até seguir a tendência de aumento constante.

6.10.1- Resultados do cone resistivo

Na profundidade de 8m a tendência da condutividade muda e sofre, nos três ensaios, uma queda abrupta, sendo mais expressiva no ensaio 2 que no 1 e menor no 3. A condutividade volta a ser aproximadamente igual na profundidade de 8,75m, a partir de onde existe nova queda de condutividade, sendo que a queda relativa ao ensaio 2 ocorreu um pouco acima da profundidade no qual ocorreu a queda de condutividade nos

demais ensaios. Na profundidade de 9,6m as condutividades medidas voltam e coincidir e continuam a diminuir até o limite do ensaio.

A condutividade medida, das amostras do fluido, foi aproximadamente constante e podem ser vistos na Tabela 6.1. Como os valores de condutividade integral nesta profundidade foram aproximadamente iguais, o fator de formação foi calculado fazendo a média da condutividade do fluido dividido pela média da condutividade integral. O fator de formação calculado foi de 1,98 e, para fins de análise, foi considerado como sendo representativo da camada superficial de argila siltosa.

Tabela 6.1- Condutividades e fatores de formação medidos no campo e em laboratório.

condutividade integral ($\mu\text{S/cm}$)	condutividade integral média ($\mu\text{S/cm}$)	condutividade do fluido ($\mu\text{S/cm}$)	condutividade média do fluido ($\mu\text{S/cm}$)	Fator de formação médio (FF)	FF do caulim	
					n=0,57	n=0,61
3301,5	3158,17	6700	6260	1,98	2,41	2,47
2961,5		6320				
3211,5		5760				

O fator de formação 1,98, medido na argila natural, na profundidade de 0,4m, mostrou-se inferior ao medido em caulim no laboratório. Isso significa que para uma mesma concentração do fluido o solo no campo apresenta condutividade superior à condutividade do caulim ensaiado em laboratório. Isso pode ser explicado, primeiramente pela diferença dos valores de porosidade que, no campo, é superior ao de laboratório. Além disso, o solo ensaiado em campo possui, de acordo com o boletim de sondagem, matéria orgânica. Segundo Lunne (1997) este é um fator que eleva a condutividade do meio. Com o aumento da condutividade integral o fator de formação diminui, o que justifica um resultado inferior ao medido no laboratório.

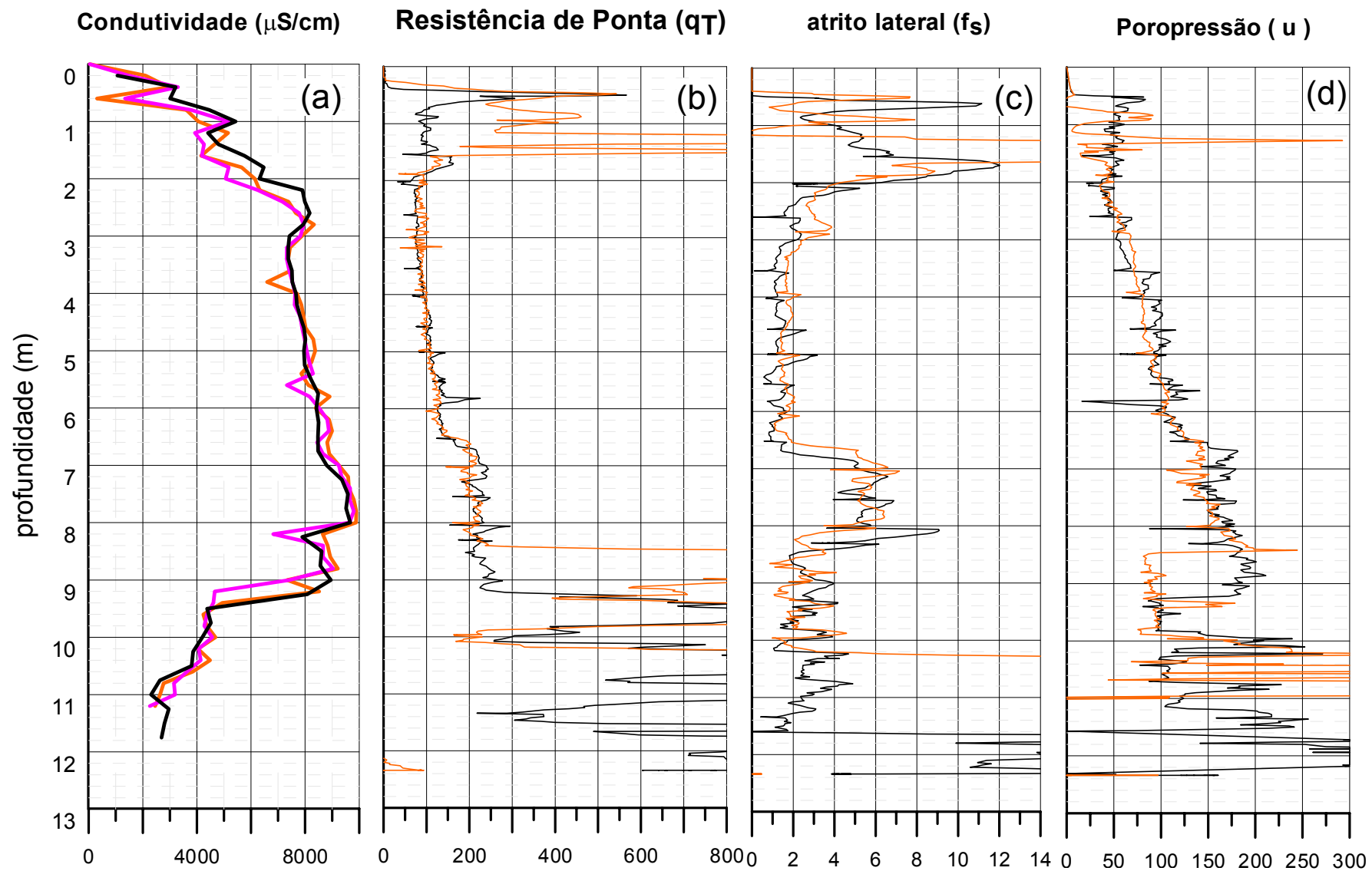


Figura 6.11- Comparação entre resultados de CPTU com os de cone resistivo.

6.10.2- Cone resistivo versus CPTU

Na profundidade de 0,6m houve um aumento na resistência de ponta do CPTU, que pode ser atribuída à existência de uma lente arenosa ou uma região de conchas. Admitindo que não haja alteração do fluido intersticial em pequenos intervalos de profundidade, a presença de um destes materiais faz com que a condutividade do meio diminua. Isso justifica o pico de condutividade decrescente observado entre as profundidades de 0,4m e 0,6m. Pode-se observar ainda que a influência desta lente diminui na direção e sentido do ensaio 3 para o 1, pois estes pontos estão alinhados entre si.

A redução da condutividade do solo próximo da superfície pode ser explicada, em parte, pela não uniformidade da salinidade do fluido intersticial, acentuado pela lava lixiviação de íons na região próximo à superfície devido às águas de chuvas. Outro motivo pode ser decorrente da existência de uma crosta. A crosta decorre do processo de ressecamento e variação do nível d'água próximo à superfície. As resistências de ponta e de atrito lateral, mostrados nas Figuras 6.10 b e c respectivamente, diminuem na profundidade de 2m, indicando a existência de um solo mais resistente próximo à superfície. O OCR foi determinado por Macedo (2004) e observou-se que este parâmetro mantém-se constante, igual a 1,3, em profundidades superiores a 4m e aumenta a taxas crescentes ao se aproximar da superfície. Isso implica que o índice de vazios pode ser menor próximo à superfície do que ao longo da camada argilosa, o que pode justificar uma condutividade inferior próximo à superfície.

Na região próxima aos 3m há a alteração entre a camada de turfa e a de argila orgânica, mostrado no boletim de sondagem. Na Figura 6.10c pode-se observar que existe uma redução do atrito lateral nesta profundidade, o que sugere a alteração de materiais. Possivelmente a argila, próxima aos 3m de profundidade, apresenta índice de vazios inferior à turfa presente nas camadas superiores e por isso ocorreu a redução de condutividade dentro de uma faixa pequena do solo, na mesma profundidade. Uma variação de índice de vazios semelhante ocorreu na área do SENAC, situada a 1km de distância da área do Pan-Americano (Almeida et al., 2002). No presente trabalho não houve a medição da porosidade destes materiais e por isso não se pode afirmar que a redução de condutividade se deve exclusivamente à redução de índice de vazios. Outra

hipótese pode ser a redução de percentual de matéria orgânica entre os dois materiais, o que também justificaria a redução de condutividade.

Entre as profundidades de 3m e 8m a condutividade tendeu a aumentar, continuamente, ao longo das verticais, e de maneira uniforme, pois a mesma tendência foi verificada nos três ensaios. A existência de pequenas reduções de condutividade pontuais pode ser explicada pela existência de materiais como conchas ou areias dentro da matriz de argila, mas a tendência é de aumento contínuo. Como os resultados da resistência de ponta do CPTU apresentaram um aumento quase contínuo, interpretou-se que houve, como esperado, uma redução da porosidade com o aumento da profundidade, o que colabora para a redução da condutividade, contrariando os resultados obtidos. Deve haver um aumento considerável da concentração salina entre distâncias verticais de 5m, que se torna mais expressiva ao se aproximar da borda da lagoa, que é alimentada por água do mar durante a maré cheia. Acredita-se, portanto, que o aumento contínuo da condutividade explica-se pela variação gradual de concentração salina do meio, cuja influência supera a da redução de porosidade ao longo de uma vertical.

As sondagens detectaram a existência da camada argilosa até a profundidade de 11m, a partir de onde o solo começou a apresentar maior resistência, ($N = 5$). No ensaio de CPTU tanto a resistência de ponta, como o atrito lateral aumentaram na profundidade de 6,5m, o que indica a alteração de camadas. Entretanto, a alteração de camadas só pôde ser observada, com o cone resistivo, na profundidade de 8m. Esta diferença de 1,5m pode ser atribuída à variação do perfil no espaço, tendo em vista que os ensaios de resistividade e os de CPTU foram realizados com 3m a 5m de distância entre si. Acredita-se que tal variação do perfil seja possível em um solo residual.

Na camada de solo residual, caracterizada na sondagem como um solo arenoso, a condutividade tende a diminuir. No laboratório observou-se que a condutividade em areias é inferior a dos materiais finos e por isso há a redução da condutividade ao se penetrar no solo arenoso. Entretanto, a variação não é constante, pois o solo residual tem a característica de ser heterogêneo.

6.11- Conclusões parciais

A experiência adquirida nas campanhas de ensaios em campo foi de grande valia para se aprender mais a respeito do uso do cone resistivo no campo e sobre a interpretação dos resultados de condutividade. A qualidade da interpretação dos perfis de condutividade depende do conhecimento do perfil geotécnico e da salinidade do perfil.

Observou-se que a existência de lentes de materiais diferentes da matriz pode ser identificada com o cone resistivo. Na profundidade de 0,6m ficou evidente a existência de uma lente de areia que diminui no sentido do ensaio 3 para o 1, pois a intensidade da queda de condutividade também diminuiu. Verifica-se, portanto, que o uso do cone resistivo pode ser uma ferramenta aplicável a mapeamentos geotécnicos.

A existência de uma crosta sobreadensada na camada de argila implica em redução da condutividade, devido à variação de porosidade. Outro motivo pode ser devido à baixa concentração do fluido intersticial. Esta região pode ser identificada nos três ensaios nesta campanha de ensaios e também foi observada por Nacci et al. (2003) no campo experimental da CEASA, na cidade de Porto Alegre.

Na Vila do Panamericano observou-se um aumento da condutividade do solo. Como a tendência de materiais em sedimentação é de diminuir a porosidade com a profundidade, a influência deste fenômeno seria de reduzir a condutividade. Acredita-se que o aumento da condutividade medida deve-se à variação de concentração do meio, tendo em vista que a alimentação ocorre por água de lagoa e a salinidade pode crescer com a profundidade pelo aumento de densidade da água.

A coleta de líquidos intersticiais é um dado experimental valioso para potencializar a interpretação dos resultados medidos. Diversos autores (Brandl e Robertson, 1997; Watabe et al., 2002; Lunne et al, 1997) enfatizam a necessidade de obter amostras dos fluidos intersticiais e reportam a existência de diferentes equipamentos com esta finalidade. A primeira vantagem é em relação à condutividade do fluido, cuja variação poderia ser medida. Além disso, conhecendo a condutividade do fluido, seria possível determinar fatores de formação referentes a diferentes

profundidades. Como o fator de formação não varia para diferentes concentrações salinas ficaria mais fácil estimar características do solo a partir do fator de formação.

Em relação ao desempenho da ponteira resistiva utilizada nesta pesquisa (desenvolvida pela UFRGS), observou-se que houve repetibilidade dos resultados, o que afirma a qualidade da ferramenta. As diferenças entre medições realizadas em diferentes verticais na mesma profundidade não se mostraram discrepantes entre si e podem ser atribuídas a variações do perfil geotécnico.

Referência bibliográfica

- ALMEIDA, M. S. S., SANTA MARIA, P. E. L., MARTINS, I. S. M., SPOTI, A. P, COELHO, L. B. M. 2000. *Consolidation of a very soft clay with vertical drains*. Geotechnique 50, no 6, pp 633-643
- ALMEIDA, M. S. S., BORMA, L. S., BARBOSA, M. C. 200. *Land disposal of river and lagoon dredged sediments*. Engineering Geology, no 60 pp 21-30 ed Elsevier.
- BARBOSA, M. C, ALMEIDA, M. S. S. 2001. *Dredged and disposal of fine sediments in the state of Rio de Janeiro , Brazil*. Journal of Hazadous matrials 85 pp 15-38 ed Elsevier
- BEZERRA, R. L., 1996. Desenvolvimento do Piezocone de terceira geração e usa utilização em argilas moles. Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, R. J., Brasil.
- BORMER, R., WARD, S. H. MORRISON, H. F., 1968. *On Induced Eletrical Polarization and Groundwater*. Geophysics, v33 n 5, pp 805-821, October
- BRANDIL, H., ROBERTSON, 1997. *Geo-environmental Site Investigation, Specification and Characterization*. In Proceedings of the 2nd Congress on Environmental Geotechnics, v. 3, pp 1345-1374, Osaka, Japan, November.
- CAMPANELLA, D. R. G., KRISTIANSEN, H., DANIEL, C., DAVIES, M. P., 1998. *Site Characterization of Soils Deposits Using advances in Piezocone Technology*. In Proceedings of the 1st Conference on Geotechnical Site Characterization, pp 995-1000, Georgia, USA
- CAMPANELLA, R. D., 1999. *Geo-environmental Site Characterization of soils Using In-Situ Testing Methods*. In Asian Institute of Technology 40th Year Conference.

- CAMPANELLA, R. G., WEEMES, I., 1990. *Development and use of an Eletrical resistivi Cone for Groundwater Contamination Studies*. Journal of Canadien Geotechnics v. 27, pp 557-567.
- DANZINGER, F. A. B., 1990. *Desenvolvimento de Equipamento para a Realização de Ensaio de Piezocone: aplicação a argilas moles*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.
- FUKUE, M., MINATO, T., MATSUMOTO, M., TAYA, N., 1998. *Development of a Resistivity Cone for Monitoring Contaminated and Non-contaminated soil Layer*. In the proceedings of Environmental geotechnics, pp 575-580. Balkema, Rotterdam.
- FUTAI, M. M 2002. Estudo teórico e experimental do comportamento de solos não saturados, aplicação ao caso de voçorocamento. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil COPPE-UFRJ, R. J. Rio de Janeiro, Brasil
- GREEUW, G., VAN REE, C. C. D. F., BISSCHOP, F., WICHMAN, B., *Gas in Sludge Layers, Processes and Detection Methods*. In the proceedings of the 13th ECSMGE, v. 1, pp 363-368, Prague.
- HASSANEIN, A. S., BENSON, C. H., BOLTZ, L. R., 1996. *Eletrical Resistivity of Compacted Clays*. Journal of Geotechnical Engineering, v. 122 n. 5, May
- JACKSON, P. D., SMITH, D. T., STANFORD, P. N., 1978. *Resistivity-Porosity-Particle Shape Relationships for Marine Sands*, Geophysics, v. 43, n 6, pp 1250-1268, Outubro.
- KELLY, E. W. 1985. *Electrical resistivity for Estimating Ground-Water Recharge*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol 3 no 2.
- LAMB, T. W., Whitman, R. V. 1969. Soil Mechanics John Wiley and sons, Inc. New York, N. Y., USA

- LUCIA, P. C., FORD, G., TUCHFELD, H.A. 2001. Management of contaminated soil in engineering construction, in geotechnical and geoenvironmental engineering handbook, cap 30. Ed Rowe, R. K.
- LUNNE, T., ROBERTSON, P. K., POWELL, J. J. M., 1997. *Geo-environmental Applications of Penetration Testing*. In Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Blakie Academic and Professional (editors), London.
- MACEDO, E. 2004. Projeto, Investigação da resistência não drenada in situ de um novo equipamento, T-bar, na Barra da Tijuca. Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ. R.J. Rio de Janeiro, Brasil.
- MENDONÇA, R. M. G., 2001. Transporte e retenção de ânions em solo tropical residual saprolítico do estado do Rio de Janeiro. Tese de Mestrado. COPPE-UFRJ, Departamento de Engenharia Civil, R. J. Rio de Janeiro, Brasil.
- MIRANDA NETO, M. I. 2002. *Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- MIRANDA NETO, M. I., ALAMEIDA, M. S. S., BARBOSA, M. C. 2003. Investigação geoambiental em aterro de resíduos industriais utilizando geofísica para zoneamento das áreas contaminadas. Regeo (congresso brasileiro de geotecnia ambiental), 2003, Porto Alegre, R.S.
- MITCHELL, J.K., 1993. *Fundamentals of Soil Behavior*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
- NORMA ABNT 7181, dezembro de 1984- Determinação de Granulometria de solos.
- NORMA DNER-ME 093 / 94, processo no 20100018769/94-4. Densidade real dos Grãos

- NACCI, D., SCHNAID, F., ALMEIDA, R. Q., COUTINHO, R. Q., 2003. *Perspectivas de Aplicação do Cone Resistivo*. Nos anais do 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia ambiental, v .1, Porto Alegre, Maio.
- NACCI, D., GAMBIM, R. L., SCHNAID, F., 2003. *Propriedades Elétricas de Solos Contaminados*. Nos anais do 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia ambiental, v. 1, Porto Alegre, Maio.
- NACCI, D. (2004). Projeto, concepção e aplicação de um cone resistivo , Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre R.S.
- KELLER, G., FRISCHKNECT, F., 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press , New York, N.Y., U.S.A
- OLIVEIRA FILHO, W. L., 1978. *Considerações sobre Ensaio triaxiais em Areias*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- RITTER, B., 1998. *Efeito da Salinidade na Difusão e na Sorção de alguns Íons Inorgânicos em um Solo Argiloso Saturado*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- ROBERTSON, P. K., LUNNE, T., POWELL, J. J. M., 1998. *Geo-environmental Applications of Penetration Testing*. Robertson and Mayne (editors) Geotechnical Site Characterization. pp35-47. Balkema, Rotterdam.
- SANTOS, A.C. B. (2001) Avaliação do acréscimo de polímeros na disposição de sedimentos dragados. Tese de mestrado. Departamento de Engenharia civil, COPPE-UFRJ, R.J., Rio de Janeiro, Brasil
- SCHNAID, F. 2000, *Ensaio de Campo*. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, S.P., Brasil.

- SERZEDELO DE ALMEIDA, J. L. D. S. 1999. *Análise da Contaminação dos Sedimentos de Dragagem do Canal do Fundão*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, COPPE-UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUZA, A. C (2001) Investigação geoambiental em solos argilosos contaminados por resíduo de petróleo. Tese de mestrado. Departamento de Engenharia civil, COPPE-UFRJ, R.J., Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUZA SANTOS, P. S., 1975. *Tecnologia das Argilas Brasileiras*, v. 1 Fundamentos. Ed Edgard Blucher. São Paulo, S.P., Brasil.
- SUMI, F., 1965. Prospecting for non metallic minerals by induced polarization. *Geophys. Prosp.* Vol 13 no 4, pp 603-616
- TIPPLER P. A., 1999. Física: eletricidade, eletromagnetismo e ótica. Vol 2. Ed Livros técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, Brasil
- VACQUIER, V., Holmes, C. R., KINTZINGER, P. R., LAVERGNE, M, 1957. Prospecting for groundwater by induced electrical polarization. *Geophysics*, vol 22 pp 660-687.
- VARGAS , M., 1977. Introdução à mecânica dos solos. Ed. Universidade de São Paulo, São Paulo, S.P., Brasil.
- WATABE, T., TSUCHIDA, T., TANAKA. M., ODA, Y., SAKAI, Y., 2002. *Geo-environmental Cone Penetrometer With Efficient Ground water Sampling*. In Proceedings of the 4th Conference on Environmental Geotechnics (4th ICEG), v. 1, pp 71-76 Rio de Janeiro, Brasil, Octobre.
- WEEMES, I. A.,1990. *Development of an Electrical Resistivity Cone for Ground water Contamination Studies*. Master Thesis, Department of Civil Engineering The University of British Columbia, Vancouver, BC.
- WILLIAM, E. K., 1985. *Electrical resistivity for Estimating Ground-Water Recharge*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 3 n. 2, pp 177-180

Anexo 1.1- Determinação da densidade real dos grãos

Areia de São Francisco

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PICNÔMETRO N ⁰		2	7	4	
TEMPERATURA DA ÁGUA E SOLO (°C)	T	26	26	26	
CÁPSULA N ⁰					
PICNÔMETRO + SOLOSECO		37,15	37,16	38,26	
PICNÔMETRO		25,97	26,59	26,05	
PICNÔMETRO + ÁGUA	W _w	83,06	83,06	82,33	
PICNÔMETRO + SOLO + ÁGUA	W _{ws}	90,03	89,62	89,92	
SOLO SECO (g)	W _s	11,18	10,57	12,21	
ÁGUA DESLOCADA (W _s + W _w - W _{ws})		4,21	4,01	4,62	
FATOR DE CORREÇÃO	K	0,9968	0,9968	0,9968	
DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	G _s	2,647	2,627	2,634	
W _s . K / (W _s + W _w - W _{ws})	MÉDIA	2,636			

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

CÁPSULA N ⁰		835	626	620			
CÁPSULA + SOLO UMIDO		41,85	52,44	45,7			
CÁPSULA + SOLO SECO		41,82	52,42	45,69			
ÁGUA	W _w	0,03	0,02	0,01			
CÁPSULA		13,5	12,49	12,18			
SOLO SECO	W _s	28,32	39,93	33,51			
UMIDADE (%)	W	0,0011	0,000501	0,0003	0,06%		

Anexo 1.2- Determinação da densidade real dos grãos

Areia de Itaipuaçu

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PICNÔMETRO N ⁰		1	5	3	
TEMPERATURA DA ÁGUA E SOLO (°C)	T	26	26	26	
CÁPSULA N ⁰					
PICNÔMETRO + SOLOSECO		45,18	36,07	39,07	
PICNÔMETRO		32,05	26,68	26,96	
PICNÔMETRO + ÁGUA	W _w	85,53	82,67	83,57	
PICNÔMETRO + SOLO + ÁGUA	W _{ws}	93,73	88,54	91,13	
SOLO SECO (g)	W _s	13,13	9,39	12,11	
ÁGUA DESLOCADA (W _s + W _w - W _{ws})		4,93	3,52	4,55	
FATOR DE CORREÇÃO	K	0,9968	0,9968	0,9968	
DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	G _s	2,655	2,659	2,653	
W _s . K / (W _s + W _w - W _{ws})	MÉDIA	2,656			

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

CÁPSULA N ⁰		866	577	507			
CÁPSULA + SOLO UMIDO		45,17	42,25	35,78			
CÁPSULA + SOLO SECO		45,12	42,23	35,76			
ÁGUA	W _w	0,05	0,02	0,02			
CÁPSULA		13,08	13,4	12,81			
SOLO SECO	W _s	32,04	28,83	22,95			
UMIDADE (%)	W	0,0016	0,000694	0,0009	0,10%		

Anexo 1.3- Determinação da densidade real dos grãos

Areia de São Francisco misturada com a de Itaipuaçu

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PICNÔMETRO N ⁰		52	51	3	
TEMPERATURA DA ÁGUA E SOLO (°C)	T	26	26	26	
CÁPSULA N ⁰					
PICNÔMETRO + SOLOSECO		165,64	168,37	172,22	
PICNÔMETRO		90,57	95,92	96,96	
PICNÔMETRO + ÁGUA	W _w	592,28	596,16	597,78	
PICNÔMETRO + SOLO + ÁGUA	W _{ws}	639,08	641,43	644,72	
SOLO SECO (g)	W _s	75,07	72,45	75,26	
ÁGUA DESLOCADA (W _s + W _w - W _{ws})		28,27	27,18	28,32	
FATOR DE CORREÇÃO	K	0,9968	0,9968	0,9968	
DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	G _s	2,647	2,657	2,649	
W _s . K / (W _s + W _w - W _{ws})	MÉDIA	2,651			

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

CÁPSULA N ⁰		835	626	620			
CÁPSULA + SOLO UMIDO		41,85	52,44	45,7			
CÁPSULA + SOLO SECO		41,82	52,42	45,69			
ÁGUA	W _w	0,03	0,02	0,01			
CÁPSULA		13,5	12,49	12,18			
SOLO SECO	W _s	28,32	39,93	33,51			
UMIDADE (%)	W	0,0011	0,000501	0,0003	0,06%		

Anexo 1.4- Determinação da densidade real dos grãos

Areia de São Francisco misturada com conchas

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PICNÔMETRO N ⁰		21	14	G	
TEMPERATURA DA ÁGUA E SOLO (°C)	T	26	26	26	
CÁPSULA N ⁰					
PICNÔMETRO + SOLOSECO		212,65	175,33	191,56	
PICNÔMETRO		136,43	103,95	110,17	
PICNÔMETRO + ÁGUA	W _w	625,11	605,71	605,23	
PICNÔMETRO + SOLO + ÁGUA	W _{ws}	673,13	650,73	656,49	
SOLO SECO (g)	W _s	76,22	71,38	81,39	
ÁGUA DESLOCADA (W _s + W _w - W _{ws})		28,20	26,36	30,13	
FATOR DE CORREÇÃO	K	0,9968	0,9968	0,9968	
DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	G _s	2,694	2,699	2,693	
W _s . K / (W _s + W _w - W _{ws})	MÉDIA	2,695			

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

CÁPSULA N ⁰		901	877	771			
CÁPSULA + SOLO UMIDO		43,74	43,36	38,21			
CÁPSULA + SOLO SECO		43,71	43,33	38,18			
ÁGUA	W _w	0,03	0,03	0,03			
CÁPSULA		13,24	13,95	12,18			
SOLO SECO	W _s	30,47	29,38	26			
UMIDADE (%)	W	0,001	0,001021	0,0012	0,11%		

Anexo 1.5- Determinação da densidade real dos grãos

Caulim

DENSIDADE REAL DOS GRÃOS

PICNÔMETRO N ⁰		d	c	18	
TEMPERATURA DA ÁGUA E SOLO (°C)	T	26	26	26	
CÁPSULA N ⁰					
PICNÔMETRO + SOLOSECO		186,59	182,61	175,51	
PICNÔMETRO		116,49	114,26	104,81	
PICNÔMETRO + ÁGUA	W _w	611,51	609,77	597,36	
PICNÔMETRO + SOLO + ÁGUA	W _{ws}	656,23	653,38	642,51	
SOLO SECO (g)	W _s	70,10	68,35	70,70	
ÁGUA DESLOCADA (W _s + W _w - W _{ws})		25,38	24,74	25,55	
FATOR DE CORREÇÃO	K	0,9968	0,9968	0,9968	
DENSIDADE REAL DOS GRÃOS	G _s	2,753	2,754	2,758	
W _s . K / (W _s + W _w - W _{ws})	MÉDIA	2,755			

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE

CÁPSULA N ⁰		866	577	507			
CÁPSULA + SOLO UMIDO		45,17	42,25	35,78			
CÁPSULA + SOLO SECO		45,12	42,23	35,76			
ÁGUA	W _w	0,05	0,02	0,02			
CÁPSULA		13,08	13,4	12,81			
SOLO SECO	W _s	32,04	28,83	22,95			
UMIDADE (%)	W	0,0016	0,000694	0,0009	0,10%		

Anexo 2.1- Determinação dos índices físicos

Areia de São Francisco

	pesos medidos					funil (mm)	média
peso total (g)	9659,7	9607,7	9645,5	9680,5	9691,3	21	23799,24
	9560,5	9530,2	9544	9452,8	9713		
	4655,8	4664,6	4497,2	4709,2	4384,2		
	23876	23802,5	23686,7	23842,5	23788,5		
peso total (g)	9717,2	9661,6	9556	9615,7	9697,6	18	24207,14
	9661,3	9386,6	8228,1	7401,6	7337,8		
	4936,2	5108,2	6605,7	7013,2	7108,9		
	24314,7	24156,4	24389,8	24030,5	24144,3		
peso total (g)	9580,3	9611,7	9589,8	9578,7	9583,3	50	21917,76
	8107,2	8140,3	8500,1	8119,5	8137,1		
	4252,9	4324,8	3766,1	4157,4	4139,6		
	21940,4	22076,8	21856	21855,6	21860		
peso total (g)	9533,8	9499,5	9949,2	9435,4	9420,2	6,5	25306,16
	9520,9	9660,1	9157,1	8515,4	7223,9		
	6182,6	6209,5	6206,4	7365,3	8651,5		
	25237,3	25369,1	25312,7	25316,1	25295,6		

densidade real dos grãos: 2,636

índices de vazios medidos:							média
$\phi = 50\text{mm}$	e1 =	0,74	0,73	0,75	0,75	0,75	0,746
$\phi = 21\text{mm}$	e2 =	0,60	0,61	0,62	0,60	0,61	0,608
$\phi = 18\text{mm}$	e3 =	0,57	0,58	0,57	0,59	0,58	0,581
$\phi = 6.5\text{mm}$	e4 =	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,512
peso específico medido							
$\phi = 50\text{mm}$	γ_1	14,95	15,04	14,89	14,89	14,89	14,932
$\phi = 21\text{mm}$	γ_2	16,27	16,22	16,14	16,24	16,21	16,214
$\phi = 18\text{mm}$	γ_3	16,57	16,46	16,62	16,37	16,45	16,492
$\phi = 6.5\text{mm}$	γ_4	17,19	17,28	17,25	17,25	17,23	17,241
porosidade medida							
$\phi = 50\text{mm}$	n1	0,43	0,42	0,43	0,43	0,43	0,427
$\phi = 21\text{mm}$	n2	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,378
$\phi = 18\text{mm}$	n3	0,36	0,37	0,36	0,37	0,37	0,367
$\phi = 6.5\text{mm}$	n4	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,339

Anexo 2.2- Determinação dos índices físicos

Areia de Itaipuaçu

	pesos medidos					funil (mm)	média (g)
	7704,1	7028,6	7210	7284	6833,4	50	25472,18
	6998,4	6601,8	6580,8	7028	7055,4		
	10464,1	12051,4	11467,4	11273,4	6331,8		
					5448,3		
peso total (g)	25166,6	25681,8	25258,2	25585,4	25668,9		
	6377	7437,9	6509,6	6602,9	6767,1	21	27023,54
	6794,6	6833,8	6829,4	6347,8	6838,7		
	7351,6	6451	6874,8	6878,5	6967		
	6556,6	6235	6849,7	7221,6	6393,1		
peso total (g)	27079,8	26957,7	27063,5	27050,8	26965,9		
	7014,6	7214	5694,2	6758	5535,2	6,5	27430,08
	7087	6911,4	6007,7	7367,4	6166,7		
	8085,8	6841,9	6354	6583,9	5565,4		
	5218,8	6452,5	9414,7	6699,5	10177,7		
peso total (g)	27406,2	27419,8	27470,6	27408,8	27445		

densidade real dos grãos: 2,656

Índices de vazios medidos:							média
$\phi = 50\text{mm}$	e1 =	0,532	0,501	0,526	0,507	0,502	0,514
$\phi = 21\text{mm}$	e2 =	0,424	0,430	0,425	0,425	0,430	0,427
$\phi = 6.5\text{mm}$	e4 =	0,407	0,406	0,404	0,407	0,405	0,405
Peso específico medido:							
$\phi = 50\text{mm}$	g1	17,15	17,50	17,21	17,43	17,49	17,28
$\phi = 21\text{mm}$	g2	18,45	18,37	18,44	18,43	18,37	18,42
$\phi = 6.5\text{mm}$	g3	18,67	18,68	18,72	18,67	18,70	18,69
Porosidade medida							
$\phi = 50\text{mm}$	n1	0,35	0,33	0,34	0,34	0,33	0,342
$\phi = 21\text{mm}$	n2	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,299
$\phi = 6.5\text{mm}$	n3	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,289

Anexo 4.2- Determinação dos índices físicos

Areia de São Francisco misturada com a de Itaipuaçu

pesos medidos			funil (mm)	média (g)
7453,3	7347,3	7870,3	50	25181,5
7662	7585	7561,8		
7131,8	6342,1	4908,7		
2952	3902,2	4828		
peso total (g)	25199,1	25176,6	25168,8	
7430,1	6364,8	7774,5	21	27097,9667
6315,3	6244	6676,3		
5705,5	5578	5351,3		
7650,9	8913,7	7289,5		
peso total (g)	27101,8	27100,5	27091,6	
7458,8	7535,1	7779,8	6,5	27704,9333
7447,3	7728,5	7448,2		
6322,2	7543,4	7496,9		
6449,1	4958,9	4946,6		
peso total (g)	27677,4	27765,9	27671,5	

densidade real dos grãos: 2,651

Índices de vazios medidos:					média
$\phi = 50\text{mm}$	e1 =	0,527	0,529	0,529	0,528
$\phi = 21\text{mm}$	e2 =	0,420	0,420	0,420	0,420
$\phi = 6.5\text{mm}$	e4 =	0,390	0,386	0,391	0,389
Peso específico medido:					
$\phi = 50\text{mm}$	$\gamma_1 =$	17,17	17,15	17,15	17,156
$\phi = 21\text{mm}$	$\gamma_2 =$	18,46	18,46	18,46	18,462
$\phi = 6.5\text{mm}$	$\gamma_3 =$	18,86	18,92	18,85	18,875
Porosidade medida					
$\phi = 50\text{mm}$	n1 =	0,35	0,35	0,35	0,346
$\phi = 21\text{mm}$	n2 =	0,30	0,30	0,30	0,296
$\phi = 6.5\text{mm}$	n3 =	0,28	0,28	0,28	0,280

Anexo 2.3- Determinação dos índices físicos

Areia de São Francisco misturada com conchas

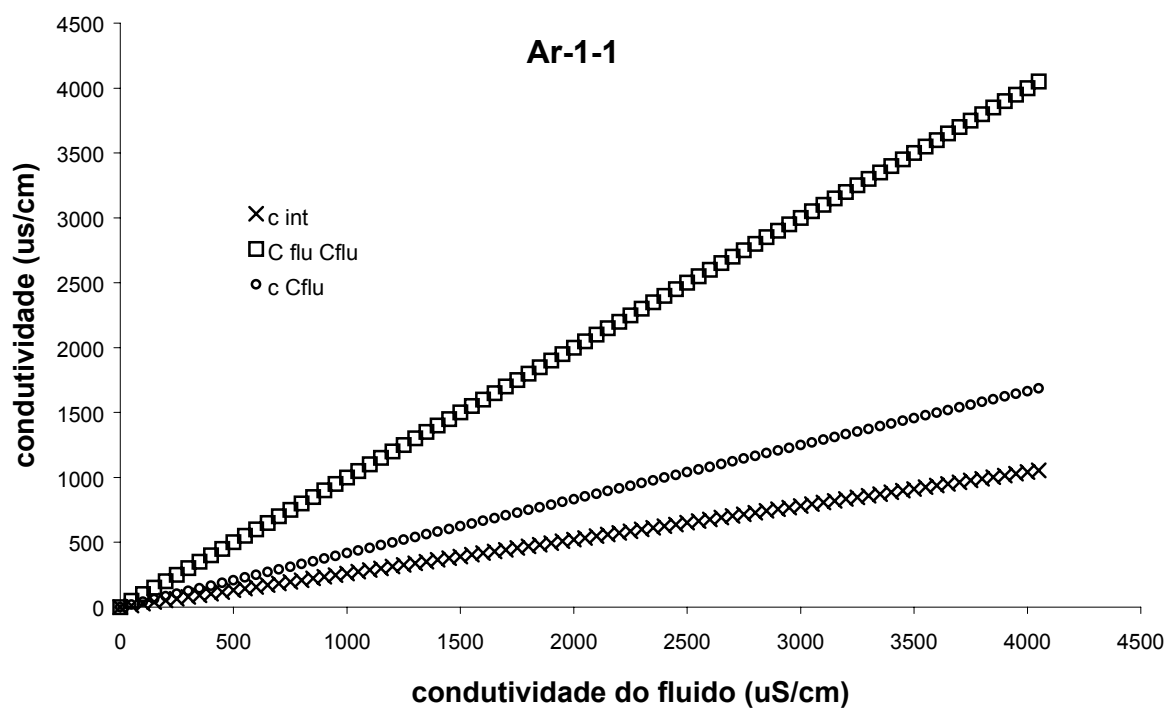
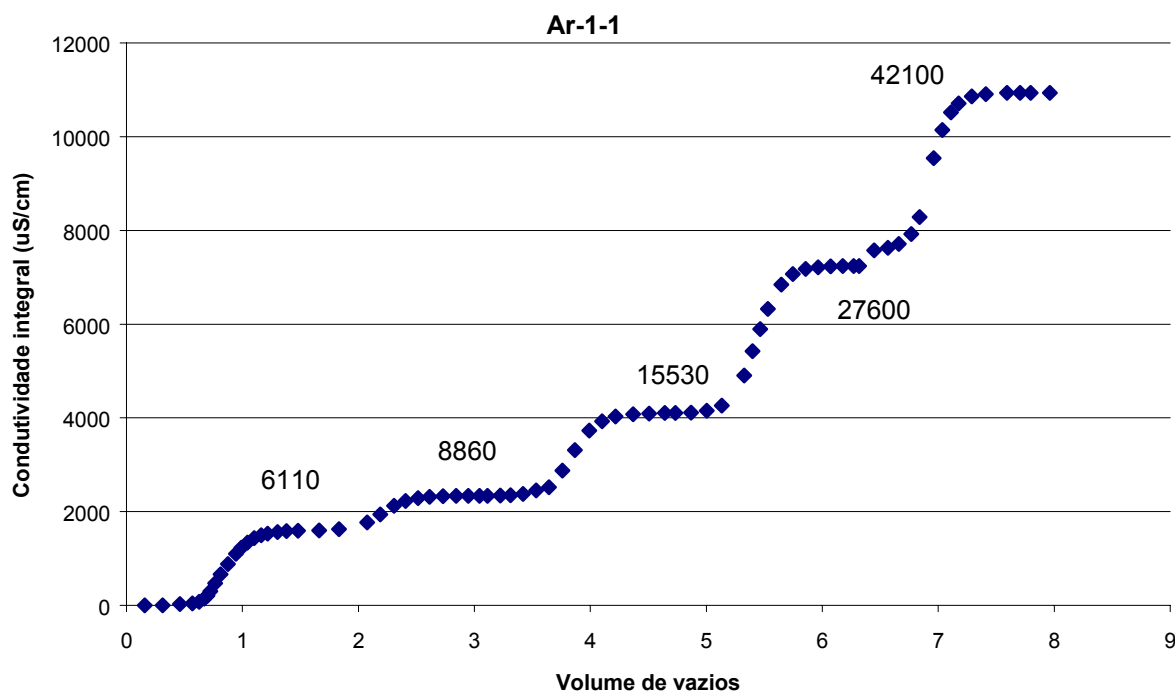
	pesos medidos			funil (mm)	média
	5223,6	4882,2	5161,4	21	8315,067
	6387,3	5863,8	5609		
	5042	5667,2	5505,4		
	8068,9	8353,2	8523,1		
peso total (g)	24721,8	24766,4	24798,9		

densidade real dos grãos:	2,695
---------------------------	-------

índices de vazios medidos:				média
$\phi = 21\text{mm}$	$e_2 =$	0,582	0,580	0,578
				0,580
peso específico medido				
$\phi = 21\text{mm}$	g_2	16,84	16,87	16,90
				16,870
porosidade medida				
$\phi = 21\text{mm}$	n_2	0,368	0,367	0,366
				0,367

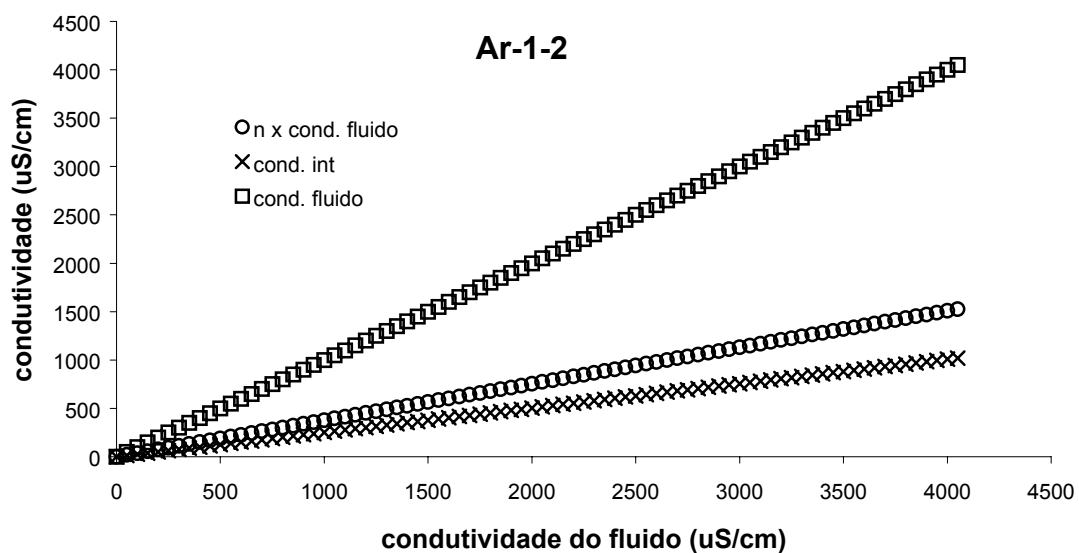
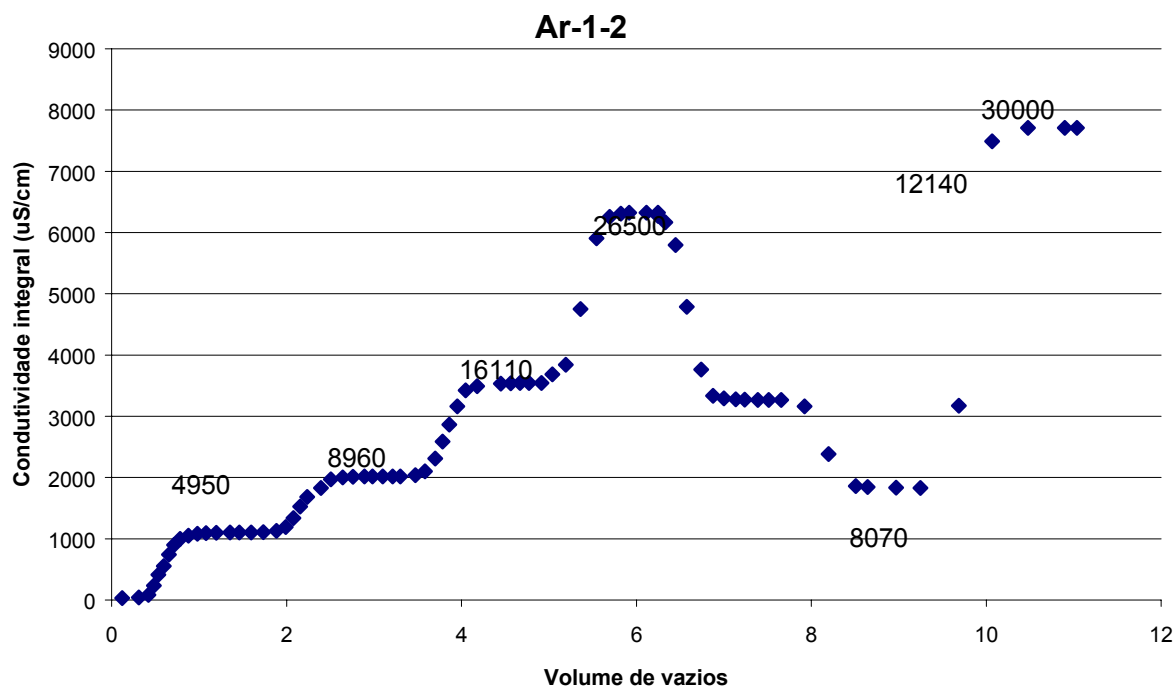
Anexo 3.1a- Resultados dos ensaios com

Areia de São Francisco (n=0,427)



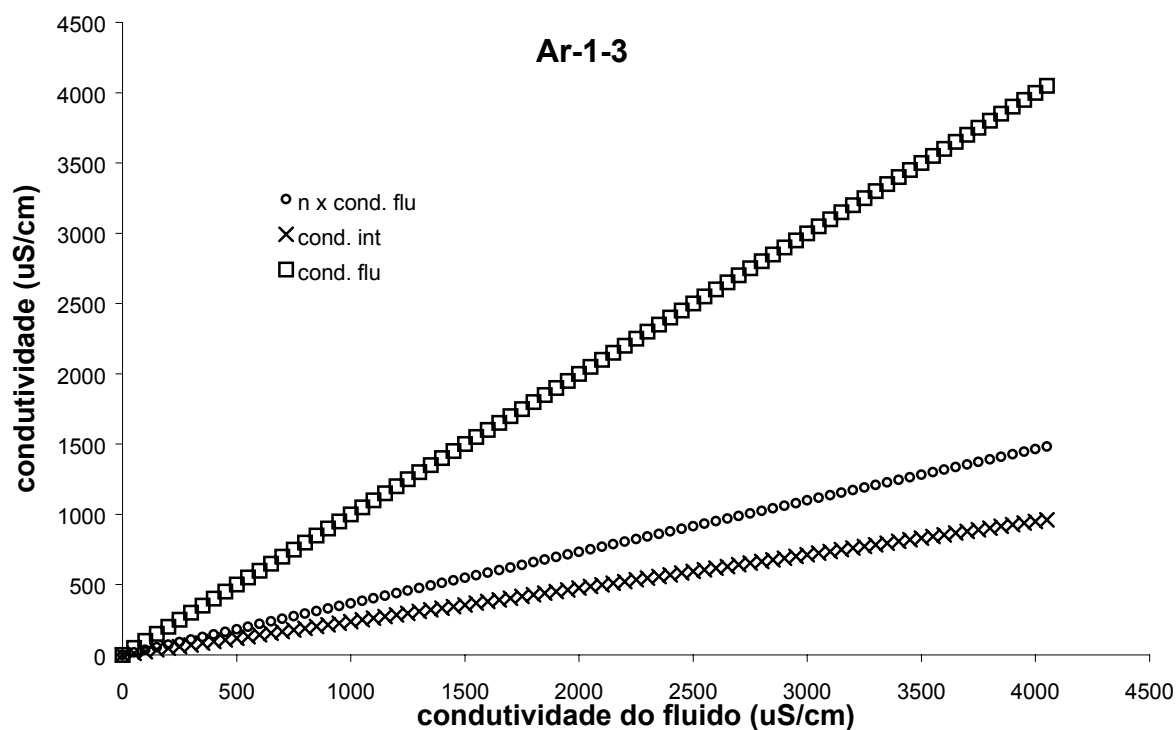
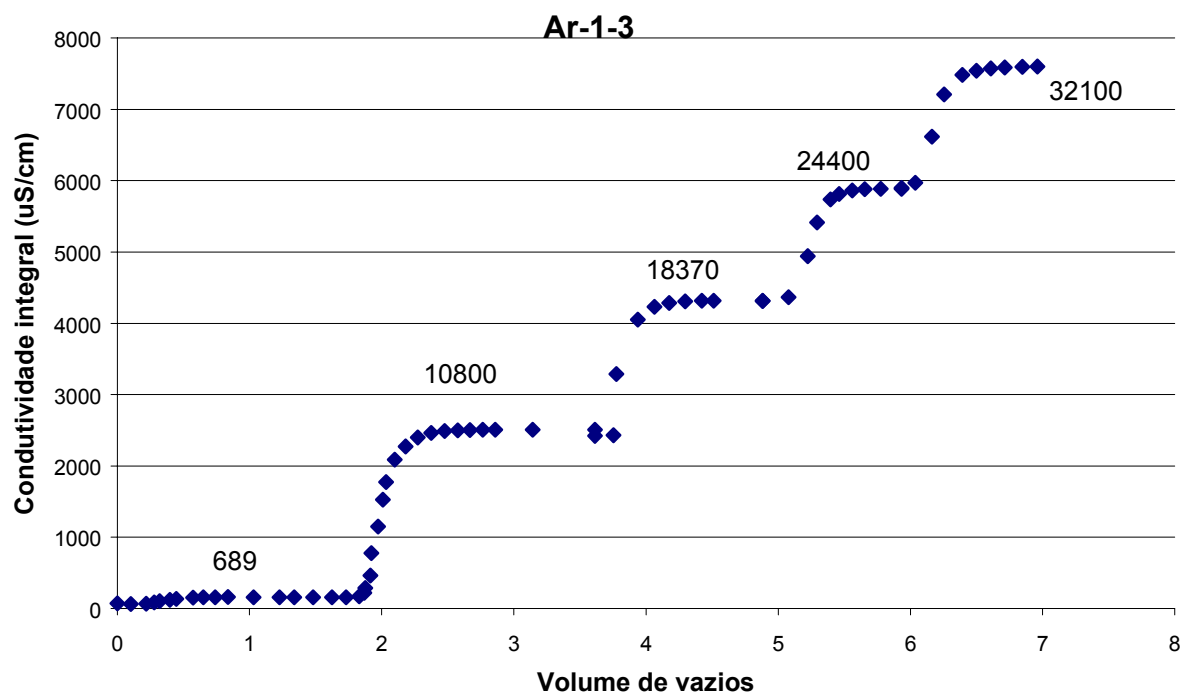
Anexo 3.1b- Resultados dos ensaios com

Areia de São Francisco (n=0,378)

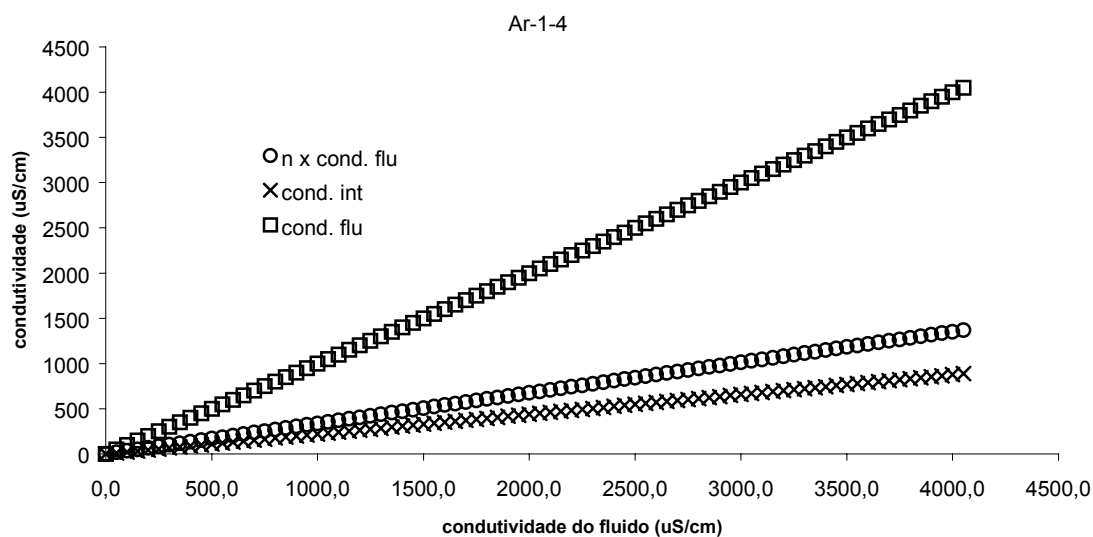
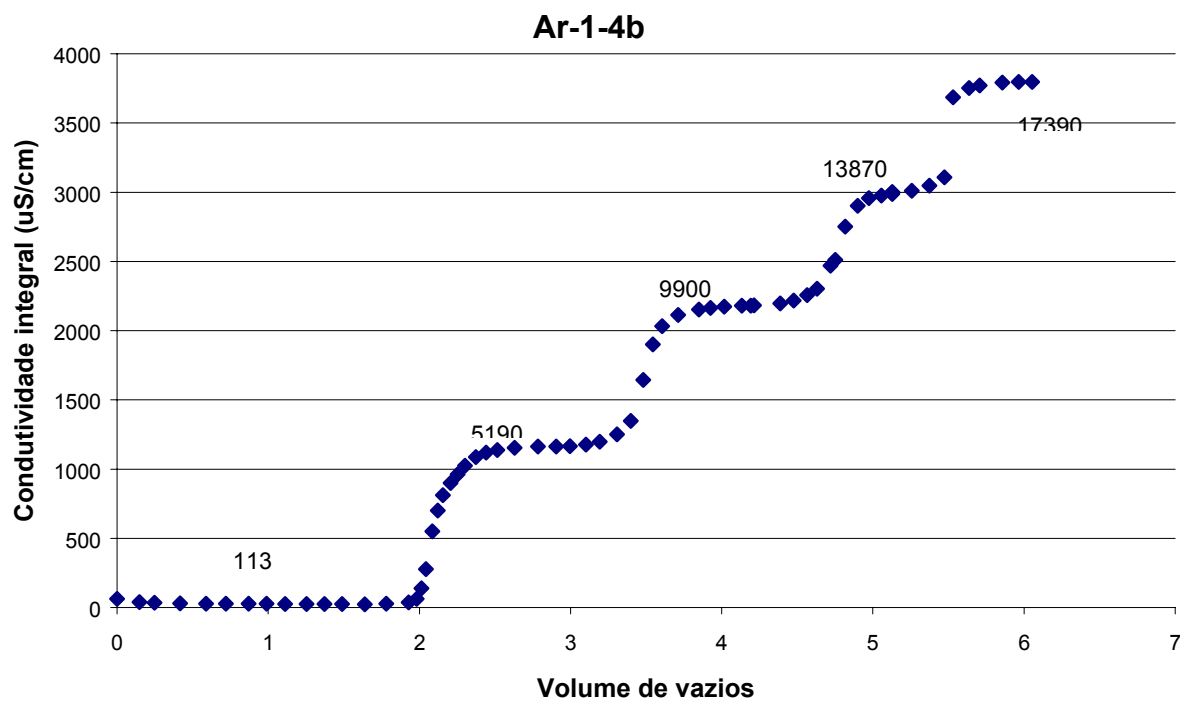


Anexo 3.1c- Resultados dos ensaios com

Areia de São Francisco (n=0,367)

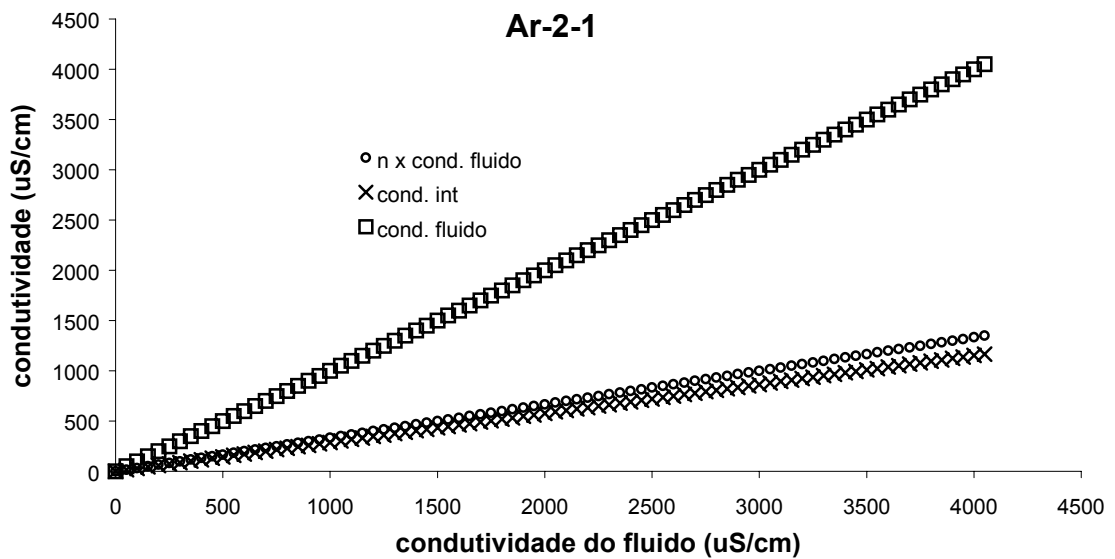
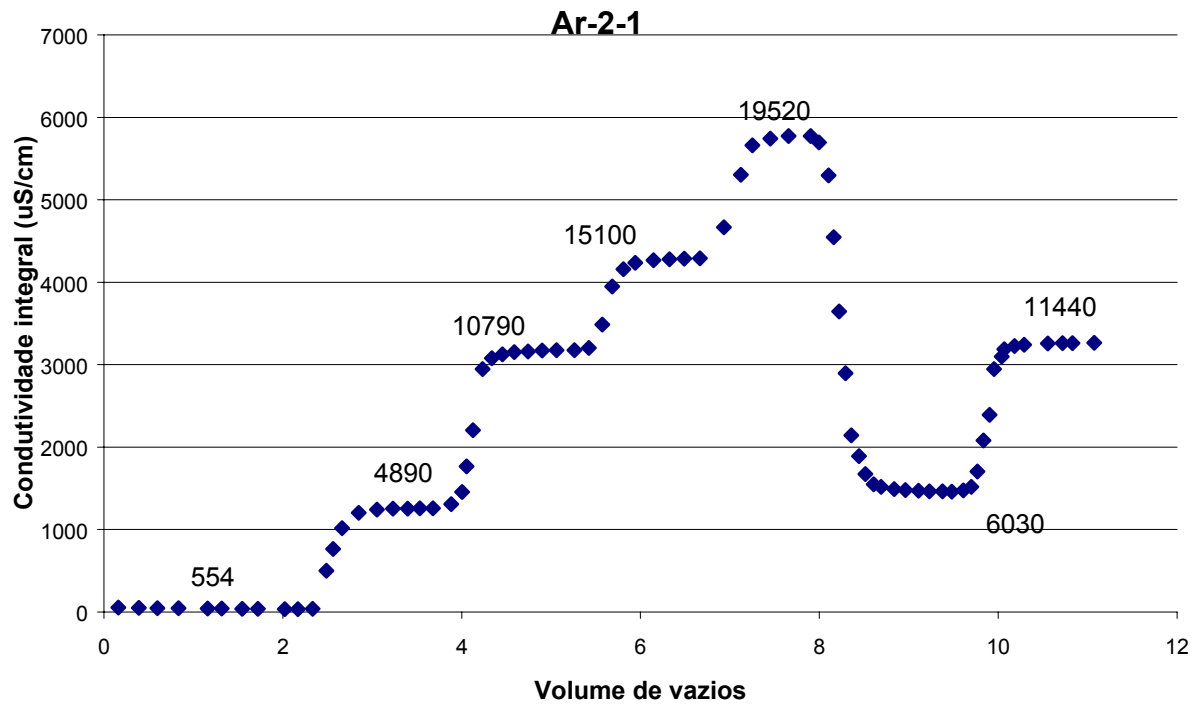


Anexo 3.1d- Resultados dos ensaios com Areia de São Francisco (n=0,339)



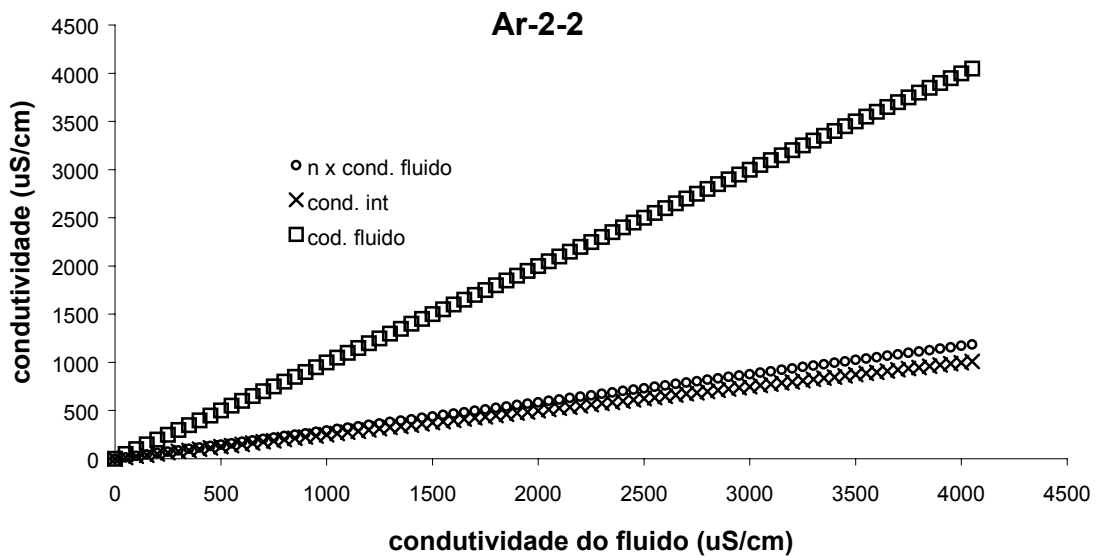
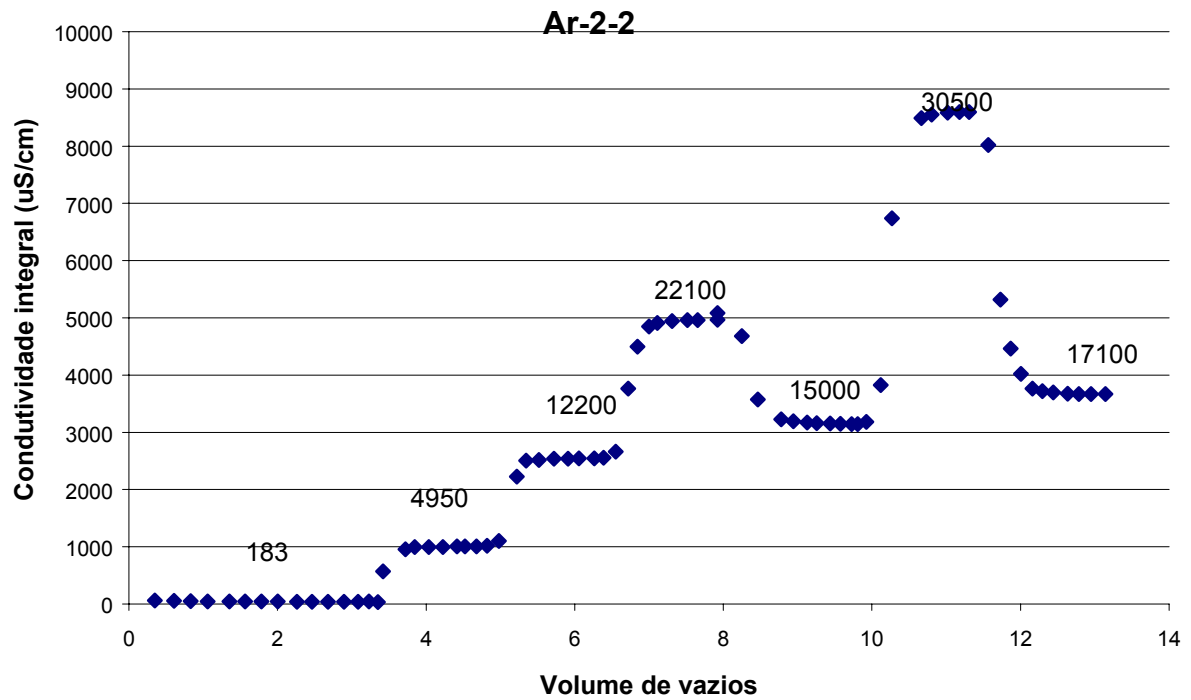
Anexo 3.2a- Resultados dos ensaios com

Areia de Itaipuaçu (n=0,342)



Anexo 3.2b- Resultados dos ensaios com

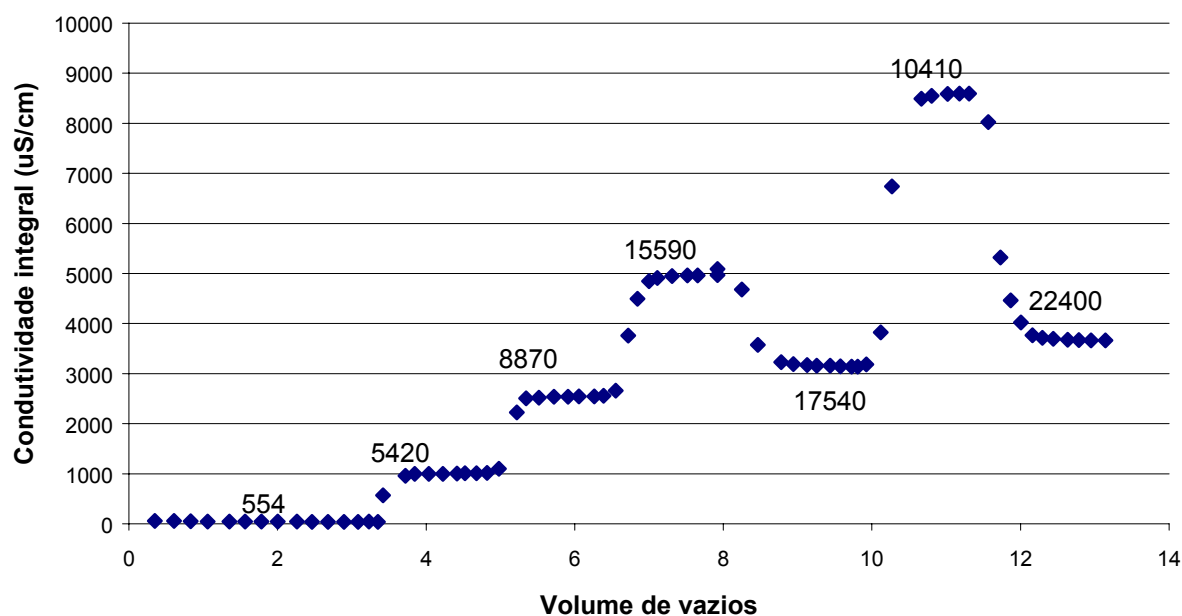
Areia de Itaipuaçu (n=0,299)



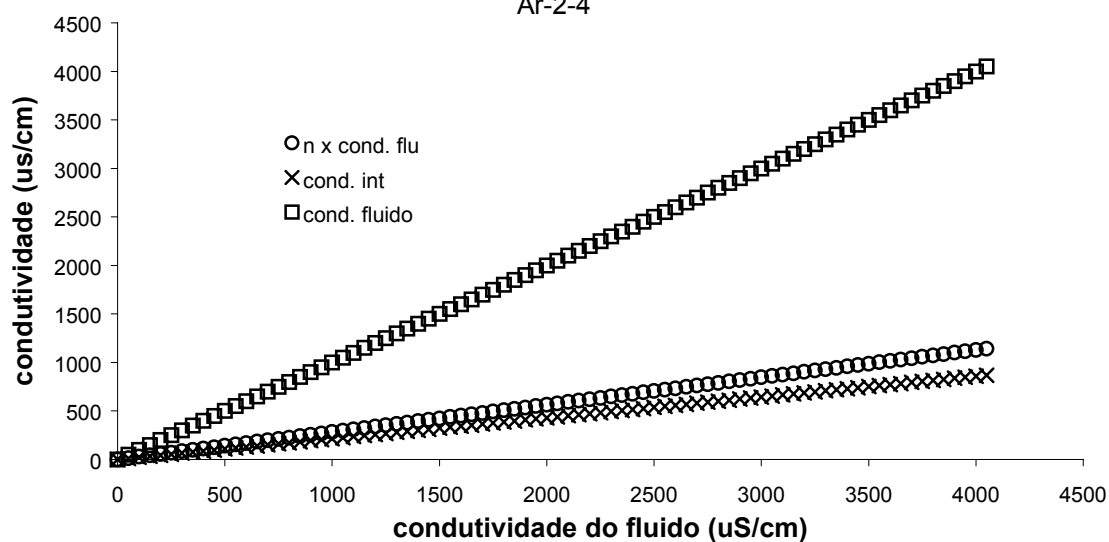
Anexo 3.2c- Resultados dos ensaios com

Areia de Itaipuaçu (n=0,289)

Ar-2-4



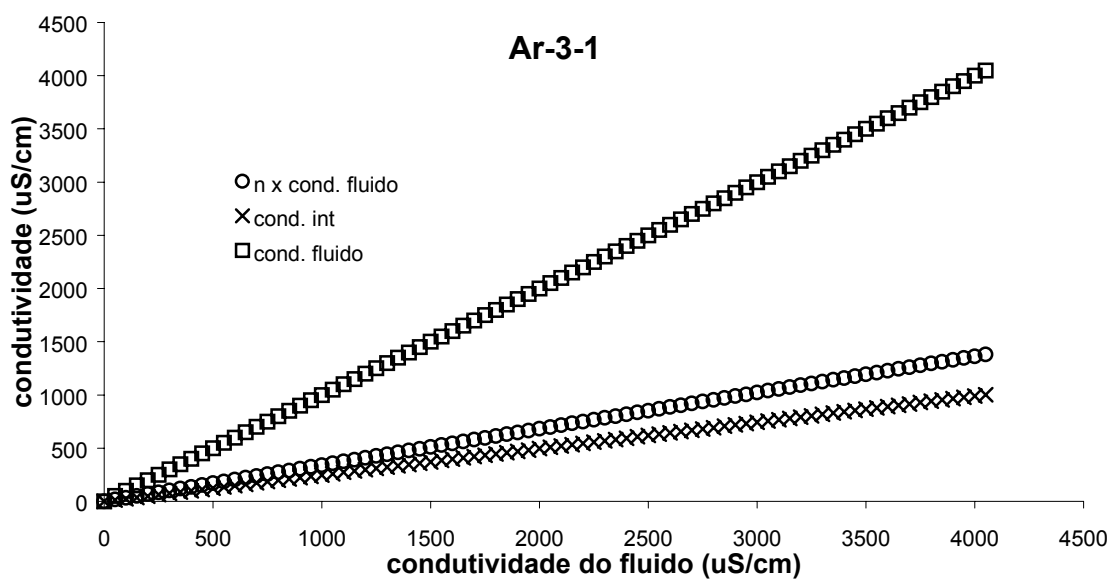
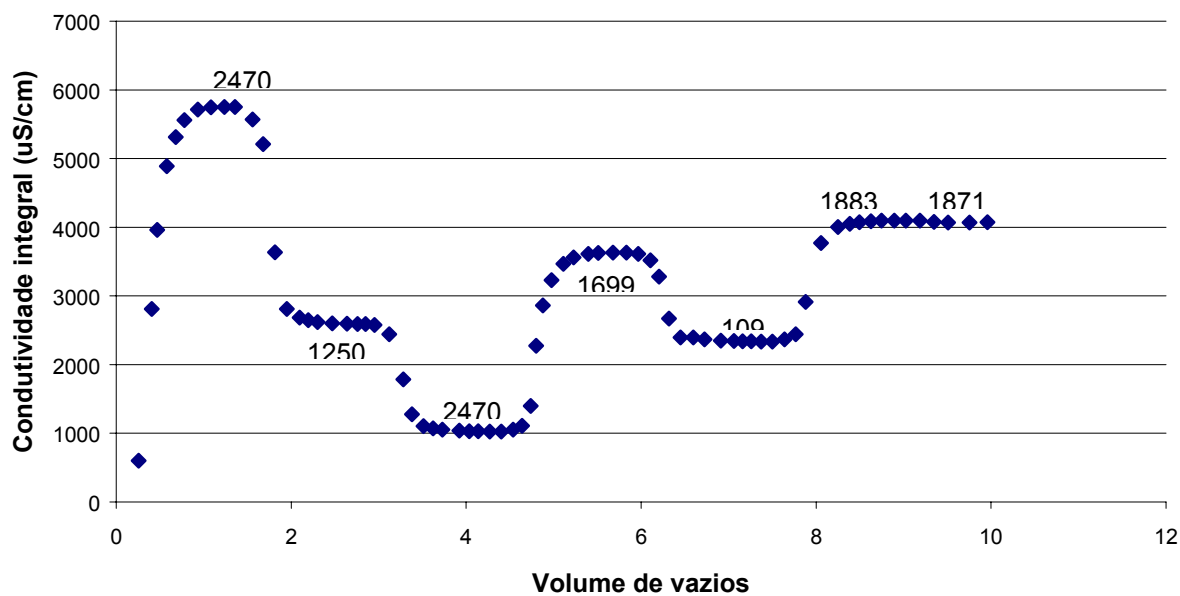
Ar-2-4



Anexo 3.3a- Resultados dos ensaios com

Areia de São Francisco misturada com a de Itaipuaçu (n=0,346)

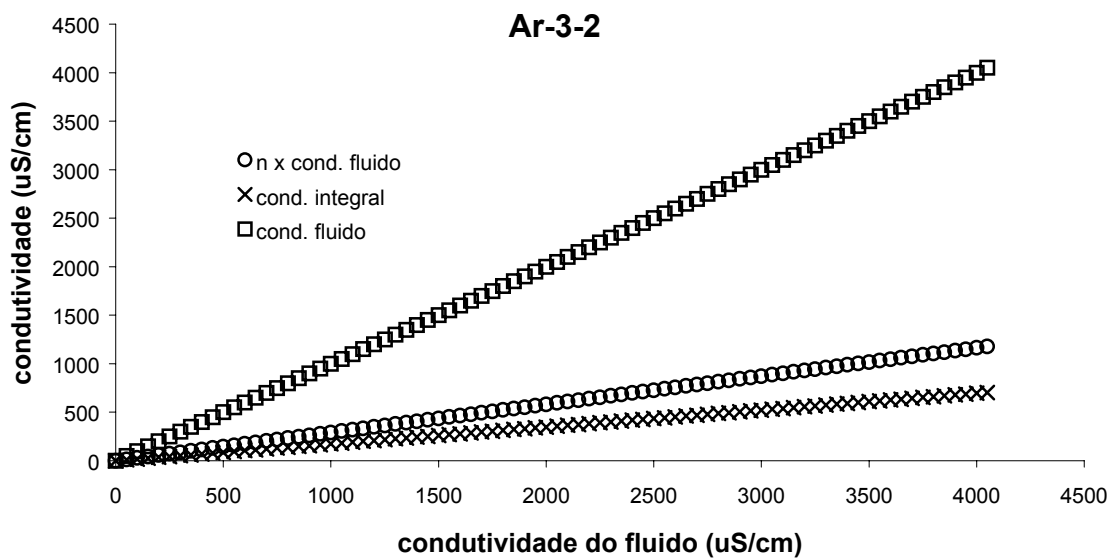
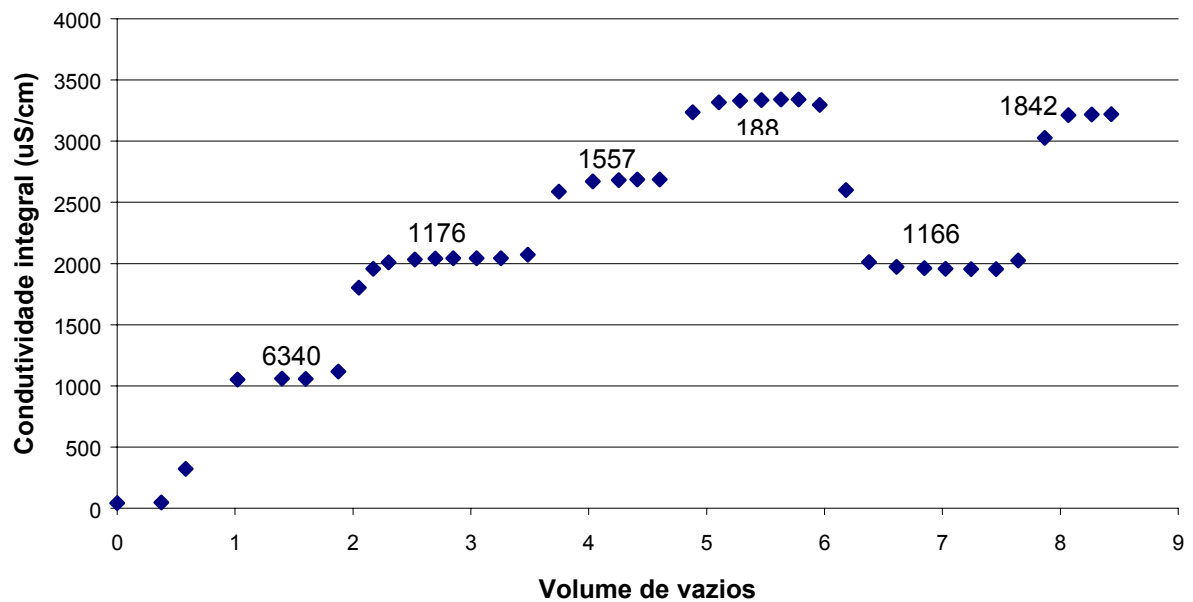
Ar-3-1



Anexo 3.3b- Resultados dos ensaios com

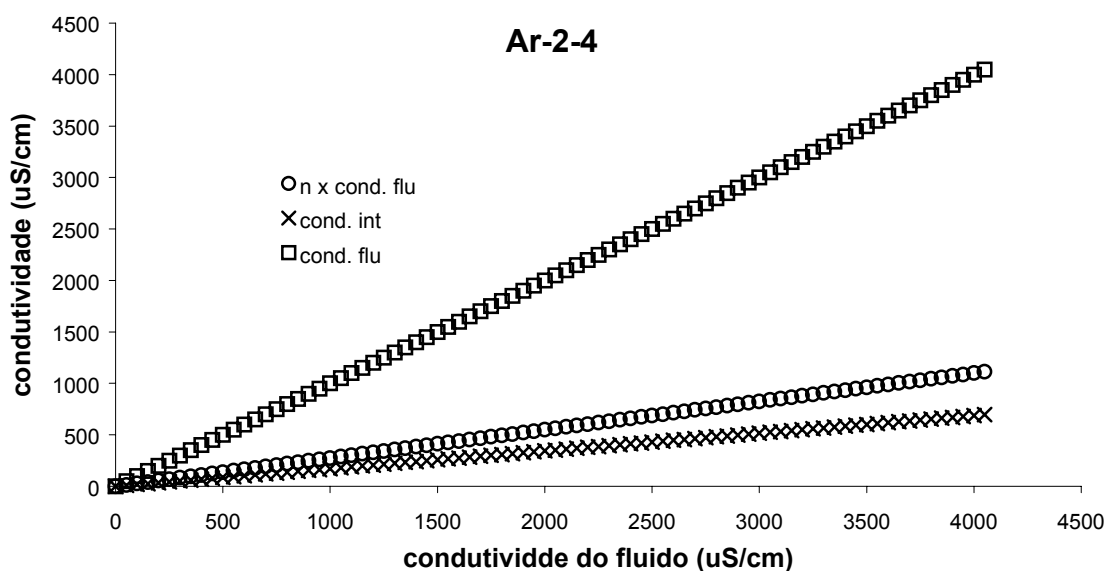
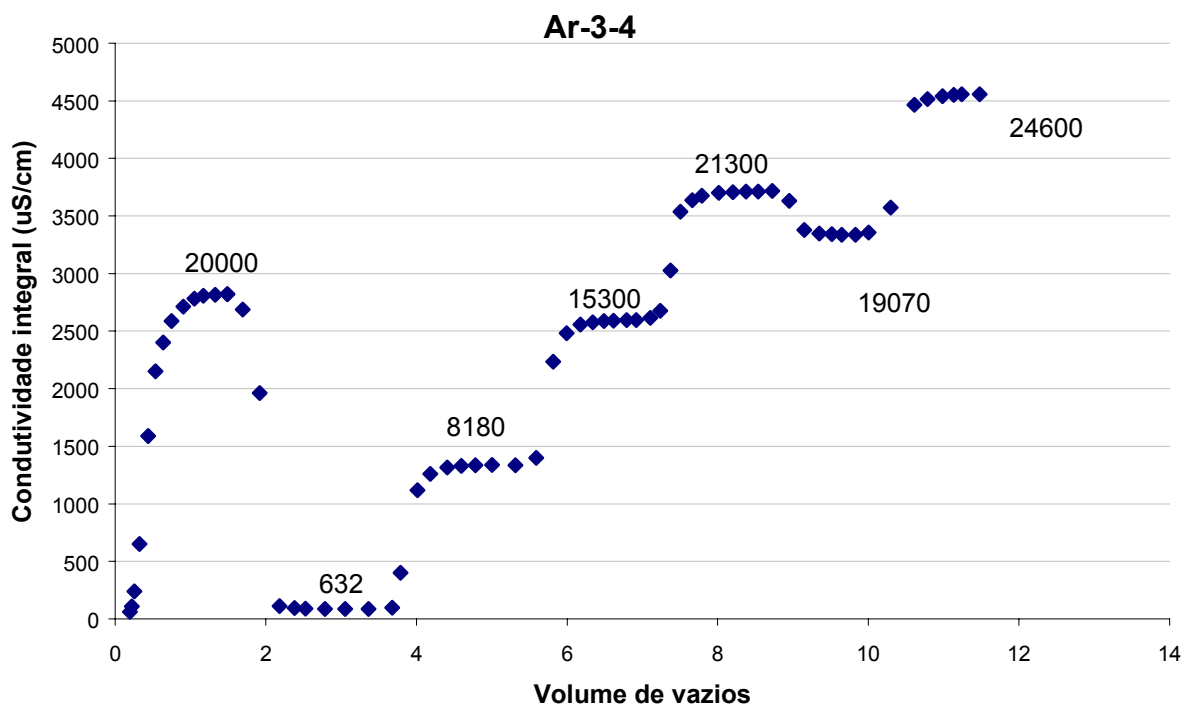
Areia de São Francisco misturada com a de Itaipuaçu (n=0,296)

Ar-3-2



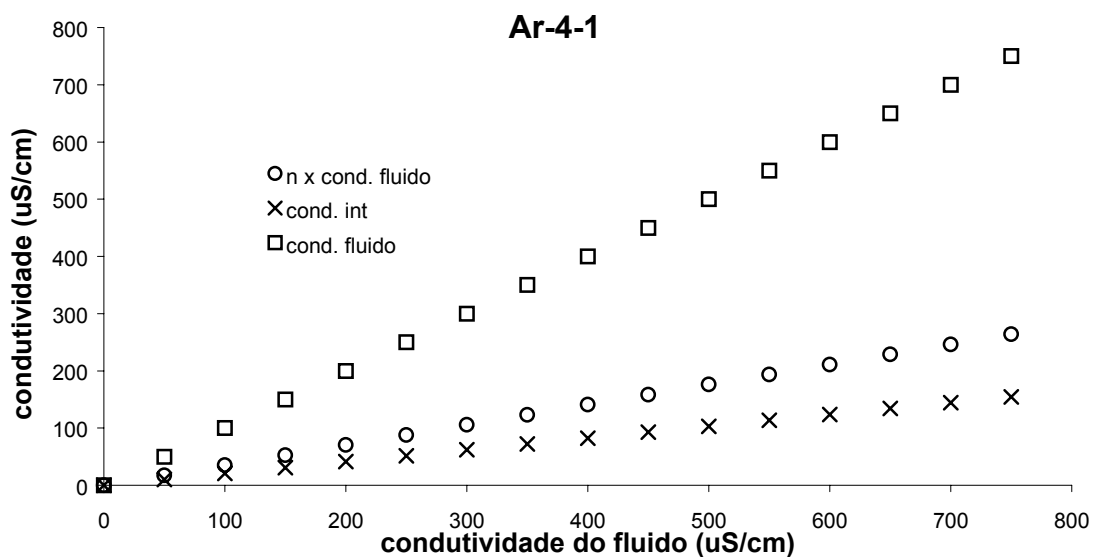
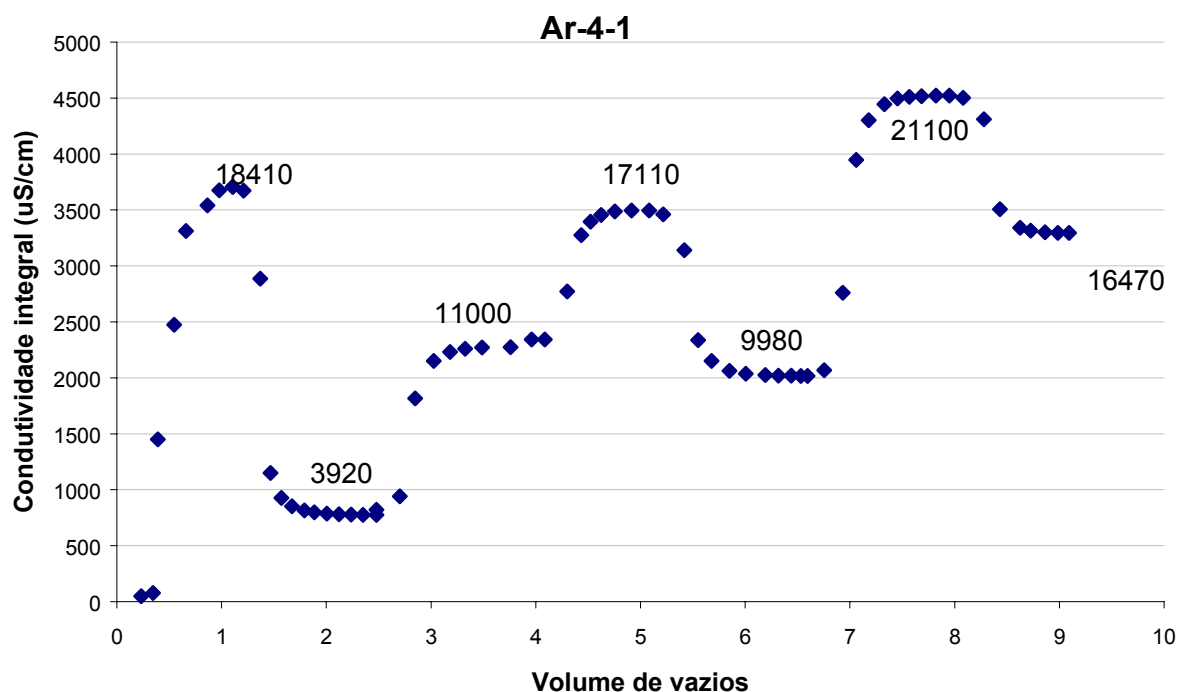
Anexo 3.3c- Resultados dos ensaios com

Areia de São Francisco misturada com a de Itaipuaçu (n=0,280)



Anexo 3.4- Resultados dos ensaios com

Areia de São Francisco misturada com conchas (n=0,367)



Anexo 4.1a- Resultados dos ensaios com

Caulim c = 3723 mg/cm³

condutividade do fluido (μS/cm): 6450
Gs 2,755

determinação da umidade					peso específico	Grau de saturação	índice de vazios	porosidade	condutividade integral (uS/cm)	FF	Ft		
Ca-1-1	Tara		peso de solo		umidade (média) 49,2% 49,4% 49,2%	Peso	47,07	93,9%	1,45	0,59	2611,50	2,47	1,46
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)		Volume	28						
	743	13,270	36,86	29,08		γ (kN/m ³)	16,47						
	667	11,990	37,47	29,04		γ_s (kN/m ³)	11,03						
	501	12,950	40,96	31,72									

Ca-1-2	Tara		peso de solo		umidade (média) 55,6% 55,1% 55,2%	Peso	55,62	90,0%	1,69	0,63	2661,50	2,42	1,52
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)		Volume	35						
	12	13,240	32,72	25,76		γ (kN/m ³)	15,57						
	771	12,170	32,30	25,15		γ_s (kN/m ³)	10,03						
	657	12,990	31,79	25,1									

Ca-1-3	Tara		peso de solo		umidade (média) 66,3% 66,8% 66,0%	Peso	62,06	97,2%	1,88	0,65	2686,50	2,40	1,57
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)		Volume	39						
	602	14,150	25,16	20,77		γ (kN/m ³)	15,59						
	f26	11,770	30,32	22,89		γ_s (kN/m ³)	9,37						
	45	11,580	27,48	21,16									

Anexo 4.1b- Resultados dos ensaios com

Caulim c = 7943 mg/cm³

condutividade do fluido (uS/cm): 13547
Gs 2,775

determinação da umidade					peso específico		Grau de saturação	índice de vazios	condutividade integral (uS/cm)	porosidade	FF	Ft
Ca-2-1 e Ca-2-1*	inicial				umidade (média)	56,5%	90,5%	1,73	5886,50	0,63	2,30	1,46
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	846	13,600	36,68	28,35								
	751	12,920	33,87	26,32								
	520	12,630	31,16	24,45								
	após 20hs				umidade (média)	56,5%	100,0%	1,39	5426,50	0,58	2,50	1,45
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	648	12,940	37,64	29,36								
	640	12,750	31,90	25,53								
	791	13,140	38,16	29,78								
Ca-2-2 e Ca-2-2*	inicial				umidade (média)	78,8%	92,2%	2,37	6161,50	0,70	2,20	1,55
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	648	12,940	25,07	19,72								
	791	13,140	28,42	21,7								
	797	12,520	28,93	21,69								
	após 20hs				umidade (média)	58,5%	100,0%	1,62	5676,50	0,62	2,39	1,48
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	642	13,550	38,21	29,1								
	647	13,100	40,85	30,45								
	510	12,760	53,19	38,51								

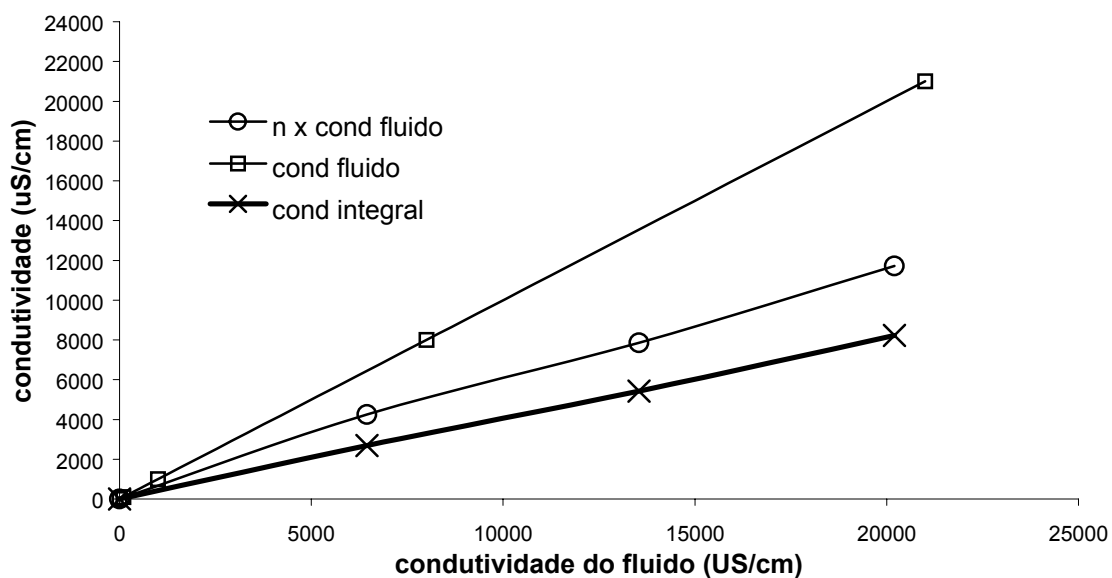
Anexo 4.1c- Resultados dos ensaios com

Caulim c = 13521 mg/cm³

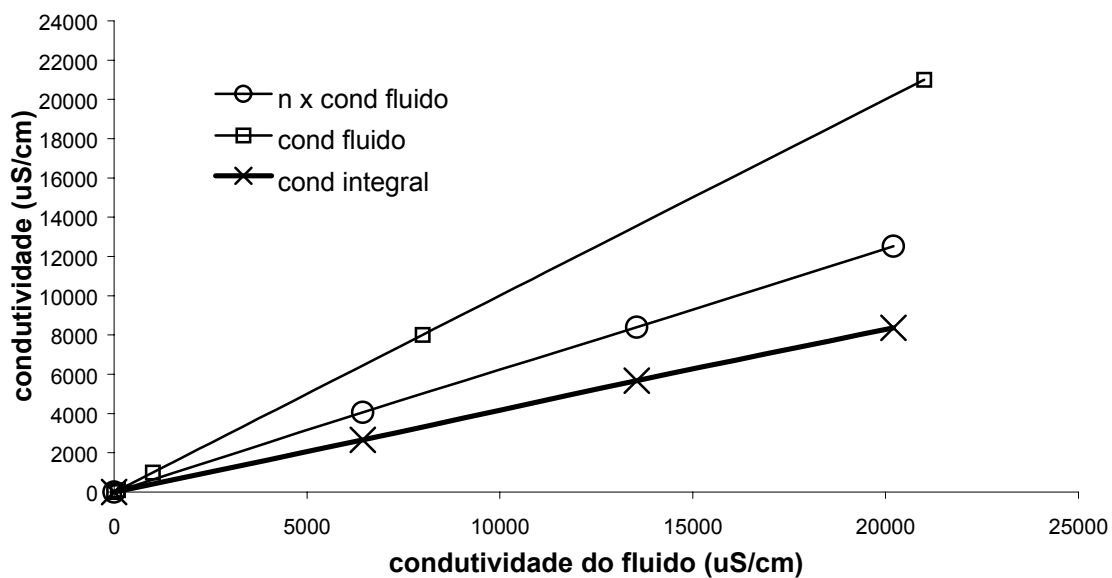
condutividade do fluido (μS/cm): 20200
Gs 2,755

determinação da umidade				peso específico	Grau de saturação	índice de vazios	condutividade integral (uS/cm)	porosidade	FF	Ft		
Ca-3-1 e Ca-3-1*	inicial				umidade (média) 62,0% 67,3% 62,8% 64,0%	Peso 35,13 Volume 23,17 γ (kN/m³) 14,86 γs(kN/m³) 9,06	89,1%	1,98	8686,50	0,66	2,33	1,55
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	718	12,040	22,65	18,59								
	841	13,140	20,00	17,24								
	569	12,520	30,87	23,79								
	após 20hs											
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	620	12,170	26,13	21,43								
Ca-3-2 e Ca-3-2*	inicial				umidade (média) 76,5% 75,9% 76,6% 76,3%	Peso 43,21 Volume 28,5 γ (kN/m³) 14,86 γs(kN/m³) 8,43	95,4%	2,20	9991,50	0,69	2,02	1,39
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	718	12,040	20,69	16,94								
	841	12,950	23,22	18,79								
	569	12,650	23,81	18,97								
	após 20hs											
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	856	13,260	30,73	24,46								
Ca-3-2 e Ca-3-2*	inicial				umidade (média) 56,0% 57,1% 57,4% 58,5%	Peso 43,21 Volume 28,5 γ (kN/m³) 14,86 γs(kN/m³) 8,43	100,0%	1,61	8371,50	0,62	2,41	1,49
	Tara		peso de solo									
	numero	peso (g)	Pw (g)	Ps(g)								
	856	13,260	30,73	24,46								
	771	12,180	24,48	20,01								
	794	12,720	27,61	22,18								

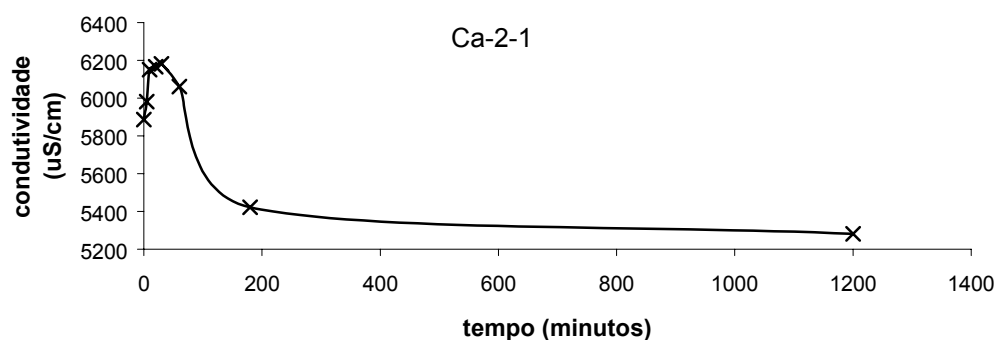
Anexo 4.2a - Resultados dos ensaios com Caulim na umidade de 50,3%



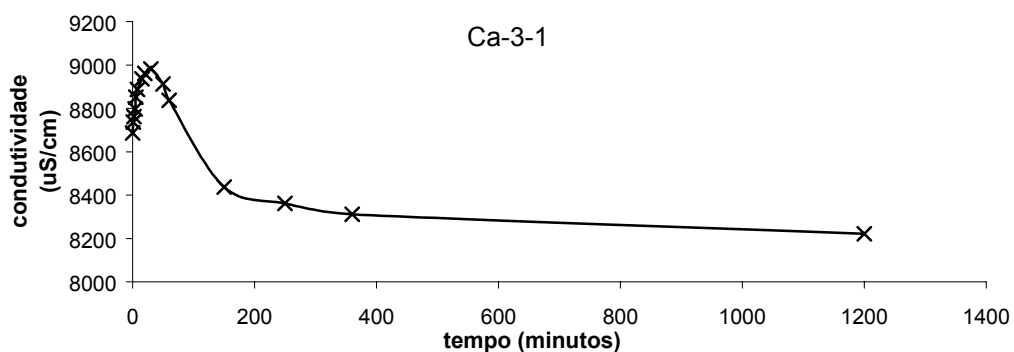
Anexo 4.2b - Resultados dos ensaios com Caulim na umidade de 58,5%



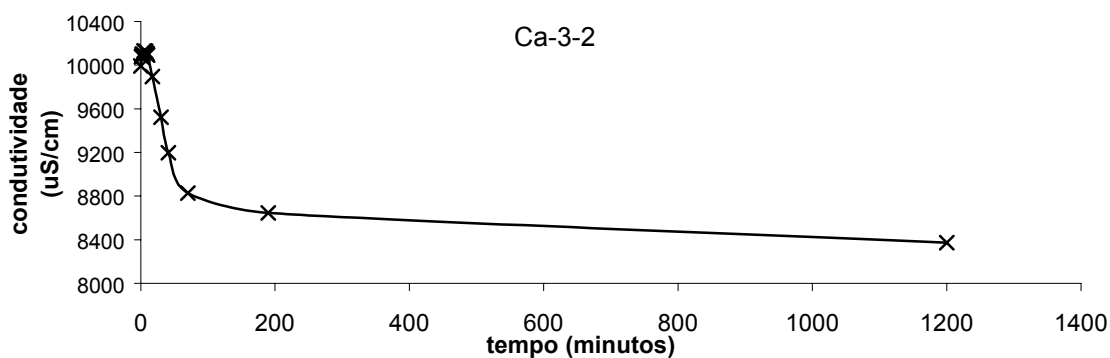
Anexo 4.2c – Variação da condutividade ao longo do tempo no ensaio Ca-2-1



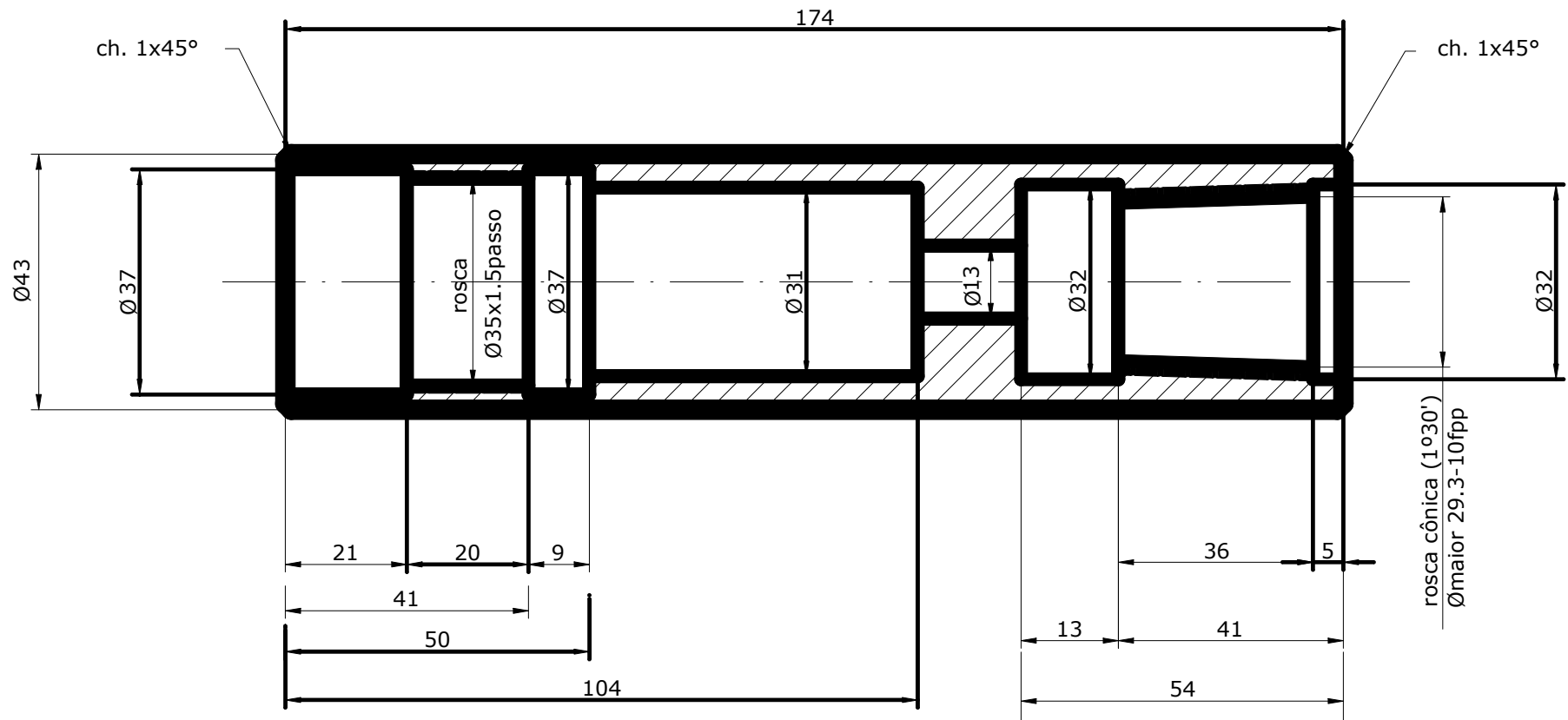
Anexo 4.2d – Variação da condutividade ao longo do tempo no ensaio Ca-3-1



Anexo 4.2e – Variação da condutividade ao longo do tempo no ensaio Ca-3-2-



Anexo 5 – Seção transversal da luva que conecta o cone resistivo à haste



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)