

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ACELERAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO EM SOLOS  
TROPICAIS COM DRENOS CONDUTORES ELÉTRICOS**

**ALISSON JOBIM PEREIRA NASCIMENTO**

**ORIENTADOR: PEDRO MURRIETA SANTOS NETO**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**

**PUBLICAÇÃO: G.TD 062/2009**

**BRASÍLIA/DF**  
**DEZEMBRO/2009**

---

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ACELERAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO EM SOLOS  
TROPICAIS COM DRENOS CONDUTORES ELÉTRICOS**

**ALISSON JOBIM PEREIRA NASCIMENTO**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

**APROVADA POR:**

---

**PEDRO MURRIETA SANTOS NETO, DSc (UnB)**  
**(ORIENTADOR)**

---

**ENNIO MARQUES PALMEIRA, PhD (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**MARCO ANTONIO ALMEIDA DE SOUZA, DSc (UnB)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

---

**DARIO CARDOSO DE LIMA, PhD (UFV)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**BRASÍLIA/DF, 10 de Dezembro de 2009**

---

## FICHA CATALOGRÁFICA

**NASCIMENTO, ALISSON JOBIM PEREIRA**

**Aceleração da Consolidação em Solos Tropicais com Drenos Condutores Elétricos. [Distrito Federal] 2009.**

**xxiv, 256 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2009)**

**Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.**

**1. Dreno Condutor Elétrico  
3. Eletro-osmose**

**2. Dreno Vertical Pré-Fabricado  
4. Consolidação**

**I. ENC/FT/UnB**

**II. Título (Série)**

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

**NASCIMENTO, A. J. P. (2009). Aceleração da Consolidação em Solos Tropicais com Drenos Condutores Elétricos. Tese de Doutorado, Publicação G.TD 062/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 256 p.**

## CESSÃO DE DIREITOS

**NOME DO AUTOR: Alisson Jobim Pereira Nascimento**

**TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Aceleração da Consolidação em Solos Tropicais com Drenos Condutores Elétricos.**

**ETAPA/ANO: Tese em Doutorado/2009.**

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta Tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta Tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

**Alisson Jobim Pereira Nascimento**

End: Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, SG-12, 1º andar  
CEP 70910-900 – Brasília – DF – Brasil

---

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a quatro gerações da minha família:*

- 1. Meus avôs Sinfrônio e Nênem por terem ajudado na minha preparação escolar. Vô (em memória) que foi uma espécie de mestre de obras em verdadeiras obras de arte.*
- 2. Meu pai César e minha Mãe Zezé por terem me direcionado para o “conhecimento” e me incentivado na minha formação profissional.*
- 3. Minha esposa Jusciney pelo companheirismo e profunda compreensão nestes anos de dedicação. Minhas irmãs Leile, Lília e Camila pelo sentimento de orgulho para com seu irmão.*
- 4. E a minha filha Ananda por ser a inspiração da minha vida.*

---

## AGRADECIMENTOS

*A formação acadêmica exige muita dedicação e perseverança do ser humano, o qual não consegue atingir os seus objetivos sem a compreensão e ajuda da família, amigos e parceiros em geral.*

*Assim, começo agradecendo a Deus por guiar minha vida com Seu saber Divino, dando-me esta grande oportunidade de aumentar meu conhecimento técnico, social e cultural. Agradeço, de coração, a quatro gerações da minha família que influenciaram diretamente na minha formação: avôs Sinfrônio e Nênem, meu pai César, minha mãe Zezé, minhas irmãs Leile, Lília e Camila, minha maravilhosa esposa Jusciney e minha linda filha Ananda; pessoas muito queridas que sempre me apoiaram e acreditaram no meu desenvolvimento.*

*Agradeço, também, ao meu orientador Prof. Pedro Murrieta pelas pertinentes contribuições e pela confiança depositada em mim, dando-me total liberdade para a execução do trabalho. Aos amigos de luta Gregório e Wilber pela ajuda prestada à tese e por sempre estar à disposição para resolução de problemas de toda ordem.*

*Agradeço, ainda, a área técnica do Laboratório de Geotecnia, Vanilson e Ricardo, pela ajuda nos ensaios de caracterização. Ao técnico do Laboratório da Engenharia Elétrica, Algenor, pela elaboração e confecção da fonte de alimentação de alta voltagem necessária na pesquisa. Aos serventes que se dispuseram a trabalhar na preparação do solo mole, tarefa árdua. Aos diretores da UnB – Campus Planaltina por ceder o espaço físico e as instalações hidráulicas e elétricas para construção do canteiro do ensaio de campo. Ao CNPq e ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia por financiarem grande parte do trabalho da pesquisa.*

*Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conquista deste título de doutorado. Meu sincero obrigado.*

*Alisson Jobim*

---

## **RESUMO**

### **ACELERAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO EM SOLOS TOPICAIS COM DRENOS CONDUTORES ELÉTRICOS**

O método eletrocinético tem se difundido de forma crescente em vários centros de pesquisas, passando a atuar em setores tais como engenharia de minas, engenharia civil e ambiental, alimentos e esportes. Para atender às áreas de aplicação, foi necessário o desenvolvimento de uma nova plataforma tecnológica, que combina uma grande variedade de materiais, funções e processos para a execução de atividades específicas. Sua utilização tem sido frequente em materiais sob diversas condições como: solos, lamas, pasta fluida, resíduos sólidos, dentre outros.

Nos ensaios executados, foram inseridos eletrodos metálicos em drenos verticais pré-fabricados para compor o dreno condutor elétrico (DCE), que é a combinação dos fenômenos eletrocinéticos com as funções tradicionais dos geossintéticos (drenagem, filtração, proteção e reforço). Tanto o DCE, quanto os drenos verticais pré-fabricados (DVPs), foram investigados em modelos físicos, em diferentes escalas, na consolidação do solo tropical.

Inicialmente foram realizados ensaios em laboratório, em uma célula eletro-osmótica, com a finalidade de otimizar os principais parâmetros eletro-osmóticos (voltagem, corrente) em diferentes meios de concentrações eletrolíticas (0; 16,5 e 33 g/L) e outros indicadores como tipo de eletrodo (cobre ou aço) e carga vertical (50 e 100 kPa), procedendo-se, em seguida, a aplicação em um modelo de maior escala (reservatórios experimentais).

Em campo, foram realizados ensaios em dois reservatórios experimentais, utilizando-se a técnica convencional com DVP em uma e a tecnologia dos DCE em outra, usando a eletro-osmose no modo normal e no modo reverso. O comportamento da poropressão e o desenvolvimento do recalque da argila levaram à conclusão que a eletricidade contribui de forma direta para aceleração do processo de consolidação de um solo. A resistência ao cisalhamento do solo foi medida antes e após os ensaios, onde constatou-se que nos ensaios eletrocinéticos os solos obtiveram maior ganho de resistência em relação aos solos nos ensaios convencionais para o mesmo intervalo de tempo. O consumo de energia encontrado foi aceitável quando associado ao benefício que o método proporcionou.

---

## **ABSTRACT**

### **ACCELERATION OF CONSOLIDATION ON TROPICAL SOIL WITH ELECTRO CONDUCTOR DRAIN**

The electrokinetic method has been studied by a growing number of research centers, in application such as mining engineering, civil and environmental engineering, food and sports. To meet the application needs it was necessary to develop a new technology that combines a variety of materials, functions and processes for the implementation of specific activities. Its use has been common in materials under various conditions such as soil, sludge, slurry, solid waste, among others.

Tests were carried out were inserting metal electrodes in vertical drains prefabricated to form the drain electrical conductor (DEC), which is the combination of electrokinetic phenomena with the traditional functions of drains (drainage, filtration, protection and enhancement). Both the DEC, as the prefabricated vertical drains (PVD), were investigated in physical models, at different scales, for the consolidation of tropical soil.

Initially tests were performed in the laboratory, in an electro-osmotic cell, in order to optimize the main electro-osmotic parameters (voltage, current) in different environments of electrolyte concentrations (0, 16.5 and 33 g / L) and with other parameters such as type of electrode (copper or steel) and stress (50 and 100 kPa), proceeding then, with the application in a larger scale (experimental tanks) model.

Two experimental tanks were used in the field trials with the conventional technique with PVD in one and DEC technology in the other, using the electro-osmosis in a normal and reverse modes. The variation of pore pressure and the development of settlements of the clay led to the conclusion that electricity directly contributes to accelerating the process of soil consolidation. The soil shear strength was measured before and after testing, where it was found that electrokinetics increased the soil strength. Energy consumption was found acceptable for the benefit that the method provided.

---

## SUMÁRIO

<u>Capítulo</u>	<u>Página</u>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>1</b>
1– INTRODUÇÃO .....	1
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....	1
1.2. ESCOPO DO TRABALHO.....	3
1.3. OBJETIVOS DA TESE.....	3
1.4. ESTRUTURAÇÃO DA TESE .....	4
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>5</b>
2– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. SOLOS TROPICAIS .....	6
2.2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO SOLO.....	7
2.3. PERFIS DOS SOLOS TROPICAIS BRASILEIROS .....	9
2.4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	12
2.4.1. HIDRÓLISE .....	13
2.4.2. QUELUVIAÇÃO .....	14
2.5. PRINCIPAIS MINERAIS CONSTITUINTES DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	15
2.5.1. MINERAIS PRIMÁRIOS .....	16
2.5.2. MINERAIS DE ARGILA .....	16
2.6. SUBSTITUIÇÃO ISOMÓRFICA.....	23
2.7. SUPERFÍCIE ESPECÍFICA.....	24
2.8. SISTEMA ARGILA-ÁGUA: CÁTIOS TROCÁVEIS, CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA E DUPLA CAMADA DIFUSA.....	24
2.9. PONTO DE CARGA ZERO (PCZ) .....	31
2.10. INFLUÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO .....	33
2.11. INFLUÊNCIA DOS CÁTIOS E ÂNIOS NO SISTEMA ARGILA + ÁGUA.....	34
2.12. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS LATERÍTICOS.....	35
2.12.1. ESTRUTURAS E CARACTERÍSTICAS SECUNDÁRIAS .....	36
2.12.2. PLASTICIDADE .....	38
2.13. SOLOS DA REGIÃO DO DISTRITO FEDERAL.....	39
2.13.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICO-MINERALÓGICAS.....	39

---

<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>42</b>
3- FENÔMENOS ELETROCINÉTICOS.....	42
3.1. TEORIAS DE FLUXO POR ELETRO-OSMOSE .....	46
3.1.1. TEORIA DE HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI.....	47
3.1.2. TEORIA DE ESRIG E COMPLEMENTAÇÕES .....	51
3.2. EFICIÊNCIA ELETRO-OSMÓTICA.....	55
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>57</b>
4- GEOSSINTÉTICOS E APLICAÇÕES.....	57
4.1. TÉCNICAS PARA ACELERAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO DE SOLOS E CUSTO DA ENERGIA DO TRATAMENTO ELETROCINÉTICO .....	58
4.2. GEOSSINTÉTICO ELETROCINÉTICO .....	61
4.2.1. TIPOS DE ELETRODOS GEC .....	62
4.3. CORROSÃO ELETROQUÍMICA.....	67
4.4. RECENTES APLICAÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS ELETROCINÉTICOS .....	72
4.5. APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROCINÉTICO NO BRASIL.....	79
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>81</b>
5- MATERIAIS E EQUIPAMENTOS .....	81
5.1. SOLOS DE GRANULOMETRIA FINA .....	81
5.1.1. SOLOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	82
5.1.2. SOLO DOS ENSAIOS EM CAMPO .....	84
5.2. SOBRECARGA.....	86
5.3. GEOSSINTÉTICOS UTILIZADOS .....	87
5.3.1. GEOTÊXTIL.....	87
5.3.2. DRENOS VERTICAIS .....	87
5.3.3. ESCOLHA DOS ELETRODOS .....	90
5.4. FONTES GERADORAS DE ENERGIA .....	91
5.5. CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA .....	94
5.6. RESERVATÓRIOS EXPERIMENTAIS .....	98

---

<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>100</b>
6– METODOLOGIA .....	100
6.1. ENSAIO EM LABORATÓRIO – PEQUENA ESCALA .....	100
6.1.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO.....	101
6.1.2. ENSAIO NA CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA .....	103
6.1.3. RECALQUE NA AMOSTRA .....	105
6.1.4. VARIÁVEIS ELETRO-OSMÓTICAS.....	105
6.1.5. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO.....	106
6.1.6. RESUMO DO ENSAIO ELETRO-OSMÓTICO .....	107
6.1.7. PLANEJAMENTO DO ENSAIO .....	109
6.2. ENSAIO TESTE – ESCALA INTERMEDIÁRIA .....	111
6.3. ENSAIOS EM CAMPO – GRANDE ESCALA .....	113
6.3.1. PREPARAÇÃO DA ÁREA .....	113
6.3.2. PRIMEIRO ENSAIO EM CAMPO .....	117
6.3.3. SEGUNDO ENSAIO EM CAMPO .....	134
6.3.4. RESUMO DO ENSAIO EM CAMPO.....	140
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>142</b>
7– APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	142
7.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO – ETAPA A .....	142
7.1.1. ANÁLISES FÍSICAS .....	142
7.1.2. ANÁLISES QUÍMICAS .....	147
7.1.3. ANÁLISES MINERALÓGICAS.....	151
7.1.4. ANÁLISES ELETRO-OSMÓTICAS .....	152
7.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO – ETAPA B .....	166
7.2.1. ANÁLISES ELETRO-OSMÓTICAS .....	167
7.2.2. DETALHES FÍSICOS DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS .....	189
7.2.3. ANÁLISES QUÍMICAS .....	196
7.3. RESULTADO DO ENSAIO TESTE – ESCALA INTERMEDIÁRIA.....	199
7.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO – GRANDE ESCALA .....	201
7.4.1. ANÁLISES QUÍMICAS .....	202
7.4.2. ANÁLISES MINERALÓGICAS.....	208
7.4.3. ANÁLISES ELETRO-OSMÓTICAS .....	209
7.4.4. DETALHES FÍSICOS DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS EM CAMPO.....	225

---

<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>233</b>
8– CONCLUSÕES .....	233
8.1. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	238
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>239</b>
ANEXO 1 - CÂMARA DE COMPRESSÃO .....	251
ANEXO 2 – CÉLULA DE CARGA DE COMPRESSÃO TF200 .....	252
ANEXO 3 - INDICADOR DIGITAL MODELO IT 100 .....	253
ANEXO 4 – INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISE DE MICRONUTRIENTES EM SOLOS DO CERRADO (GALRÃO, 2004) .....	254
ANEXO 5 – PLANTA BAIXA E CORTE.....	256

---

## LISTA DE TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
Tabela 2.1 - Correlações entre as diferentes classificações de perfis lateríticos completos.(Cardoso, 2002)-----	10
Tabela 2.2 - Superfícies específicas típicas (Whitlow, 1995). -----	24
Tabela 2.3 - Valores de PCZ em diferentes solos brasileiros.-----	32
Tabela 2.4 - Pontos isoelétricos de alguns hidróxidos e amorfos (Van Schuylenborgh e Sanger, 1949).-----	36
Tabela 2.5 - Índice de vazios em solos lateríticos.-----	37
Tabela 4.1 - Tipos de Geossintéticos e suas aplicações possíveis. [modificado – Zornberg e Christopher (1999)] -----	58
Tabela 4.2 - Principais características dos métodos para controle de recalques (modificado - Magnan, 1994) -----	59
Tabela 4.3 - Consumo de energia em ensaios em campo. -----	61
Tabela 4.4 - Funções utilizadas nas aplicações práticas dos GCEs (Jones et al., 2008). -----	72
Tabela 4.5 - Parâmetros chaves, seus efeitos e implicações práticas das principais funções eletrocinéticas dos GCEs (Jones et al., 2008).-----	73
Tabela 4.6 - Pesquisas em aplicações com GCEs e materiais em desenvolvimento (Jones et al., 2008). -----	74
Tabela 4.7 - Indústria, mercado e setores correntes da aplicação e GCE desenvolvidos ( Jones et al., 2008). -----	74
Tabela 4.8 - Aplicação do método eletrocinético no Brasil.-----	79
Tabela 5.1 - Propriedades físicas dos solos usados nos ensaios de laboratório. -----	83
Tabela 5.2 - Propriedades físicas dos solos usados nos ensaios em campo. -----	86
Tabela 5.3 - Propriedades físicas da sobrecarga.-----	86
Tabela 5.4 - Propriedades do geotêxtil utilizado entre o solo mole e a sobrecarga. -----	87
Tabela 5.5 - Configuração do geodreno bem como os materiais técnicos utilizados. -----	87
Tabela 5.6 - Propriedades do Geodreno ESTEDRAIN.-----	88
Tabela 6.1 - Planejamento da primeira etapa dos ensaios realizados em laboratório (fixa os tipos de eletrodos). -----	110
Tabela 6.2 - Planejamento da segunda etapa dos ensaios realizados em laboratório (Variação dos tipos de eletrodos). -----	111
Tabela 7.1 - Análises granulométricas realizadas em amostras de solos naturais. -----	143
Tabela 7.2 - Índices de Atterberg e de atividade. -----	145
Tabela 7.3 - Análise química no solo natural quanto aos teores dos micronutrientes. -----	147
Tabela 7.4 - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis, teor de matéria orgânica (MO) e PCZ. -----	148
Tabela 7.5 - Análise química no solo quanto aos teores dos micronutrientes – após ensaio EO. -----	150

---

Tabela 7.6 - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis e teor de matéria orgânica (MO) – após ensaio EO. -----	150
Tabela 7.7 - Resultados das análises de DRX. -----	151
Tabela 7.8 - Voltagem aplicada, condutividade e intensidade de corrente que atravessa o solo. -----	155
Tabela 7.9 - Potência média, energia consumida e custo dos ensaios.-----	165
Tabela 7.10 - Resumo das variáveis e resultados obtidos nos ensaios. -----	168
Tabela 7.11 - Comparativo entre as velocidades médias de consolidação. -----	172
Tabela 7.12 - Resumo dos parâmetros eletro-osmóticos dos ensaios. -----	187
Tabela 7.13 - Análise química no solo, quanto aos teores dos micronutrientes, realizado antes e após o método EO. -----	197
Tabela 7.14 - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis, teor de matéria orgânica (MO) e PCZ, antes e após os ensaios. -----	198
Tabela 7.15 - Correntes obtidas com diferentes DDP. -----	199
Tabela 7.16 - Análise química no solo, quanto aos teores dos micronutrientes, realizado antes e após o método EO reversa e padrão.-----	202
Tabela 7.17 - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis, teor de matéria orgânica (MO) e PCZ, antes e após os ensaios. -----	204
Tabela 7.18 - Resultados das análises de DRX.-----	209
Tabela 7.19 - Resumo das variáveis e resultados obtidos nos ensaios em campo.-----	210
Tabela 7.20 - Resumo dos parâmetros eletro-osmóticos dos ensaios em campo. -----	224

---

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
Figura 2.1 - Distribuição dos solos lateríticos sobre a superfície da Terra (a) e em áreas brasileiras (b) (Formoso, 1999). -----	6
Figura 2.2 - Perfil laterítico (Martins, 2000). -----	9
Figura 2.3 - Representação esquemática das unidades e camada octaédrica (Grim, 1953). ---	16
Figura 2.4 - Representação esquemática das unidades e camada tetraédrica (Grim, 1953). ---	17
Figura 2.5 - Estrutura de uma camada de caulinita; (a) atômica; (b) simbólica. -----	18
Figura 2.6 - Processo de montagem da forma atômica de uma estrutura ideal da caulinita. ---	18
Figura 2.7 - Estrutura da montmorilonita de forma simbólica e atômica. -----	19
Figura 2.8 - Estrutura básica da illita. -----	20
Figura 2.9 - Diagrama esquemático da estrutura da; (a) muscovita e illita, (b) vermiculita ----	23
Figura 2.10 - Distribuição de carga na água adjacente à superfície da partícula (Mitchell, 1976). -----	25
Figura 2.11 - Distribuição do potencial $\Psi$ ao longo da distância $x$ em relação à superfície da partícula. (Mitchell, 1993) -----	28
Figura 2.12 - Potencial zeta para altas e baixas concentrações eletrolíticas. (Schmidt, 2004)	29
Figura 2.13 - Diferenças de capacidade de troca de cátions em dois tipos de solos. -----	30
Figura 2.14 - Formação da matéria orgânica no solo. (Sítio Duas Cachoeiras, 2009) -----	33
Figura 2.15 - Relação de pH, PCZ e CTC com a matéria orgânica. -----	34
Figura 2.16 - Modelo de evolução químico-mineralógica dos solos tropicais colapsíveis (Cardoso, 1995). -----	41
Figura 3.1 - Representação Esquemática de Fenômenos Eletrocinéticos. -----	42
Figura 3.2 - Fenômenos eletrocinéticos em uma massa de solo totalmente saturada -----	44
Figura 3.3 - Modelo esquemático mostrando os processos que ocorrem no solo durante a aplicação de um campo elétrico (Alshawabkeh (1998), apud Mergulhão, 2002). -----	45
Figura 3.4 - Características e relações entre os vários modelos que descrevem eletro-osmose (Mitchell, 1993). -----	46
Figura 3.5 - Modelo de Helmholtz-Smoluchowski para o fenômeno de eletro-osmose. -----	47
Figura 3.6 - Movimento da água devido aplicação de campo elétrico (Nascimento, 2005). --	51
Figura 3.7 - Influência das variáveis no solo na eficiência eletro-osmótica. (Jones et al., 2008) -----	56
Figura 4.1 - Eletrodos GEC: Tipos dos eletrodos para ensaio eletro-osmótico. -----	63
Figura 4.2 - DVE com dois fios de cobre no núcleo do plástico. (Chew et al., 2004) -----	63
Figura 4.3 - Componentes do Dreno Vertical Elétrico (DVE) (Rittirong et al., 2008). -----	64
Figura 4.4 - Materiais GEC lineares (Jones et al., 2008). -----	64
Figura 4.5 - Eletrodos GEC para misturas de pastas fluidas ou lamas (Jones et al., 2008). ---	64
Figura 4.6 - Eletrodos GEC para condições planares (Jones et al., 2008). -----	65
Figura 4.7 - Estruturas de alguns polímeros intrinsecamente condutores. -----	66
Figura 4.8 - Ciclo dos Metais. (Dutra, 1987) -----	67
Figura 4.9 - Pilha de corrosão eletroquímica. -----	68
Figura 4.10 - Reação surgida na área anódica. -----	69
Figura 4.11 - Diagrama esquemático de uma pilha eletrolítica. (Nascimento, 2005) -----	70
Figura 4.12 - Tipos de corrosão. (Gentil, 1982) -----	71

Figura 4.13 - GCE instalados com máquinas de instalação de drenos convencionais (Chew et al, 2004). -----	75
Figura 4.14 - Conceito do modelo de prensa de correia. A correia superior é o anodo e a inferior é o catodo (Lamont-Black et al, 2006a). -----	76
Figura 4.15 - Disposição do lodo de Kimberlite (a), secagem do rejeito (b) e recuperação da água (c). (Jones et al., 2008) -----	77
Figura 4.16 - Tratamento da lama do esgoto do modo convencional (a) e com GCE (b). -----	78
Figura 4.17 - Esquema do sistema CGE-grama (Lamont-Black et al. 2006b). -----	78
Figura 5.1 - Mapa de localização dos pontos de coleta dos solos estudados. -----	82
Figura 5.2 - Perfil do horizonte B do Latossolo Vermelho de textura argilosa. -----	83
Figura 5.3 - Distâncias das áreas de empréstimo até a UnB – Campus Planaltina. -----	84
Figura 5.4 - Perfil do horizonte B próximo a BR-020. -----	85
Figura 5.5 - Perfil do horizonte B na comunidade de Mestre D´armas. -----	85
Figura 5.6 - Vista superior do Dreno Condutor Elétrico (DCE). -----	89
Figura 5.7 - Vista Lateral do Dreno Condutor Elétrico (DCE).-----	89
Figura 5.8 - Vista superior do Dreno Condutor Elétrico adaptado (DCE).-----	89
Figura 5.9 - Vista lateral do Dreno Condutor Elétrico adaptado (DCE).-----	89
Figura 5.10 - Fonte de energia tipo regulável e estabilizada. -----	92
Figura 5.11 - Fonte projetada para ensaios de campo (1º Versão).-----	93
Figura 5.12 - Painel de voltímetro digital de dois dígitos e meio. -----	93
Figura 5.13 - Segunda versão da fonte de alimentação.-----	94
Figura 5.14 - Célula cilíndrica com solo mole no seu interior. Vista lateral (a) e vista superior (b). -----	95
Figura 5.15 - Vista superior da tampa da Célula Eletro-osmótica. -----	95
Figura 5.16 - Sistemas de carga aplicada no ensaio de laboratório: macaco hidráulico e câmara de compressão ligada ao sistema de ar comprimido. -----	96
Figura 5.17 - Célula de carga.-----	96
Figura 5.18 - Indicador digital da célula de carga.-----	97
Figura 5.19 - Representação esquemática da Célula Eletro-osmótica.-----	97
Figura 5.20 - Ensaio Eletro-osmótico.-----	98
Figura 5.21 - Reservatórios experimentais próximos a um pequeno depósito. -----	99
Figura 6.1 - Homogeneização da amostra JC com umidade acima do limite de liquidez. ---	102
Figura 6.2 - Célula eletro-osmótica com tampa acrílica e DCEs inseridos.-----	103
Figura 6.3 - Sistema de carregamento no solo, macaco hidráulico (a), câmara de compressão (b), e extensômetros para medição do recalque. -----	104
Figura 6.4 - Monitoramento do recalque com sistema de aquisição de dados - LVDT.-----	105
Figura 6.5 – Fonte estabilizada conectada à célula eletro-osmótica.-----	106
Figura 6.6 - Ensaio de resistência ao cisalhamento antes e após consolidação do solo.-----	107
Figura 6.7 - Reservatório usado no ensaio teste (a), parte interna (b) e externa (c). -----	111
Figura 6.8 - Esquema do ensaio teste. -----	112
Figura 6.9 - Solo mole dentro do reservatório (esquerda) e sobrecarga com eletrodos (direita). -----	113
Figura 6.10 - Limpeza da área (a e b) e instalação de cerca de proteção (c e d).-----	114
Figura 6.11 - Escavação para instalação dos reservatórios e sua devida estabilização. -----	115
Figura 6.12 - Reservatórios com contrapiso ao redor e depósito de equipamentos e materiais. -----	115

Figura 6.13 - Canteiro dos ensaios com cobertura de plástico transparente.-----	116
Figura 6.14 - Canteiro dos ensaios com lona azul como cobertura com solo argiloso armazenado ao lado.-----	117
Figura 6.15 - Determinação da Umidade do Solo.-----	118
Figura 6.16 - Preparação da água salobra para ser homogeneizada com o solo. -----	118
Figura 6.17 - Homogeneização do solo em etapas (e –f).-----	120
Figura 6.18 - Reservatório com solo mole próximo a cota de 75 cm, com destaque para lâmina d’água.-----	120
Figura 6.19 - Reservatório experimental sem GCE (PAD) – PLANTA BAIXA -----	121
Figura 6.20 - Reservatório experimental com GCE (EO) – PLANTA BAIXA -----	122
Figura 6.21 - Manta de geotêxtil sobre o solo mole (a) e drenos e instrumentação instalados (b). -----	123
Figura 6.22 - Camadas de colchões drenantes (a e d), furo para saída de água do reservatório (b e c) e piezômetro de Casagrande e haste da placa de recalque (e). -----	124
Figura 6.23 - Manta de geotêxtil sobre a brita (a) e sobrecarga de areia sendo nivelada (b). -----	125
Figura 6.24 - Perfil dos materiais depositados nos reservatório EO e PAD.-----	125
Figura 6.25 - Piezômetro para medir a poropressão na massa de solo. -----	126
Figura 6.26 - Piezômetros instalados antes de colocar as camadas de areia grossa lavada e brita sobre solo mole. -----	127
Figura 6.27 - Equipamento adaptado para o ensaio de palheta.-----	128
Figura 6.28 - Placas de recalques instaladas antes de colocar as camadas de areia grossa lavada e brita sobre solo mole.-----	129
Figura 6.29 - Placas de recalques instalados antes de colocar as camadas de areia grossa lavada e brita sobre solo mole.-----	129
Figura 6.30 - Garra de jacaré utilizada para conectar os eletrodos. -----	130
Figura 6.31 - Garras de jacaré vermelhas interligando os eletrodos ao pólo negativo da fonte (a) e garras pretas interligando ao pólo positivo (b). -----	131
Figura 6.32 - Área não efetiva aproximada para configuração do eletrodo em 2-D. -----	132
Figura 6.33 - Circuito elétrico simples.-----	132
Figura 6.34 - Circuito elétrico complexo no ensaio realizado em campo. -----	133
Figura 6.35 - Configuração dos drenos condutores. -----	134
Figura 6.36 - Solo MD homogeneizado com lâmina d’água na cota do tubo drenante.-----	135
Figura 6.37 - Instalação dos drenos verticais. -----	136
Figura 6.38 - Adicionando água para saturar a brita e garantir a saturação do solo mole. ---	136
Figura 6.39 - Perfil dos materiais depositados nos reservatório EO e PAD do ensaio 2. ----	137
Figura 6.40 - Piezômetro com tubos duplos. -----	137
Figura 6.41 - Nível de água no piezômetro após depósito da camada drenante. -----	138
Figura 6.42 - Extensômetros e bases magnéticas imadas aos portais metálicos. -----	139
Figura 7.1 - Resultados dos recalques em 24 horas de ensaios pilotos.-----	153
Figura 7.2 - Resultados da resistência ao cisalhamento após término dos ensaios pilotos.--	154
Figura 7.3 - Desenvolvimento da corrente nos ensaios realizados com água do mar.-----	157
Figura 7.4 - Desenvolvimento da corrente nos ensaios realizados com água salobra.-----	159
Figura 7.5 - Resultados dos recalques em 24 horas de ensaios eletro-osmóticos com água do mar. -----	160
Figura 7.6 - Resultados da resistência ao cisalhamento do solo dos ensaios eletro-osmóticos. -----	161
Figura 7.7 - Resultados dos recalques em 24 horas do ensaio piloto e dos ensaios EO. -----	162

Figura 7.8 - Resultados da resistência ao cisalhamento dos solos do ensaio piloto e dos ensaios eletro-osmóticos.-----	163
Figura 7.9 - Resultados da energia consumida em todos os ensaios eletro-osmóticos.-----	165
Figura 7.10 - Recalque ao longo do tempo nos ensaios da etapa B. -----	171
Figura 7.11 - Velocidade (mm/h) da consolidação nos ensaios.-----	172
Figura 7.12 - Relação da corrente e recalque no ensaio B2 - Eletro-osmose no modo normal, eletrodo de cobre.-----	174
Figura 7.13 - Relação da corrente e recalque no ensaio B2, tratados em coordenadas. -----	175
Figura 7.14 - Relação da corrente e recalque no ensaio B3 - Eletro-osmose reversa, eletrodo de cobre.-----	176
Figura 7.15 - Relação da corrente e recalque no ensaio B5- Eletro-osmose no modo normal, eletrodo de aço. -----	177
Figura 7.16 - Relação da corrente e recalque no ensaio B5, tratados em coordenadas. -----	177
Figura 7.17 - Relação da corrente e recalque no ensaio B6 - Eletro-osmose reversa, eletrodo de aço. -----	179
Figura 7.18 - Relação da corrente e recalque no ensaio B6, tratados em coordenadas. -----	179
Figura 7.19 - Comparação do desenvolvimento da corrente nos ensaios no modo normal de EO, com cobre e aço como eletrodo. -----	180
Figura 7.20 - Comparação do desenvolvimento da corrente nos ensaios no modo de EO reversa, com cobre e aço como eletrodo.-----	182
Figura 7.21 - Comparação dos recalques totais dos ensaios da Etapa B.-----	183
Figura 7.22 - Comparação da resistência ao cisalhamento dos ensaios da Etapa B.-----	185
Figura 7.23 - Consumo de energia nos ensaios da Etapa B.-----	188
Figura 7.24 - Lâmina d'água após término do recalque.-----	189
Figura 7.25 - Bolhas de ar e água esverdeada com a execução do ensaio.-----	190
Figura 7.26 - Cordoalhas de cobre rompidas no dreno ânodo.-----	191
Figura 7.27 - Quebra do eletrodo de aço. -----	192
Figura 7.28 - Água drenada após a corrosão do eletrodo de aço.-----	193
Figura 7.29 - Gás hidrogênio liberado no DCE cátodo.-----	195
Figura 7.30 - Estados dos eletrodos após ensaios. -----	195
Figura 7.31 - Ganho de resistência pelo método eletrocínético. Antes (a) e após (b) o ensaio EO.-----	196
Figura 7.32 - Tempo de resposta do piezômetro utilizado nos ensaios em campo.-----	201
Figura 7.33 - Difratoograma de raios-X da amostra MD e do reservatório PAD.-----	208
Figura 7.34 - Difratoograma de raios-X da amostra do reservatório EO próximo ao dreno ânodo (PR1) e cátodo (PR2).-----	208
Figura 7.35 - Relação da corrente e recalque no ensaio C1 – solo BR, EO normal.-----	212
Figura 7.36 - Relação da corrente e recalque no ensaio da eletro-osmose reversa (Ensaio C3).-----	213
Figura 7.37 - Velocidade de recalque em função da corrente existente.-----	215
Figura 7.38 - Desenvolvimento da poropressão no reservatório EO e PAD. -----	217
Figura 7.39 - Comparação dos recalques totais dos ensaios da fase 1 – Solo BR, EO normal.-----	218
Figura 7.40 - Comparação da resistência ao cisalhamento dos ensaios da fase 1. -----	219
Figura 7.41 - Comparação dos recalques totais dos ensaios da fase 2. -----	220
Figura 7.42 - Comparação da resistência ao cisalhamento dos ensaios da fase 2. -----	221
Figura 7.43 - Comparação entre a corrente desenvolvida nos ensaios “EO” e “EO reversa”.-----	222
Figura 7.44 - Água drenada dos reservatórios EO (a) e PAD (b).-----	226

---

Figura 7.45 - a) Vista superior dos drenos ânodos (ligados pelo fio azul) e cátodo (ligado pelo fio preto) – b) perfil da parte superior do eletrodo de aço. -----	227
Figura 7.46 - Parte da água drenada do reservatório EO no final do ensaio. -----	227
Figura 7.47 - Eletrodos deteriorados. -----	228
Figura 7.48 - Endereço dos eletrodos no reservatório EO – PLANTA BAIXA. -----	229
Figura 7.49 - Situação dos eletrodos no final dos ensaios EO (a) e EO reversa (b).-----	229
Figura 7.50 - Pedaco do artefato de madeira para medir a poropressão. -----	230
Figura 7.51 - Amostra de solo próximo aos DCE e DVP. -----	231
Figura 7.52 - Consistência do solo após os ensaios EO normal (a) e EO reversa (b).-----	232

---

## LISTA DE EQUACÕES

<u>Equação</u>	<u>Página</u>
Equação 2.1 - Equação de Boltzman direcionada à íons -----	26
Equação 2.2 - Equação de Poisson -----	27
Equação 2.3 - Densidade de carga -----	27
Equação 2.4 - Equação de Poisson-Boltzmann -----	27
Equação 2.5 - Expressão simplificada para o modelo de Gouy-Chapman -----	27
Equação 2.6 - Potencial elétrico na DCD -----	27
Equação 2.7 - Espessura da DCD -----	28
Equação 2.8 - Expressão geral da carga da DCD -----	28
Equação 2.9 - Equação proposta para o PCZ do solo -----	32
Equação 2.10 - Equação de Nernst simplificada -----	32
Equação 3.1 - Fluxo eletro-osmótico -----	48
Equação 3.2 - Coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica -----	49
Equação 3.3 - Coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica -----	49
Equação 3.4 - Potencial zeta -----	50
Equação 3.5 - Velocidade de fluxo de água através do solo por eletricidade -----	52
Equação 3.6 - Velocidade de fluxo hidráulico -----	52
Equação 3.7 - Superposição dos fluxos induzidos eletricamente e hidraulicamente -----	52
Equação 3.8 - Integração da superposição dos fluxos -----	52
Equação 3.9 - Desenvolvimento da poropressão com tensão aplicada -----	53
Equação 3.10 - Poropressão positiva -----	53
Equação 3.11 - Poropressão desenvolvida por eletro-osmose -----	54
Equação 3.12 - Eficiência eletro-osmótica de transporte de água -----	55
Equação 6.1 - Umidade do solo -----	101
Equação 6.2 - Área da célula estudada -----	131
Equação 6.3 - Área do campo elétrico não efetiva -----	131
Equação 6.4 - Lei de Ohm -----	132

---

## LISTA DE REAÇÕES

<u>Reação</u>	<u>Página</u>
Reação 2.1 - Mineralização da matéria orgânica -----	13
Reação 2.2 - Hidrólise do mineral hematita -----	13
Reação 2.3 - Hidrólise do mineral caulinita -----	13
Reação 3.1 -Eletrólise da água – frente ácida -----	45
Reação 3.2 - Eletrólise da água – frente básica -----	45
Reação 4.1 - Passagem do metal da forma reduzida para a iônica -----	69
Reação 7.1 - Decomposição e oxidação do cloreto de sódio-----	190
Reação 7.2 – Reação do gás cloro com ânodo de cobre -----	190
Reação 7.3 - Formação do óxidos de cobre hidratado -----	191
Reação 7.4 - Oxidação de ferro -----	193
Reação 7.5 - Formação do hidróxido ferroso com liberação de cloro -----	194
Reação 7.6 - Formação do hidróxido ferroso -----	194
Reação 7.7 - Formação do cloreto ferroso -----	194
Reação 7.8 - Formação do ferro -----	194
Reação 7.9 - Hidróxido férrico -----	194
Reação 7.10- Mecanismo da ferrugem -----	194

---

## **LISTA DE ABREVIACÕES, SÍMBOLOS E UNIDADES**

### **ABREVIACÕES**

ABNT .....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRACO .....	Associação Brasileira de Corrosão
ABGE .....	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT .....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM.....	American Society for Testing and Materials
CEB .....	Companhia Elétrica de Brasília
CTA.....	Capacidade de Troca Aniônica
CTC .....	Capacidade de Troca Catiônica
DC .....	Corrente Direta
DCE.....	Dreno Condutor Elétrico
DDP .....	Diferença de Potencial
DF.....	Distrito Federal
DVE.....	Dreno Vertical Elétrico
DVP .....	Dreno Vertical Pré-Fabricado
DCD .....	Dupla Camada Difusa
DRX .....	Difratômetro de Raio X
EKG <sub>adap</sub> .....	Geossintético Eletrocínético adaptado
EO.....	Eletro-Osmose
EST.....	Estrutural
GCE.....	Geossintético Condutor Elétrico
GE.....	Geossintético Eletro Cínético
GEC.....	Geossintético Eletricamente Condutor
IBAMA.....	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGCP.....	International Geological Correlation Program
IP .....	Índice de Plasticidade
JC.....	Jóquei Clube
LVDT .....	Linear Variable Differential Transformer
MD .....	Mestre D'armas
MEV .....	Microscopia Eletrônica de Varredura
MO .....	Matéria Orgânica
NBR.....	Norma Brasileira
PAD.....	Padrão
PCZ.....	Ponto de Carga Zero
PESN .....	Ponto de Efeito Salino Nulo
pH.....	Potencial Hidrogenionico
PP .....	Polipropileno
PR.....	Placa de Recalque
UnB .....	Universidade de Brasília
UNESCO.....	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

---

## SÍMBOLOS

A	Área da Seção Transversal Normal à Direção do Fluxo
Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Alumínio
Al(OH) <sub>3</sub>	Hidróxido de Alumínio
B	Boro
Ca	Cálcio
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
Cu	Cobre
Cu(OH) <sub>2</sub>	Hidróxido de Cobre
e	Elétrons
E	Gradiente de Potencial Elétrico
Fe	Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de Ferro
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . H <sub>2</sub> O	Ferrugem
FeOOH	Óxido Hidróxido de Ferro
H	Hidrogênio
H <sub>2</sub>	Gás Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
i	Corrente Elétrica
i <sub>e</sub>	Gradiente Elétrico
Ia	Índice de Atividade
IP	Índice de Plasticidade
L	Comprimento da Amostra
Li	Lítio
K	Potássio
KCl	Cloreto de Potássio
K <sub>e</sub>	Coefficiente de Permeabilidade Eletro-Osmótico
K <sub>h</sub>	Condutividade Hidráulicas
K <sub>i</sub>	Eficiência Eletro-Osmótica de Transporte de Água
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
Na	Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
NH <sub>2</sub>	amônia
n	Porosidade
O <sub>2</sub>	Gás Oxigênio
OH	Hidroxila
P	Potência
Q <sub>e</sub>	Vazão Eletro-Osmótica
R	Resistência elétrica
S	Enxofre
SiO <sub>2</sub>	Sílica
T	Temperatura
V	Potencial Elétrico
V <sub>e</sub>	Velocidade de Fluxo de Água por eletricidade
V <sub>h</sub>	Velocidade de Fluxo Hidráulico
ΔV	Diferença de Potencial Elétrico
W	Umidade

---

$W_L$ .....	Limite de Liquidez
$W_P$ .....	Limite de Plasticidade
$W_s$ .....	Peso do Solo Seco
$W_w$ .....	Peso da Água no Solo
$T$ .....	Temperatura
$Zn$ .....	Zinco
$Zr(SiO_4)$ .....	Zircão
$\Delta E$ .....	Varição de Energia
$\epsilon$ .....	Permissividade
$\gamma_w$ .....	Peso Especifico da Água
$\rho$ .....	Massa Especifica dos Grãos
$\sigma_e$ .....	Condutividade Elétrica
$\eta$ .....	viscosidade do fluido
$\Psi$ .....	Potencial elétrico
$\zeta$ .....	Potencial Zeta

## UNIDADES

A – Amperes.....	Unidade de Corrente Elétrica
$cm^3/A/s$ – Centímetros cúbico por área por segundo ....	Unidade da Eficiência Eletro-Osmótica
$^{\circ}C$ – Grau Celsius .....	Unidade de Temperatura
$^{\circ}/min$ – Graus por minuto.....	velocidade angular
$cm/s$ – Centímetros por segundo .....	Unidade de Velocidade
$cmol/dm^3$ – Centímol de carga por decímetro cúbico.....	Unidade dos elementos trocáveis
$cm^3/A/s$ – Centímetro cúbico por amperes por segundo ..	Unidade da Eficiência Eletro-omótica
g – Grama .....	Unidade de Massa
$g/m^2$ – Grama por metro quadrado .....	Unidade de Gramatura
$g/L$ – Grama por litro .....	Unidade de Concentração
$g/cm^3$ – Grama por centímetro cubo .....	Unidade de Massa específica
L – Litros .....	Unidade de Volume
$kgf/cm^2$ – Kilograma força por centímetro quadrado.....	Unidade de Pressão
m – Metro .....	Unidade de Comprimento
$m^2$ – Metro quadrado.....	Unidade de Área
$m^3$ – Metro cúbico .....	Unidade de Volume
$m/s$ – Metros por segundo .....	velocidade
$m^2/s/V$ – Metro quadrado por segundo por volts .....	Unidade
..... <sup>2</sup>	do Coeficiente de Permeabilidade Eletro-Osmótico
$m/g$ – Metro quadrado por grama .....	Unidade de superfície específica
$m^3/s$ – Metro cúbico por segundo.....	Unidade de Vazão
$meq/100 g$ – Miliequivalente por 100 gramas.....	Unidade de elementos trocáveis
N – Newton .....	Unidade de Força
Pa – Pascal.....	Unidade de Pressão
ppm – Parte por milhão .....	
$R\$/m^3$ – Real por metro cúbico .....	Custo de energia por volume

---

S/cm – Siemens por centímetro.....	Unidade de Condutividade Elétrica
% - percentagem.....	Unidade de Umidade, Índices de Consistências
V – Volts .....	Unidade de Tensão
V/m - Volts por metro .....	Unidade de Gradiente Elétrico
W - Watts .....	Unidade de Potência
W.h – Watts hora.....	Unidade de Energia
Wh/m <sup>3</sup> – Watts hora por metro cúbico.....	Consumo de Energia

## 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Principalmente nos grandes centros urbanos, muitas vezes, ocorre um aumento exponencial da população de forma totalmente desorganizada, provocando uma preocupação crescente com a escassez de solo de “boa qualidade” para fins construtivos. Isso obriga o homem a construir rodovias, habitações e indústrias em áreas com alto grau de dificuldade geotécnica, podendo elevar demasiadamente o custo final da obra. Além da utilização das áreas problemáticas, como por exemplo, solos com baixa capacidade de suporte, as exigências do mundo moderno também obrigam o homem a executar obras cada vez mais complexas em menor tempo.

Com essas reais preocupações e com o reconhecimento de que a baixa qualidade do solo poderá onerar a obra de forma preponderante, o meio técnico-científico tem sido amplamente solicitado nas pesquisas de novas técnicas. Várias dessas técnicas podem ser utilizadas no processo de intervenção no solo, sendo o tempo, o custo e a eficiência, variáveis importantes que determinam o método a ser utilizado.

Com o passar do tempo, foram propostos diversos métodos para acelerar ou diminuir recalques de aterros sobre solos moles. Destaca-se, na atualidade, o uso dos drenos verticais pré-fabricados (DVP) que, juntamente com a sobrecarga, provoca recalques por adensamento na camada de argila. Esse método, em geral, acelera consideravelmente a velocidade de ocorrência de recalque do solo mole.

Devido à necessidade de, em algumas construções específicas, se diminuir ainda mais o tempo de consolidação, pode-se acrescentar à técnica convencional (DVP) o uso das funções eletrocinéticas formando os geossintéticos condutores elétricos (GCE) ou drenos condutores elétricos (DCE). Esse é um tipo de geossintético, com as funções de filtração, drenagem e indução do fluxo, que representa o desenvolvimento de uma nova linha de materiais geossintéticos que são condutores elétricos. Sua função principal é acelerar ainda mais a velocidade de recalque, reduzindo, com ajuda da eletricidade, o tempo necessário para a dissipação da poropressão existente na massa de solo.

---

No final da década de 90, uma nova geração dos geossintéticos condutores elétricos (GCE) foi criada com a inclusão de elementos condutores no núcleo do polímero, formando polímeros condutores constituídos. Esse geossintético tem o mesmo formato dos geossintéticos convencionais, eliminando a necessidade de instalação de um filtro/dreno separado de eletrodos metálicos.

No ano 2000, o prêmio Nobel de Química foi destinado a uma grande descoberta: os polímeros condutores. Podendo ser uma das maiores descobertas do século, esse novo tipo de polímero poderá aumentar a eficácia dos GCE, de modo que, a aplicação desse novo material é claramente possível em um futuro próximo.

Todas essas versões dos geossintéticos estão sendo estudadas em grandes centros de pesquisas do continente europeu e asiático, em países que estão empenhados em resolver os problemas de solo mole, esgotamento sanitário, rejeito de mineração, entre outros. Entretanto, a quase totalidade das pesquisas existentes foram propostas para solos que apresentam um comportamento padrão, característico da maioria dos solos de clima temperado. Assim, é interessante entender como as propriedades particulares dos solos tropicais poderão influenciar na melhoria de solos moles utilizando a técnica eletrocínética, estudo que será inédito na América Latina.

Portanto, apesar do Brasil ser um país com muita área a ser explorada, tem uma enorme extensão costeira onde predominam solos de baixa capacidade de carga, que começam a ser exploradas com diversos tipos de construções. Acelerar a consolidação de solos moles para alguma obra específica poderá ser uma intervenção recorrente. Por este motivo, deve-se conhecer a eficiência e custo-benefício dessa nova tecnologia para solucionar os problemas de obras em sítios de solos tropicais de consistência mole.

---

## **1.2. ESCOPO DO TRABALHO**

Este trabalho de pesquisa consistiu em ensaios em modelos reduzidos e de escala intermediária para avaliar a viabilidade do fenômeno eletrocinético no processo de consolidação da argila mole de solos tropicais brasileiros. Inicialmente foram realizados ensaios em laboratório (célula eletro-osmótica) com a finalidade de otimizar os principais parâmetros eletrocinéticos (voltagem e corrente) e outros indicadores como tipo de eletrodo, aplicação de carga e diferentes condutividades do solo, para em seguida aplicar em ensaios realizados em reservatórios experimentais.

Simultaneamente foram preparados ensaios eletrocinético e piloto para comparar o comportamento de dois métodos distintos com o mesmo objetivo específico: acelerar a consolidação do solo mole. No ensaio eletrocinético, que pode ser considerado um método alternativo, instalaram-se os drenos condutores elétricos (DCE) que, além das funções convencionais dos geossintéticos, tinham as funções de direcionar e acelerar o fluxo de água. No ensaio piloto, método bastante utilizado na prática construtiva, instalaram-se os drenos verticais pré-fabricados (DVP) os quais tinham apenas as funções convencionais de filtração e drenagem da água extraída.

## **1.3. OBJETIVOS DA TESE**

O presente trabalho visa contribuir para o desenvolvimento dos métodos eletrocinéticos aplicados à consolidação de solos por meio de ensaios de laboratório e de campo. Para tanto, foram divididos em objetivos gerais e específicos.

### **OBJETIVOS GERAIS**

- Acelerar o processo de recalque de um solo tropical de consistência mole e, conseqüentemente, aumentar a resistência mecânica e diminuir a compressibilidade desse solo.
- Comparar o método alternativo, que usa o fenômeno eletrocinético, com o método tradicional dos geossintéticos padrões, em termos de recalque, poropressão, resistência ao cisalhamento e custo-benefício.

---

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo dos parâmetros eletrocinéticos aplicados a solos tropicais com consistência mole.
- Otimização das condições de contorno do método eletrocinético para aplicação em ensaios de maior escala executados em campo.
- Confeção e utilização de um material geossintético condutor elétrico (DCE) para provocar o fluxo da água por meio do fenômeno de eletro-osmose.
- Avaliação do comportamento das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo antes e após ensaios padrão e eletrocinético.

### **1.4. ESTRUTURAÇÃO DA TESE**

Além do presente capítulo, este trabalho compõe-se de mais sete capítulos para uma melhor organização e entendimento dos objetivos propostos.

O capítulo 2 apresenta uma revisão sobre o solo tropical com destaque para a mineralogia e características físicas e químicas. O fenômeno eletrocinético, com ênfase em sua eficiência para a função de consolidação do solo é mostrado no capítulo 3. O capítulo 4 discorre sobre a nova plataforma de geossintéticos, relatando desde os tipos até as funções, bem como apresenta as recentes aplicações dessa tecnologia.

No capítulo 5 são descritos os materiais, suas propriedades, bem como os equipamentos que foram fabricados para o desenvolvimento da pesquisa. A metodologia dos ensaios visando padronização dos procedimentos é apresentada no capítulo 6.

Os resultados foram disponibilizados na forma de gráficos e tabelas no capítulo 7, bem como sua interpretação geral e comentários a respeito dos ensaios. Esse capítulo apresenta sucintamente todos os resultados medidos no laboratório na realização dos ensaios e na caracterização da amostra coletada. Destina-se também, às comparações dos resultados e apresentação das inferências determinadas.

O capítulo 8 apresenta um resumo conclusivo dos aspectos mais importantes do trabalho, seguido de recomendações e sugestões para futuras pesquisas relacionadas a este assunto que até então é pouco explorado no país.

---

**2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA****2.1. INTRODUÇÃO**

Uma definição de solo que ainda encontra-se atualizada por ser considerada precisa e completa foi apresentada por Birkeland (1974), *apud* ABGE (1998): “material natural consistindo de camadas ou horizontes de compostos minerais e/ou orgânicos com variadas espessuras, diferindo do material original por propriedades morfológica, física, química, mineralógica, e por características biológicas. Os horizontes do solo são incorporados, mas alguns contêm suficientes porções de sílica, carbonatos ou óxidos de ferro para cimentá-los”.

Essa definição demonstra que o solo natural constitui, simultaneamente, um material complexo e variável de acordo com a sua localização. Os solos tropicais são considerados mais complexos, por apresentarem peculiaridades decorrentes das propriedades com comportamentos bastante variáveis de região para região, uma vez que, seus parâmetros, além de dependerem de fatores tal como rocha mãe, dependem também das condições de intemperismo existentes, como temperatura e umidade.

O seu comportamento pode se tornar mais complexo, ainda, quando esses solos tropicais de características específicas estão submetidos aos fenômenos que regem a técnica eletrocinética, como: (i) movimentação dos íons em direção a um eletrodo, (ii) deslocamento de partículas carregadas e (iii) movimentação da água contida nos poros do solo.

Por esses motivos, é de suma importância conhecer as características, propriedades e fundamentos básicos dos solos tropicais e do fenômeno eletrocinético para entender o comportamento do conjunto e, assim, conseguir avaliar a eficácia do processo. Eficácia que será demonstrada no próximo capítulo, pelo número de aplicações e quantidade de países que estão aderindo às técnicas eletrocinéticas.

Este capítulo busca-se mostrar aspectos geoquímicos e mineralógicos dos solos lateríticos nas paisagens tropicais. Pois, apesar de pouco utilizados pela geotecnia, esses aspectos são fundamentais não só para a compreensão da gênese e da distribuição dos solos, mas também para o entendimento de suas propriedades físicas e de seu comportamento mecânico, os quais dependem essencialmente de suas composições mineralógicas e organizações estruturais.

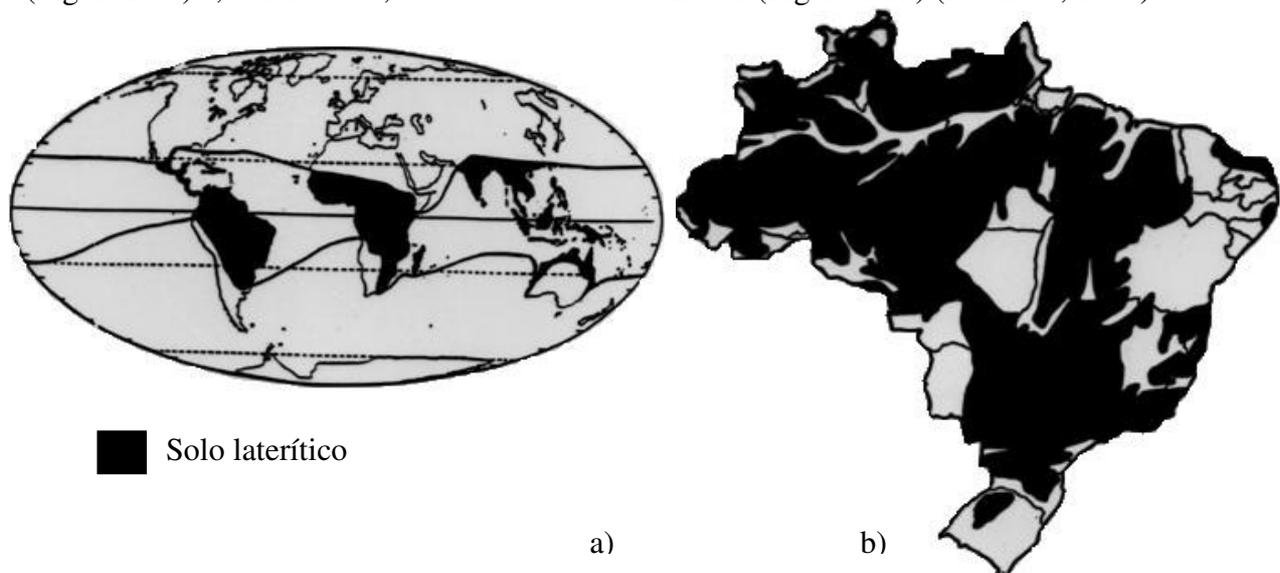
---

## 2.2. SOLOS TROPICAIS

O solo passou a ser compreendido como uma camada que recobre a superfície da terra, em evolução sempre permanente, por meio da alteração das rochas e de processos pedogenéticos, comandados por agentes físicos, químicos e biológicos.

Na paisagem, os solos ocorrem compondo unidades por meio da distinção de características morfológicas (cor, textura, estrutura, consistência, cerosidade, nódulos, concreções, etc) dos horizontes pedológicos, observáveis no campo, e características químicas e físicas, determinadas por meio de ensaios laboratoriais e *in situ*.

Entre os vários tipos e características de solos presentes na natureza, destacam-se por meio do comportamento diferenciado, os solos comumente chamados de “solos tropicais” ou “solos lateríticos” por estarem localizados entre os trópicos, ou seja, entre os paralelos 30° N e 30° S de latitude. Estes solos ocupam aproximadamente 30% das terras emersas do globo terrestre (Figura 2.1a) e, dentre estes, 65% da área total do Brasil (Figura 2.1b) (Formoso, 1999).



**Figura 2.1** - Distribuição dos solos lateríticos sobre a superfície da Terra (a) e em áreas brasileiras (b) (Formoso, 1999).

A partir de 1978, organismos internacionais, como a Associação Internacional de Geoquímica e Cosmoquímica e a UNESCO, através do Projeto 129 promovido pelo *International Geological Correlation Program* (IGCP), tendo em vista a importância que os materiais lateríticos apresentam para os países em vias de desenvolvimento, começaram a se interessar pelo problema, procurando uniformizar os conceitos adotados pelos diferentes campos das geociências e melhor compreender sua gênese, distribuição e propriedades.

---

No Seminário Internacional sobre Processos de Lateritização, que foi realizado em São Paulo, Schellmann (1982) apresenta, como resultado dos estudos efetuados pelos grupos de trabalho dos organismos internacionais, a moderna definição de laterito: “lateritos são produtos de intemperismo subaéreo de rochas. Eles consistem predominantemente de assembléias minerais à base de goethita, hematita, hidróxidos de alumínio, minerais caulíníticos e quartzo. Na rocha-mãe caulinizada, toda a alumina está presente na forma de caulinita, todo o ferro na forma de óxidos de ferro e toda a sílica na forma de caulinita e quartzo primário. Essa definição inclui todos os materiais altamente intemperizados, fortemente empobrecidos em sílica e enriquecidos em ferro e alumínio, independente das suas propriedades físicas e morfológicas (cor, consistência etc).”

Nesta mesma linha de raciocínio, Bárdossy e Aleva (1990) ampliaram o conceito de Schellmann (1982), definindo as rochas lateríticas como representantes de uma quarta família de rochas. Costa (1993), Tardy (1993) e Martins (2000) também consideraram os materiais geológicos que constituem os solos lateríticos como rochas residuais.

Pela definição adotada, é evidente que os lateritos, apesar de formados a partir de um único processo, podem englobar vários tipos de produtos, pois a intensidade do processo pode variar de local para local, assim como o tipo de material de origem, tempo de atuação do processo, relevo, atividade biológica etc.

### **2.2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DO SOLO**

Estudos sobre solos demonstram que sua origem e evolução sofrem a influência de cinco fatores (ABGE, 1998):

- ✓ clima, condicionando principalmente a ação da água da chuva e da temperatura;
- ✓ materiais de origem, condicionando a circulação interna da água e a composição e conteúdo mineral;
- ✓ organismos, vegetais e animais, interferindo no micro-clima, formando elementos orgânicos e minerais, e modificando as características físicas e químicas;
- ✓ relevo, interferindo na dinâmica da água, no micro-clima e nos processos de erosão e sedimentação;
- ✓ tempo, transcorrido sob ação dos demais fatores.

---

Simplificadamente, pode-se afirmar que o desenvolvimento do solo inicia-se com o intemperismo, representado pelos fenômenos físicos e químicos que, agindo sobre a rocha, conduzem à formação de resíduos não consolidados conhecidos como saprolíticos que constituem o material originário do solo, do ponto de vista pedológico. Esses materiais, provenientes da desagregação da rocha, poderão permanecer no local em que se desenvolveram, ou serem transportados pela ação de agentes como da gravidade, das águas correntes, das geleiras e dos ventos para outro local.

Como pôde ser observado, os aspectos climáticos são muito importantes para a formação do solo. Dentre estes, a temperatura e a precipitação pluviométrica se destacam. A influência da temperatura mostra-se bastante evidente quando se aplica a Lei de Vant´Hoff, segundo a qual, para cada aumento de 10° de temperatura, a velocidade de uma reação química aumenta de duas a três vezes. Assim, com o aumento da temperatura, torna-se maior a profundidade do terreno submetido à alteração física e química. Resulta daí que, mantidas as condições pluviométricas, as regiões de clima temperado apresentam solos substancialmente menos profundos que as regiões tropicais, onde é comum encontrar solos com vários metros de profundidade. As regiões de clima temperado poderão ser menos propensas a ter camadas de solo mole.

Portanto, dentre os diferentes tipos de solos que se encontram entre os trópicos os mais comuns e de maior interesse para as obras de engenharia são os solos lateríticos pelas propriedades e comportamentos particulares que apresentam. Uma característica importante dos solos tropicais lateríticos é a alta concentração de alumínio e/ou ferro em relação aos demais constituintes. Os solos tropicais lateríticos são o produto da alteração tropical e subtropical sofrida pelas rochas ao longo do tempo tendo como fatores intervenientes:

- ✓ o tipo de rocha mãe;
- ✓ a composição da rocha mãe;
- ✓ a origem geológica da rocha mãe;
- ✓ as condições de intemperismo.

O intemperismo é definido como o conjunto de modificações de ordem física (desagregação) e química (decomposição) que surge devido à ação da atmosfera, hidrosfera e biosfera na transformação da crosta terrestre. Com a atuação do intemperismo, a rocha sã se altera podendo chegar à formação dos solos.

Com relação ao Brasil, que é um país muito extenso, com variações climáticas ao longo de sua extensão, entende-se que o solo laterítico pode apresentar propriedades e comportamentos bastante variáveis, justamente por ser dependente da localização. Na região do Distrito Federal, onde existe uma variação climática ao longo do ano, com período de secas e de chuvas bem definidos, constata-se que o processo de alteração responsável pela formação dos solos é distinto de muitas regiões.

### 2.3. PERFIS DOS SOLOS TROPICAIS BRASILEIROS

Em geral, os perfis dos solos tropicais apresentam uma zonalidade vertical possível de ser identificada no próprio campo, sendo assim, nitidamente, estruturados em horizontes. À medida que se transforma em solo, o material de origem vai se diferenciando em camadas mais ou menos paralelas à superfície, camadas essas denominadas horizontes. A Figura 2.2 ilustra o perfil predominante em regiões de clima tropical baseado na proposta de classificação de Martins (2000).

Devido à complexidade dos solos do Distrito Federal, Cardoso (2002) baseou-se na análise das várias proposições para a descrição de perfis de intemperismo e em sua experiência com os solos lateríticos do Cerrado brasileiro, para sugerir uma nova proposta de descrição dos horizontes em solos lateríticos para o uso nas áreas de geotecnia e geologia. O autor informa que essa proposta se mostrou mais adequada e completa, prevendo, inclusive, a existência de um horizonte pouco contemplado em propostas anteriores - horizonte ferruginoso.

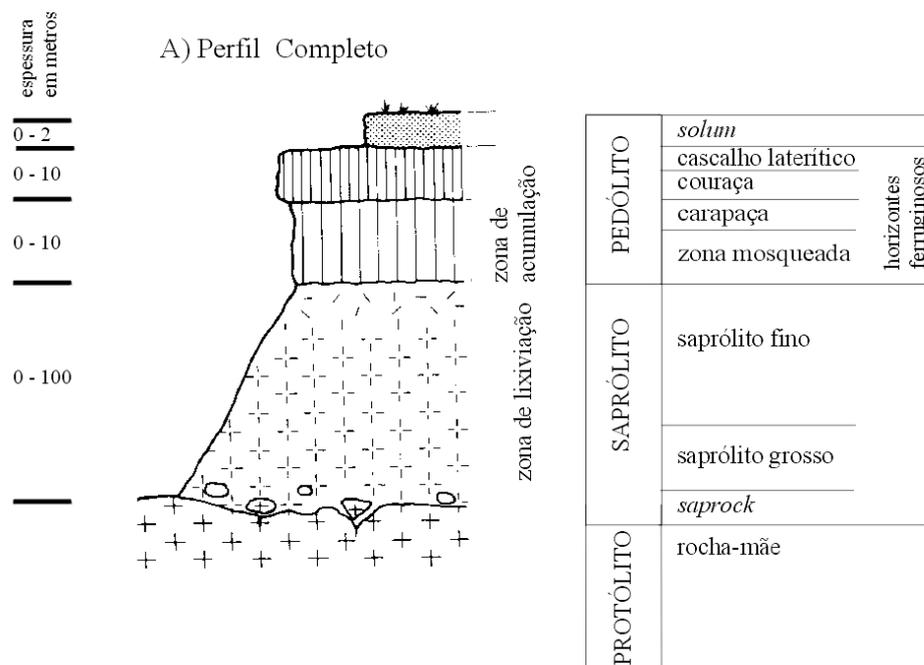


Figura 2.2 - Perfil laterítico (Martins, 2000).

Na realidade, esta proposta é uma adaptação realizada a partir das descrições de Martins (2000), Pastore (1995) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). Salienta-se que apesar de sua proposta ser baseada nos solos dos Cerrados, sua descrição poderá ser aplicada em perfis de solo laterítico de qualquer região, uma vez que ela mantém como preceito o desenvolvimento do perfil de acordo com o grau de intemperismo local.

A Tabela 2.1 mostra uma tentativa de correlações entre os horizontes das diferentes classificações de perfis lateríticos completos, aplicadas em distintas áreas do conhecimento dos solos (geologia, pedologia e geotecnia). É importante ressaltar que o perfil apresentado tem uma descrição ideal, no entanto, raramente são observados todos estes horizontes em um mesmo perfil. Esses geralmente são truncados, apresentando a predominância de um ou mais horizontes (Delgado, 2007; Martins, 2000 e Cardoso, 2002).

**Tabela 2.1** - Correlações entre as diferentes classificações de perfis lateríticos completos.(Cardoso, 2002)

<b>Maiores Subdivisões</b>	<b>Nova Proposta Cardoso (2002)</b>	<b>Martins (2000)</b>	<b>Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999)</b>	<b>Pastore (1995)</b>
	Horizonte <u>O</u>		Horizonte <u>O</u>	Solo
	Horizonte <u>A</u>		Horizonte <u>A</u>	orgânico
		<b>Solum</b>		
	Horizonte <u>B</u>		Horizonte <u>B</u>	Horizonte laterítico
<b>Pedólito</b>	Cascalho laterítico	Cascalho laterítico	Horizonte <u>B</u> com caráter petroplântico	
(0 a 30 m)	Couraça ferruginosa	Couraça ferruginosa	Horizonte <u>B</u> litoplântico ou similar a litoplântico	???
	Carapaça	Carapaça	Horizontes <u>C</u> plântico ou similar a plântico, ou glei com mosqueamentos ou similar a glei com mosqueamentos	
	Zona Mosqueada	Zona Mosqueada		
<b>Saprólito</b>	Saprólito fino ou argiloso	Saprólito fino ou argiloso	Horizonte <u>C</u> glei sem mosqueamentos ou similar a glei sem mosqueamentos	Solo saprólítico
(0 a 100 m)	Saprólito ou saprólito grosso	Saprólito grosso	Horizonte <u>C</u>	Saprólito
	Rocha muito alterada	ou arenoso		Rocha muito alterada
	Rocha alterada	Saprock	Horizonte <u>R</u>	Rocha alterada
<b>Protólito</b>	Rocha sã	Rocha-mãe		Rocha sã

- 
- **Solum** (espessura entre 0 e 15 m) - Material superior do perfil e que pode ser residual ou não. Caracteriza-se por ser inconsolidado e apresentar estruturas formadas pela intensa atividade biológica, individualizando os horizontes A e B da classificação morfo-genética de solos.
  - **Horizontes Ferruginosos** - Envolve um ou mais horizontes, diferenciados pelo grau de endurecimento de feições pedológicas resultantes do enriquecimento de oxi-hidróxidos de Fe e subsidiariamente de Al. Constituem horizontes ferruginosos: o cascalho laterítico, couraça ou duricrosta, carapaça, zona mosqueada ou horizonte mosqueado.
  - **Saprólito** (espessura entre 1 e 100 m) - Pode ser subdividido em saprólito fino ou argiloso e saprólito grosso ou arenoso, apesar desta terminologia não representar a textura real do material. O saprólito fino ocorre acima do saprólito grosso e apresenta-se enriquecido em argilo-minerais do tipo 1:1, enquanto o saprólito grosso pode apresentar argilo-minerais do tipo 2:1. No saprólito ocorrem processos de lixiviação, com retirada de sílica do sistema, produto da hidrólise de silicatos, e geração de argilo-minerais. O Fe é translocado para outros horizontes, ou retirado do perfil, induzindo o aspecto pálido típico desse horizonte.
  - **Saprock** - Em geral, ocorre uma transição entre a rocha-mãe e o saprólito, por meio de fragmentos de rocha fresca imersos em matriz intemperizada. Essas características indicam um intemperismo diferencial em função da organização dos materiais (estrutura, textura e trama) e da composição mineralógica. O limite de diferenciação entre essa transição e o saprólito grosso é tênue. Pode ser definida empregando a proporção entre os materiais fresco e intemperizado, ou seja, se o primeiro domina sobre o segundo, caracteriza-se o *saprock*, e o inverso, o saprólito grosso.
  - **Rocha-mãe ou Protólito** - Caracterizada pela ausência de feições de intemperismo.

Com relação aos estudos pedológicos, esses se concentram na parte superficial do perfil do solo, onde é mais evidente a atuação de fatores pedogenéticos, diferenciando este perfil em horizontes distinguidos por letras maiúsculas, onde os principais são denominados: O, A, B, C e R.

As características principais destes horizontes estão resumidamente descritas a seguir, segundo Salomão e Antunes (1998):

- 
- **Horizonte Q** - horizonte orgânico superficial constituído por detritos vegetais e substâncias húmicas acumuladas na superfície, em ambientes onde não há impedimento à drenagem. Ocorre, em geral, em áreas de florestas, distinguindo-se do horizonte mineral subjacente, pela coloração mais escura, e pelo conteúdo em matéria orgânica. O mínimo de matéria orgânica é de 20%.
  - **Horizonte A** - horizonte mineral superficial ou subjacente ao Horizonte Q, com a incorporação de matéria orgânica mineralizada. É o horizonte de maior atividade biológica, apresentando coloração escurecida pela presença de matéria orgânica. Existem vários tipos de Horizonte A, dependendo dos ambientes em que são formados, uns mais pobres em matéria orgânica e outros com maiores teores de compostos orgânicos.
  - **Horizonte B** - horizonte mineral subsuperficial situado abaixo do Horizonte A. É considerado o horizonte mais importante na diferenciação das classes de solo, resultando de transformações relativamente acentuadas do material originário e/ou ganho de constituintes minerais e/ou orgânicos migrados de outros horizontes.
  - **Horizonte C** - horizonte mineral, relativamente pouco afetado pelos processos pedogenéticos mais superficiais, formado a partir da decomposição do substrato rochoso, não apresentando características diagnósticas dos horizontes A e B.
  - **Horizonte R** - camada correspondente ao substrato rochoso.

#### 2.4. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SOLOS LATERÍTICOS

Segundo Carvalho (1995), os tipos de reações que acarretam as alterações químicas no ambiente superficial são: hidratação-desidratação, oxidação-redução, dissolução-precipitação, carbonatação-descarbonatação, hidrólise e queluviação. Entre essas reações químicas, as principais identificadas nos solos brasileiros são a hidrólise e a queluviação.

---

### 2.4.1. HIDRÓLISE

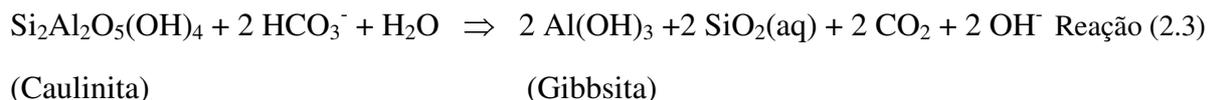
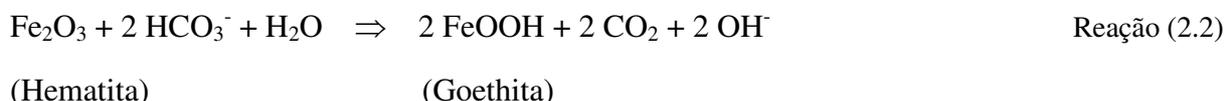
No Brasil, o mecanismo essencial de alteração superficial das rochas é a hidrólise (Melfi e Pedro, 1977). A reação ocorre com a quebra da ligação entre os íons dos minerais pela ação dos íons  $H^+$  e  $OH^-$  da água. Os prótons  $H^+$  e íons  $OH^-$ , cátions e ácido silícico são colocados em solução, podendo ser formados produtos secundários.

Para Melfi e Pedro (1978), as soluções de alteração que ocorrem nos meios tropicais são caracterizadas por uma certa carga em  $CO_2$ , devido à rápida degradação da matéria orgânica, que confere a estas soluções características levemente ácidas, pH em torno de 5,5 a 6,0.

Tardy (1993) admite que boa parte do  $CO_2$  dissolvido nas águas percolantes proveniente da mineralização da matéria orgânica, provem da seguinte reação:



Esse  $CO_2$  dissolvido na água como  $HCO_3^-$  participa das reações de hidrólise dos minerais, como por exemplo:



O pH resultante da degradação da matéria orgânica é uma propriedade de fundamental importância para a alteração, pelo fato de controlar de forma específica o comportamento dos principais elementos constituintes dos minerais formadores das rochas (alumínio, silício, ferro, alcalinos e alcalino-terrosos). Assim, nessas condições de pH, o alumínio e o ferro são praticamente insolúveis, acumulando-se na forma de óxidos e hidróxidos. Os elementos alcalinos e alcalino-terrosos são, na maioria das vezes, totalmente lixiviados, enquanto que a sílica também é mobilizada, porém com velocidade mais baixa do que os alcalinos. Porém, a hidrólise pode ser mais ou menos completa, de acordo com as condições termodinâmicas reinantes, e, com isso, o grau de eliminação dos elementos químicos, o que caracteriza os diferentes tipos de hidrólise:

---

- **Hidrólise total** - ocorre quando toda a sílica e bases são eliminadas, enquanto o  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , ao contrário, acumula-se *in situ* e se individualiza em forma de hidróxidos de alumínio do tipo gibbsita. A formação da gibbsita corresponde a um processo de alteração bem definido, denominado Alitização.

- **Hidrólise parcial** - ocorre onde uma parte da sílica liberada do mineral primário reage com o alumínio para formar “sais básicos” insolúveis que são hidroxissilicatos aluminosos (argilas). É o processo denominado Sialitização, onde a dessilicatação do meio é incompleta, porém a eliminação dos cátions básicos pode ser mais ou menos elevada. Quando é importante (quase-total), individualiza-se argilo-mineral com estrutura 1:1 do tipo caulinita, e este é conhecido como Monossialitização (Vieira,1988). No entanto, se a eliminação de cátions básicos é parcial, ocorre a gênese de argilo-minerais com estrutura 2:1 do tipo esmectita, cuja carga das camadas é compensada pela presença de íons em posições interfoliares. Neste caso, tem-se a Bissialitização.

#### 2.4.2. QUELUVIAÇÃO

Segundo Carvalho (1995), a queluviação é o processo em que os elementos metálicos, de maneira especial o alumínio e o ferro-férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), são móveis em relação à sílica que, neste tipo de intemperismo, tende a se concentrar no perfil de alteração. A saída do perfil de alteração de elementos metálicos dá-se principalmente sob a forma de quelatos (complexos orgânicos). Tem-se categorizados dois mecanismos de queluviação que são conhecidos como queluviação total e queluviação parcial.

- **Queluviação total** - ocorre com a total saída de bases e do alumínio, este último complexado. A alteração requer condições de acidez relativamente alta, na qual a atividade de  $\text{H}^+$  na solução reagente e percolante tende ser maior que a concentração molar do  $\text{Al}^{3+}$  a ser liberado. O material residual será um produto silicoso.

- **Queluviação parcial** - além da permanência da sílica, existe uma retenção parcial do alumínio e mesmo de algumas bases, tais como o K e o Mg. A solução meteórica percolante não é tão ácida como no caso precedente, de forma que a concentração molar do  $\text{Al}^{3+}$  liberado pode ser igual ou maior a atividade do  $\text{H}^+$  dessa solução. Como há uma retenção parcial de Al, temos, pela sua redistribuição no perfil, a formação de argilo-minerais 2:1 ou do grupo das esmectitas e o processo chama-se Aluminossialitização.

---

## 2.5. PRINCIPAIS MINERAIS CONSTITUINTES DOS SOLOS LATERÍTICOS

De acordo com Rajj (1986), as propriedades eletroquímicas dos solos, sofrem uma grande influência da sua composição mineralógica, da superfície específica dos minerais de argila, das cargas do complexo coloidal e dos tipos de íons presentes na solução do solo.

O conhecimento da mineralogia dos solos é importante para o entendimento de seu comportamento, pois é o primeiro fator que controla o tamanho, forma e propriedades físico-químicas das partículas de solo. Esses solos foram classificados em fases e divididos em um formato mineralógico.

Os solos são constituídos das fases:

- **Sólida** – constituída de matérias orgânicas e inorgânicas;
- **Líquida** – constituída por uma solução eletrolítica de água;
- **Gasosa** – sua composição depende das reações químicas e das atividades biológicas que se desenvolvem no solo.

Mineralogicamente, os solos como compostos inorgânicos se dividem em:

- **Minerais** – solos granulares;
- **Argilominerais** – solos finos / argilas;
- **Óxidos e Hidróxidos de Ferro e Alumínio** – micro e macro agregados.

O solo propriamente dito pode ser composto apenas por minerais primários (solos muito jovens e pouco alterados), minerais primários e argilominerais (solos com certo grau de intemperização), argilominerais (solos intemperizados) e argilominerais com fração importante de óxidos e hidróxidos de ferro e/ou alumínio (solos profundamente intemperizados).

Os solos formados por minerais não argílicos são o produto do intemperismo físico de rochas, constituindo-se em fragmentos de rocha ou grãos dos próprios minerais que formam a rocha de origem, como o quartzo, nas areias. São estáveis em presença de água, pois suas partículas são eletricamente neutras. As estruturas dos solos formadas por minerais não argílicos são ditadas principalmente pelo tamanho e forma dos grãos, textura e distribuição granulométrica. A mineralogia desses solos, no entanto, tem influência em seu comportamento mecânico, constituindo-se a resistência do mineral que os formam, uma parcela de grande importância na resistência e estabilidade do material.

---

Os argilominerais, mesmo presentes nos solos em menor proporção que os minerais não argílicos, têm grande influência no comportamento dos solos. Têm dimensões coloidais, por vezes agregados em dimensões maiores, sendo a superfície das partículas eletricamente carregadas. A mineralogia das argilas, ou solos finos, é de particular importância para a consolidação do solo usando os fenômenos eletrocínéticos. As partículas de solos finos são, geralmente, laminares, com superfícies eletronegativas e características plásticas quando misturados com água.

Para um maior entendimento do comportamento do solo laterítico é importante conhecer os minerais e seus grupos constituintes tais como descritos por Botelho da Costa (1973):

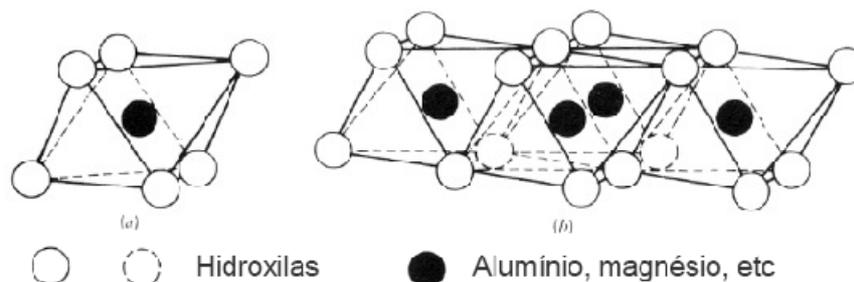
### 2.5.1. MINERAIS PRIMÁRIOS

Os diversos minerais que constituem a crosta terrestre apresentam diferente resistência à alteração, uns decompondo-se rapidamente logo nos primeiros estágios da meteorização e outros persistindo mesmo após meteorização bastante intensa. No segundo caso, típico dos processos intempéricos das regiões tropicais de clima úmido, estão o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), o rutilo/anatásio ( $\text{TiO}_2$ ) e o zircão ( $\text{Zr}(\text{SiO}_4)$ ).

### 2.5.2. MINERAIS DE ARGILA

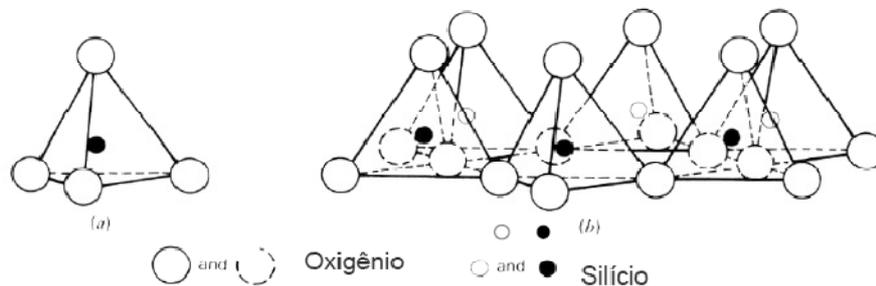
Admite-se que os cristais dos minerais de argila são constituídos por lâminas de unidades estruturais, sobrepostas de forma análoga à que se verifica nos cristais de mica, estando os íons constituintes dispostos segundo um reticulado regular. No reticulado de íons de muitos minerais de argila existem duas unidades:

- **Unidade Octaédrica** - constituída por um íon de alumínio, ferro ou magnésio que ocupa o centro de um octaedro cujos vértices são ocupados por íons  $\text{O}^{2-}$  ou  $\text{OH}^-$ .



**Figura 2.3** - Representação esquemática das unidades e camada octaédrica (Grim, 1953).

- **Unidade Tetraédrica** - formada por um íon de silício que ocupa o centro de um tetraedro cujos vértices são ocupados por íons  $O^{2-}$  ou, em certos casos,  $OH^-$ .



**Figura 2.4** - Representação esquemática das unidades e camada tetraédrica (Grim, 1953).

As ligações entre estas unidades em uma camada e entre as camadas de cada lâmina são ligações com forte caráter covalente. Na ligação entre lâminas adjacentes, podem intervir ligações eletrostáticas ou essencialmente apenas forças coesivas de superfície (forças de Van der Waals) que são fracas em comparação com as de atração eletrostática (forças de Coulomb).

Em vários minerais de argila, a estrutura está eletrostaticamente desequilibrada, como resultado, segundo se admite, da substituição de íons durante a formação dos minerais, sem ou com pequena alteração das dimensões das unidades estruturais e denominadas, por isso, substituições isomórficas. É o caso da substituição de  $Si^{4+}$  por  $Al^{3+}$ , ou de  $Al^{3+}$  por  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  por  $Li^+$ , que originam um excesso de cargas negativas. Esse assunto será tratado mais adiante.

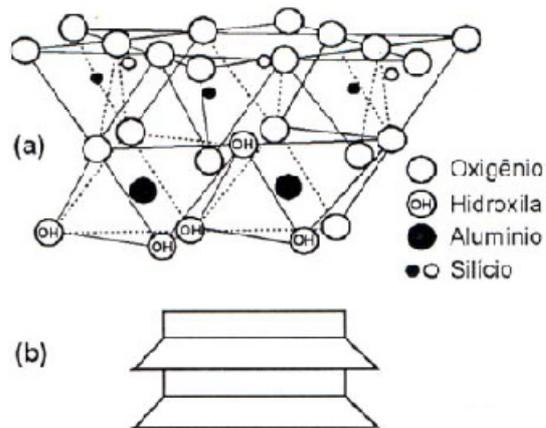
Deste modo, os minerais de argila são eletronegativos, apesar que, em certas condições, possam apresentar “zonas” de carga positiva (Botelho da Costa, 1973).

### ***Grupo da Caulinita***

Este grupo inclui diversos minerais: caulinita, haloisita, dickita, nacrita e outros. De todos, a caulinita é o que tem maior importância nos solos e por isso será bastante explorado neste capítulo.

A caulinita é composta por uma única camada tetraédrica de sílica e uma camada octaédrica de alumina combinadas numa unidade estrutural. Uma vez que cada unidade contém uma camada de sílica e uma camada de alumina, diz-se que o mineral é do tipo 1:1.

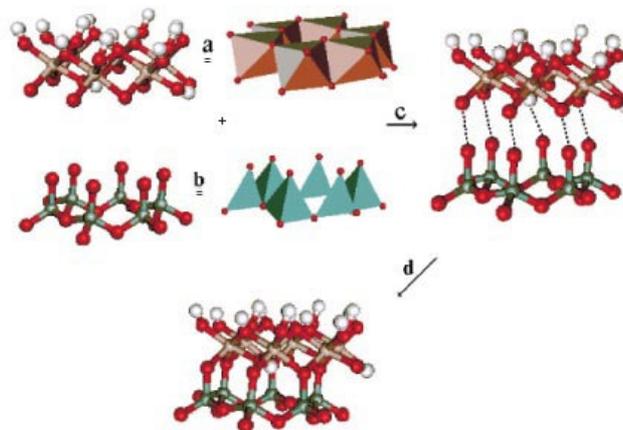
A ligação entre as camadas duplas é feita por forças de Van der Waals e por pontes de hidrogênio bastante resistentes, o que lhes confere uma estrutura rígida e estável em presença de água.



**Figura 2.5** - Estrutura de uma camada de caulinita; (a) atômica; (b) simbólica.

Um aspecto interessante é que a caulinita não apresenta (ou só em muito pequena escala) substituições isomórficas, pelo que não há praticamente excesso de cargas negativas resultantes deste mecanismo. Outro fato é que não se verifica entrada de líquido para o espaço entre unidades quando a argila é umedecida. A superfície específica da caulinita está apenas dependente de suas faces externas, sendo relativamente pequena.

Com relação as suas características estruturais, a caulinita possui carga elétrica e poder de retenção de água fraca, em comparação com os minerais dos outros grupos; praticamente não apresenta expansibilidade e torna-se plástica para teor de umidade relativamente baixo. A Figura 2.6 apresenta a estrutura da gibbsita (a), sílica (b), o processo de montagem da estrutura ideal da caulinita (c) e a estrutura final da caulinita (d).



**Figura 2.6** - Processo de montagem da forma atômica de uma estrutura ideal da caulinita.

## Grupo da Montmorilonita

Este grupo, tal como o da caulinita, contém vários minerais; montmorilonita, beidelita, nontronita, saponita, hectorita etc., sendo o primeiro o mais importante desse grupo. A estrutura mais admitida para a montmorillonita é composta por duas camadas tetraédricas de sílica e uma camada octaédrica de alumina combinadas numa unidade estrutural. Trata-se por isso de um mineral do tipo 2:1.

O empilhamento das placas é regido por forças polares relativamente fracas e por forças de van der Waals. Entre essas placas existem lacunas denominadas galerias ou camadas intermediárias, nas quais residem cátions trocáveis como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ , fixos eletrostaticamente e com a função de compensar cargas negativas geradas por substituições isomórficas que ocorrem no reticulado, como por exemplo,  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$ , ou  $\text{Mg}^{2+}$  por  $\text{Li}^+$ . Cerca de 80% dos cátions trocáveis na montmorilonita estão presentes nas galerias e 20% se encontram nas superfícies laterais.

Duas unidades adjacentes confrontam-se por oxigênios, o que dá ligações muito mais fracas entre as unidades em relação ao caso da caulinita. Daqui resulta, por um lado, clivagem muito fácil, e, por outro, a possibilidade de acesso de moléculas de água que se dispõem em várias camadas, outras moléculas polares e íons, entre unidades adjacentes. Deste modo, a montmorilonita tem reticulado expansível, variando o espaçamento basal com o grau de solvatação e a espécie de cátions presentes. A montmorilonita é caracterizada por carga elétrica, poder de retenção de água e expansibilidade elevados e tornar-se plástica para um teor de umidade superior ao correspondente à caulinita.

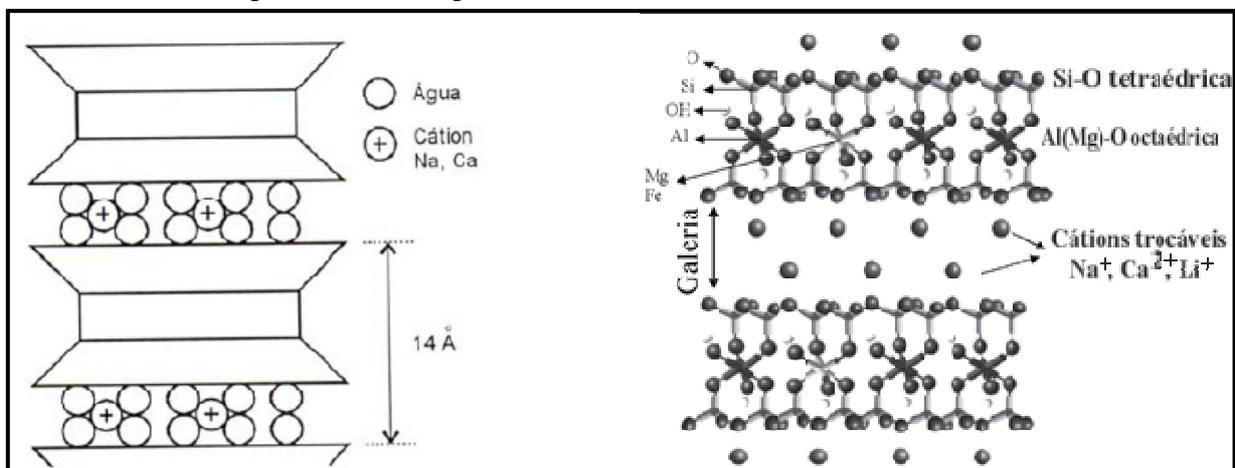


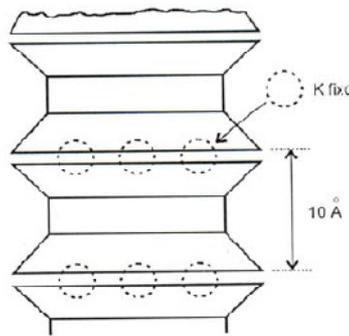
Figura 2.7 - Estrutura da montmorilonita de forma simbólica e atômica.

---

## *Grupo da Iilita*

Trata-se de um grupo um tanto mal definido, constituído por vários minerais designados genericamente por ilitas. São semelhantes à muscovita, da qual diferem essencialmente por terem menos potássio e maior teor em água. Por esta semelhança, as ilitas são também freqüentemente designadas por minerais micáceos ou micas hidratadas.

A unidade estrutural das ilitas é composta por duas camadas tetraédricas de sílica com uma camada octaédrica de alumina central. São também, portanto, minerais do tipo 2:1. As camadas combinadas são ligadas por íons  $K^+$ , não trocáveis, que são ligações mais frágeis que as das caulinitas.



**Figura 2.8** - Estrutura básica da ilita.

Tal como na montmorilonita, há sempre consideráveis substituições isomórficas. Porém, há uma diferença muito importante: nas ilitas estas substituições dão-se principalmente nas camadas tetraédricas, em que há sempre substituições de silícios por alumínio, e a deficiência de carga que daí resulta é equilibrada por íons potássio, que fazem parte da malha cristalina e se situam entre camadas tetraédricas de unidades contíguas. Estas substituições não contribuem, portanto, para a carga elétrica de cristal.

As partículas da ilita apresentam, então excesso de cargas negativas resultantes de substituições isomórficas, mas devem-se apenas a substituições de alumínio nas camadas octaédricas. Os íons potássio da estrutura parecem atuar como pontes que ligam as unidades umas às outras e, desse modo, ao contrário do que sucede com a montmorilonita, o reticulado das ilitas é muito pouco expansível na presença da água e outros líquidos polares.

---

## ***Outros Minerais de Argila***

As vermiculitas e cloritas são muito menos abundantes nos solos tropicais que os minerais anteriores e por este motivo serão tratados com menor intensidade. As vermiculitas são minerais 2:1. A estrutura é semelhante à da biotita, estando às unidades adjacentes separadas por duas camadas apenas de moléculas de água.

Os cristais das vermiculitas são maiores do que os de montmorilonita. No entanto, as vermiculitas manifestam carga elétrica maior. Também possuem reticulado expansível, mas com menor expansibilidade que o grupo da montmorilonita.

## **Óxidos e Hidróxidos de Alumínio e Ferro**

Quimicamente, os óxidos de ferro e alumínio liberados pelo intemperismo tropical na subsuperfície não são dissolvidos tanto quanto acontece em ambientes mais ácidos (típicos de regiões temperadas) e, por conseguinte, os mesmos tendem a permanecer *in situ*. O óxido de ferro é cristalizado como hematita na época seca e como goethita em um ambiente constantemente úmido. A gibbsita será o principal óxido de alumínio formado, resultando num solo de cores predominantemente vermelhas (hematita) ou amarelas (goethita).

Esses compostos químicos apresentam, geralmente, elevada superfície específica. São pouco plásticos ou não plásticos. Não apresentam expansão. Possuem CTC desprezível nas condições de pH predominantes nos solos e ao contrário dos argilominerais apresentam excesso de carga positiva em muitas situações.

A goethita, hematita, lepidocrocita e maghemita, em ordem decrescente, são os oxi-hidróxidos de ferro mais comuns nos solos. A formação dos oxi-hidróxidos de ferro pedogenéticos depende de vários fatores que refletem o ambiente pedogenético no qual eles foram formados (Schwertmann e Taylor, 1989).

A unidade básica estrutural para todos os óxidos de Fe é o octaedro, no qual cada átomo de Fe é rodeado ou por seis oxigênios ou também por íons  $O^{2-}$  e  $OH^-$ . Assim, vários óxidos de Fe diferem principalmente no arranjo do octaedro. O oxigênio e os íons  $OH^-$  formam camadas empacotadas hexagonalmente, denominadas  $\alpha$ -fases, ou empacotadas cubicamente, denominadas  $\gamma$ -fases.

---

A hematita,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , é um mineral secundário não-magnético e avermelhado, presente principalmente em solos bem drenados. A hematita no solo é favorecida pela alta razão de liberação de ferro, pela rápida decomposição de matéria orgânica, boa aeração, temperatura do solo quente e pH neutro.

A goethita,  $\alpha\text{-FeOOH}$ , é um mineral secundário não-magnético marrom-amarelado, presente na maioria dos solos. Nos solos é favorecida pela média a baixa temperatura, ambiente úmido, presença de matéria orgânica, baixa taxa livre de ferro, aeração restrita e pH médio para ácido.

A lepidrocrocita,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , é um mineral alaranjado, secundário não-magnético presente em solos não calcáreos em regime de saturação sazonal. A maghemita,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , é um mineral secundário magnético, marrom-avermelhado, presente em solos bem drenados das áreas tropicais, ou lugares onde os solos tenham sido aquecidos a temperaturas relativamente altas, tais como onde a vegetação tenha sofrido queimada.

A magnetita é um mineral primário, magnético, preto, herdado de rochas ígneas. Goethita, hematita, maghemita, lepidrocrocita são pigmentos fortes, esses justificam a maioria das cores vermelhas e marrons nos solos. A magnetita geralmente ocorre sob partículas do tamanho de areia e silte, assim ela não dá ao solo cor preta.

A presença de minerais de óxido de ferro influi na natureza da carga, tanto o tipo quanto a magnitude (Eswaran *et al.*, 1983). Com o intemperismo e a formação do solo, argilas alumino-silicatadas, tendo permanente carga de superfície negativa, são progressivamente destruídas e há uma relativa acumulação de oxi-hidróxidos de ferro e de alumínio (sesquióxidos) resultando em solos com cargas de superfície dependente do pH, isto é, a carga poderá ser negativa ou positiva, dependendo do pH do solo.

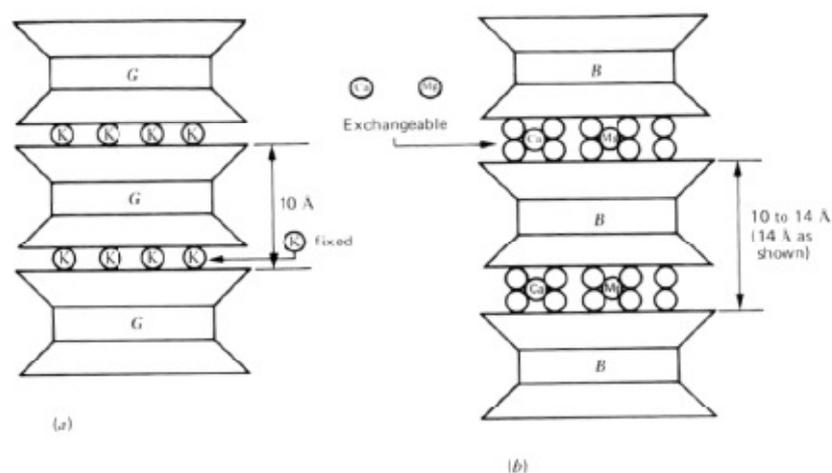
De acordo com Rajj (1971), as características mineralógicas dos solos afetam também o Ponto de Carga Zero (PCZ), propriedade que será explorada em outro item. O autor menciona que a presença de caulinita, silicato de alumínio de baixa atividade associada a baixos teores de argilas sesquioxídicas, ocasiona uma diminuição no PCZ, enquanto que solos ricos em sesquióxidos apresentam maiores valores de PCZ.

## 2.6. SUBSTITUIÇÃO ISOMÓRFICA

As substituições isomórficas são importante fator na estrutura e comportamento dos argilominerais. Entende-se por substituição isomórfica aquela que ocorre nas unidades cristalográficas básicas, onde um íon normalmente encontrado é substituído por outro, mantendo-se a mesma estrutura cristalográfica. Apesar dos cátions introduzidos terem tamanhos e valência diferentes dos que foram substituídos, estes não alteram a estrutura cristalográfica. Os tamanhos diferentes geram distorções estruturais, e as valências diferentes geram desequilíbrio de cargas elétricas. De modo geral as substituições tornam a partícula carregada negativamente.

Estas substituições ocorrem durante a formação do mineral, em todos os argilominerais, com uma possível exceção da caulinita. O comportamento dos argilominerais seria menos complexo se não ocorressem imperfeições nestas estruturas.

Em uma folha de gibsite ideal todos os cátions são de alumínio, em uma folha de brucita todos os cátions são de magnésio, em uma folha de tetraedros de silício todos os cátions são silício. Na formação dos argilominerais costumam ocorrer substituições isomórficas tais que algumas posições nas estruturas tetraédricas e octaédricas são ocupadas por cátions diferentes da estrutura ideal. Exemplos comuns são o Al no lugar do Si, o Mg no lugar do Al e o Fe no lugar do Mg.



**Figura 2.9** - Diagrama esquemático da estrutura da; (a) muscovita e illita, (b) vermiculita

(Mitchell, 1993).

---

## 2.7. SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

Outra importante característica para as argilas é a superfície específica, que é a razão entre a área superficial das partículas de solo e sua massa. A área superficial corresponde ao somatório das áreas superficiais de todos os grãos contidos em uma unidade de massa de solo.

Quanto menor é o tamanho das partículas maior será sua superfície específica. Assim, as argilas apresentam uma superfície específica maior que os solos granulares, como pode ser observado na Tabela 2.2. No caso da migração de líquidos através do solo, quanto maior é a superfície específica maior é o contato e, portanto, a interação do solo com o fluido dos poros, o que interfere nos processos de transporte. As grandes áreas específicas facilitam os fenômenos de troca entre os íons dos argilominerais e o meio líquido em que estão dispersas.

**Tabela 2.2** - Superfícies específicas típicas (WHITLOW, 1995).

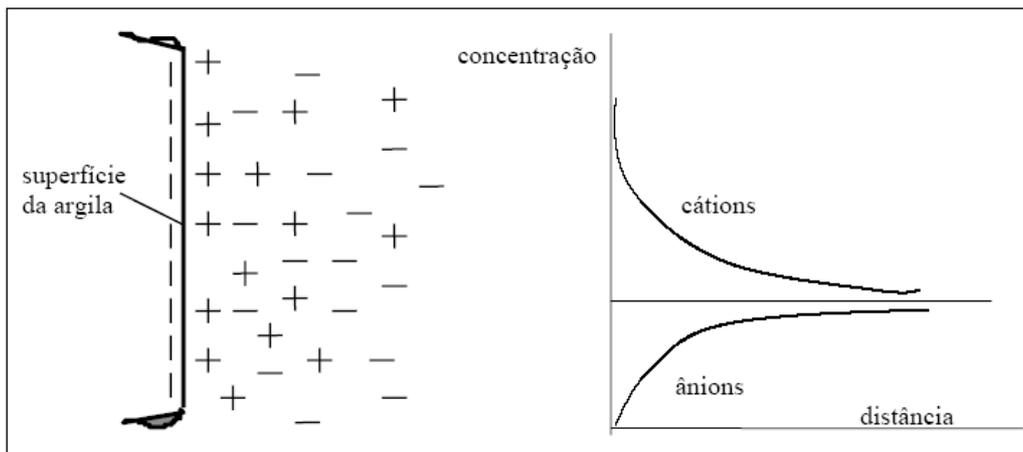
SOLO	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /g)
Areia (Quartzo)	0,02
Caulinita	20
Ilita	80
Montmorilonita	800

## 2.8. SISTEMA ARGILA-ÁGUA: CÁTIOS TROCÁVEIS, CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA E DUPLA CAMADA DIFUSA.

O estudo das cargas elétricas é de fundamental importância para o entendimento de diversos fenômenos físico-químicos que ocorrem no solo, o que poderá ajudar a compreender o fenômeno eletrocinético induzido no solo.

Como já descrito, devido principalmente às substituições isomórficas, as quais provocam um desequilíbrio de cargas, as partículas de argila possuem normalmente carga de superfície negativa. Para neutralizar tais cargas, os cátions livres no solo, como o Ca<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, são atraídos e adsorvidos para a superfície das partículas.

Em um solo seco, os cátions em excesso e os ânions associados a estes, estão presentes como sais precipitados. Na presença de água os sais precipitados solubilizam. Como a concentração dos cátions próximos às superfícies das partículas é maior, há uma tendência desses cátions de se difundirem para equilibrar a concentração na solução. Essa tendência é, porém, eletrostaticamente contida pela carga eletronegativa das superfícies das partículas, enquanto os ânions são excluídos pelo campo negativo de força das partículas, dando origem a uma distribuição onde se encontra uma concentração maior de cátions próximo à superfície das partículas. A concentração de cátions decresce com a distância à superfície da partícula e a concentração de ânions cresce, conforme distribuição mostrada na Figura 2.10.



**Figura 2.10** - Distribuição de carga na água adjacente à superfície da partícula (Mitchell, 1976).

A superfície eletronegativa e a distribuição de cargas adjacentes na água formam a chamada dupla camada difusa (DCD), que incorpora o balanço entre as forças de atração dos íons pela superfície das partículas e o gradiente de concentração de íons causando sua difusão a partir da superfície da argila. Para que exista o equilíbrio desse campo, surge um potencial elétrico. O campo elétrico da dupla camada forma uma espécie de membrana semipermeável que permite trocas com os íons em solução.

Em solos finos, a presença da dupla camada difusa promove o surgimento de diversos fenômenos eletrocinéticos no solo como consequência da aplicação do campo elétrico (Mergulhão, 2002). Várias teorias foram propostas para a descrição da distribuição de íons adjacentes a superfícies carregadas em colóides, sendo a Teoria de Gouy-Chapman a mais largamente utilizada e aceita.

O modelo matemático para a Teoria de Gouy-Chapman apresentado em Mitchell (1993) considera a superfície das partículas como plana e assume as seguintes hipóteses simplificadoras:

- 
- a) os íons da DCD são cargas pontuais e não há interação entre eles;
  - b) a carga é uniformemente distribuída na superfície da partícula;
  - c) as dimensões das partículas são grandes em relação à espessura da DCD (condição unidimensional);
  - d) a permissividade,  $\epsilon$ , do meio independe da posição.

A permissividade é a medida da facilidade com que moléculas podem ser polarizadas e orientadas em um campo elétrico. Quantitativamente é definida pela Equação de Coulomb, onde a força de atração entre duas cargas é diretamente proporcional às cargas e inversamente à permissividade e ao quadrado da distância entre as forças (Mitchell, 1993). Esse parâmetro é utilizado atualmente no lugar da constante dielétrica D. Para simplificação das equações, sendo  $\epsilon = D/4\pi$ .

A distribuição dos íons na dupla camada é descrita pela Equação de Boltzman para íons em um campo elétrico em equilíbrio (Equação 2.1).

$$c_i = c_{i0} \exp\left[\frac{-Z_i \cdot e \cdot \Psi}{K \cdot T}\right] \quad \text{Equação (2.1)}$$

onde:

$c_i$  (íons/m<sup>3</sup>) é a concentração de íons do tipo i em um campo elétrico em equilíbrio, ou seja, na dupla camada difusa;

$c_{i0}$  é a concentração de íons i no estado de referência, que significa localizado em um ponto muito distante da superfície da partícula, fora do campo elétrico no caso dos solos é a concentração iônica na solução livre (íons/m<sup>3</sup>);

$z_i$  é a valência do íon i;

$e$  é a carga elétrica unitária,  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C (coulombs)

$\Psi$  é o potencial elétrico no ponto considerado (volts)

$k$  é a constante de Boltzman,  $k = 1,38 \times 10^{-23}$  J/ K

$T$  é a temperatura absoluta ( K)

Pela definição clássica, o potencial elétrico,  $\psi$ , para um ponto qualquer do campo elétrico (DCD) é o trabalho necessário para trazer uma carga positiva de seu estado de referência (no fluido, externo à DCD) para o ponto em questão. O potencial elétrico de um ponto da DCD é igual à diferença de potencial desse ponto em relação a um ponto da água livre, e diminui com a distância do ponto considerado à superfície da partícula.

A Equação de Poisson relaciona potencial elétrico, carga e distância (Equação 2.2), parâmetros que definem completamente a dupla camada difusa.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad \text{Equação (2.2)}$$

onde:

$x$  é a distância do ponto considerado à superfície da partícula

$\epsilon$  é a permissividade estática

$\rho$  é a densidade de carga, dada por

$$\rho = \epsilon \sum z_i c_i \quad \text{Equação (2.3)}$$

Substituindo-se o valor de  $\rho$  dado pela Equação 2.3 na Equação 2.2, obtém-se a equação diferencial geral para a dupla camada elétrica adjacente a uma superfície planar. Essa equação, simplificada para o caso de duas espécies iônicas de valências opostas e iguais a  $z=+2$  (cátion) e  $z=-2$  (ânion), leva à equação de Poisson-Boltzmann (Equação 2.4), para a qual há soluções disponíveis (Michell,1993).

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{2c_0 \cdot z \cdot e}{\epsilon} \text{sen} \frac{z \cdot e \cdot \psi}{K \cdot T} \quad \text{Equação (2.4)}$$

Para o modelo de Gouy-Chapman, considerando a condição de dupla camada difusa simples (que não interage com uma DCD adjacente), uma expressão simplificada é apresentada na Equação 2.5.

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = K^2 \psi \quad \text{Equação (2.5)}$$

Para cuja solução, dada pela Equação 2.6, o potencial elétrico na DCD decresce exponencialmente com a distância em relação à superfície da partícula.

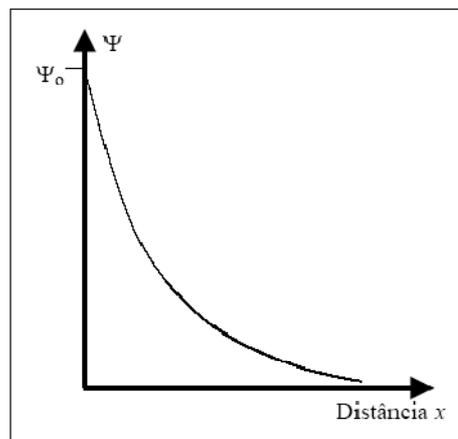
$$\psi = \psi_0 \exp(-K \cdot x) \quad \text{Equação (2.6)}$$

Onde  $\psi_0$  é o potencial elétrico superficial, ou seja, o potencial elétrico dos pontos situados na superfície da partícula.

Para esse modelo o centro de gravidade da DCD está localizado a uma distância  $1/K$  da superfície da partícula, sendo essa distância considerada como a espessura da DCD, dada pela Equação 2.7.

$$\frac{1}{K} = \left[ \frac{\epsilon.K.T}{2.c_0.e^2.z^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equação (2.7)}$$

A Figura 2.11 mostra a distribuição de  $\psi$  ao longo da distância,  $x$ , em relação à superfície da partícula. Observando-se que o valor máximo é igual a  $\psi_0$ , tendendo a zero para grandes distâncias.



**Figura 2.11** - Distribuição do potencial  $\Psi$  ao longo da distância  $x$  em relação à superfície da partícula. (Mitchell, 1993)

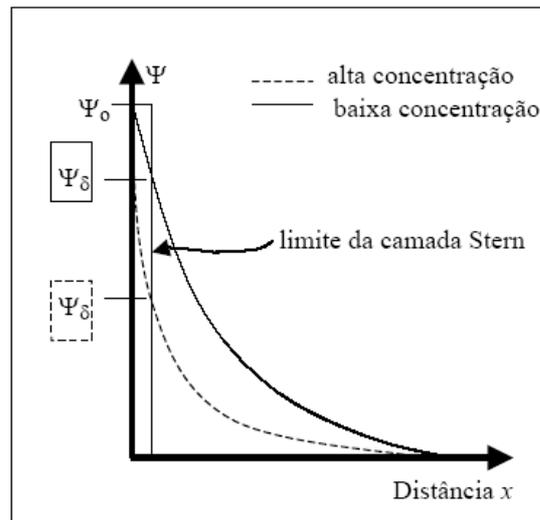
A expressão geral da carga da DCD,  $\sigma$ , é dada pela Equação 2.8.

$$\sigma = (8.c_0.\epsilon.K.T)^{0,5} \operatorname{sen} \left[ \frac{z.e.\Psi_0}{K.T} \right] \quad \text{Equação (2.8)}$$

Como a Teoria de Gouy-Chapman considera que as cargas são pontuais, mas na realidade os íons possuem dimensões, a concentração de íons adjacentes à superfície prevista é maior que a concentração real. Uma correção foi feita por Stern (1924) e Van Olphen (1963), citados por Mitchell (1993). Stern (1924) modificou a Teoria de Gouy-Chapman, levando em consideração o tamanho dos íons, criando a Teoria de Stern cujas soluções foram dadas por Van Olphen.

Estabeleceu-se a existência de uma camada de Stern, formada de cátions fortemente aderidos à superfície da partícula, considerados imóveis. A camada Stern se seguiria a DCD estendendo-se até a solução intersticial. Quanto maior o tamanho dos íons, maior a espessura

da camada Stern. O limite entre a camada de Stern e a DCD, ou *slip plane*, situa-se a uma distância  $\delta$ , da superfície da partícula, de valor pequeno e desconhecido. O potencial elétrico no *slip plane*,  $\psi_\delta$ , é o chamado Potencial Zeta, indicado na Figura 2.12. O potencial zeta é menor que  $\psi_0$ , situando-se tipicamente entre 0 e  $-50$  mV para argilas (Mitchell, 1993). O potencial zeta diminui com o aumento da concentração eletrolítica, como mostra a Figura 2.12.



**Figura 2.12** - Potencial zeta para altas e baixas concentrações eletrolíticas. (Schmidt, 2004)

Na dupla camada difusa, os cátions adsorvidos estão ligados fragilmente às partículas de solo, por ligações iônicas e podem ser substituídos ou “trocados” por outros dissolvidos na água, sendo chamados cátions trocáveis. O fenômeno de reposição de cátions adsorvidos por um número equivalente de cátions dissolvidos ocorre espontaneamente e é denominado troca catiônica. A reação é reversível, dependendo da relação entre cátions dissolvidos e cátions adsorvidos. A quantidade de cátions trocáveis é tanto maior quanto menor o tamanho das partículas.

Os solos têm uma capacidade limitada de adsorver cátions. A capacidade de troca catiônica (CTC) pode ser o resultado do desequilíbrio de cargas resultante da substituição isomórfica no próprio reticulado cristalino, das ligações químicas quebradas nas arestas das partículas e da substituição de hidrogênio por hidroxilas (Santos, 1975), ou seja, pode ser definida como a quantidade total de cátions trocáveis que um solo pode adsorver. A CTC é dada pela soma das cargas positivas dos cátions adsorvidos a qual é igual à soma das cargas negativas superficiais.

Vieira (1988) identificou apenas duas fontes principais de geração de cargas negativas dentro da estrutura cristalográfica das argilas. Uma fonte é originada pela dissociação iônica dos grupos OH<sup>-</sup> e O<sup>-</sup> dos extremos e da superfície externa dos cristais (dependente do pH). A outra fonte é originada pelas substituições isomórficas, sendo estas consideradas permanentes (independente do pH).

A CTC é atualmente expressa em centimol de carga positiva por quilo de solo (cmol<sub>c</sub>/kg) que é numericamente igual à unidade anteriormente utilizada, miliequivalentes de carga positiva por 100 g de solo (meq/100 g). As substituições isomórficas, a quebra de ligações nos bordos das partículas e reposição de hidrogênio de hidroxilas expostas são as fontes de capacidade de troca das argilas (Mitchell, 1976).

Portanto, os solos tropicais possuem uma mineralogia diferente dos solos considerados não tropicais, o que influencia diretamente no tipo de carga superficial das partículas. Segundo Castro (1989), esses dois tipos de solos possuem comportamentos eletroquímicos diferentes, sendo os solos tropicais formados, em sua maioria, por minerais de carga superficial variável, pois variam bastante com o pH do meio e, os não tropicais por minerais de carga superficial constante.

A CTC depende diretamente do tipo e quantidade de argila presente no solo e da presença de matéria orgânica. A matéria orgânica aumenta a capacidade de adsorção de cátions pelo solo e é, portanto, uma importante fonte de CTC. Assim, quanto maiores os teores de matéria orgânica e de argila no solo, mais elevados são os valores de capacidade de troca de cátions, e nessas condições os cátions são adsorvidos em grande quantidade (Figura 2.13).

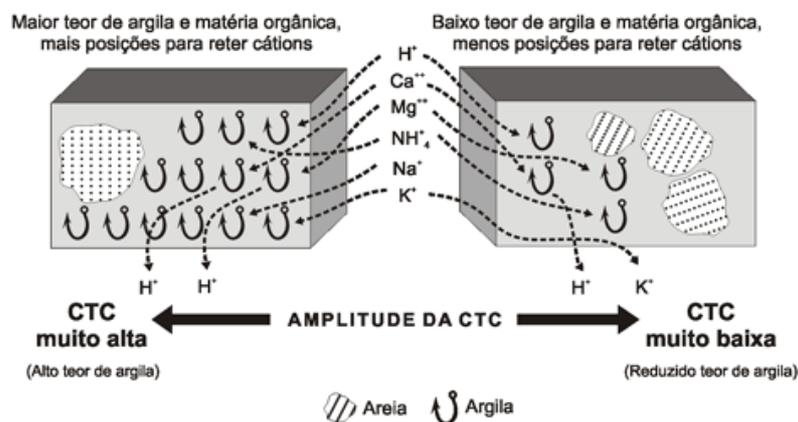


Figura 2.13 - Diferenças de capacidade de troca de cátions em dois tipos de solos.

---

Com relação ao comportamento dos solos em meios ácidos e básicos, pode-se observar que:

- Quanto mais ácido o meio, maior a adsorção de hidrogênio na superfície do colóide, e nessas condições os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio apresentam cargas positivas promovendo a capacidade de troca de ânions (CTA). Isso significa maior retenção de ânions como sulfato, nitrato e cloreto.

- Por outro lado, quanto mais alcalino o meio, há geração das cargas negativas promovendo a capacidade de troca de cátions (CTC). Conseqüentemente há maior retenção de cátions tais como cálcio, magnésio, potássio e sódio.

## **2.9. PONTO DE CARGA ZERO (PCZ)**

O ponto de carga zero (PCZ) é uma das propriedades do solo mais importantes para a descrição dos fenômenos decorrentes da dupla camada elétrica de interfaces reversíveis (Raij, 1973; Sakurai *et al.*, 1989), além disso, é usado para a determinação de vários atributos pedológicos, tais como o desenvolvimento pedogenético (Hendershot e Lavkulich, 1978).

Gangaiya e Morrison (1987) definiram os principais conceitos utilizados no estudo das propriedades decorrentes das cargas elétricas superficiais. A superfície pode ser definida simplesmente como o lado externo de uma partícula, a carga superficial é a carga líquida (positiva ou negativa) presente na superfície dessa partícula.

Se a quantidade de cargas elétricas negativas é igual às positivas, atinge-se o ponto de equilíbrio chamado de ponto carga zero (PCZ). Quando o pH da solução supera o PCZ, predominam cargas negativas ( $\text{pH} > \text{PCZ}$ ) e, quando inferior ao PCZ ( $\text{pH} < \text{PCZ}$ ), as cargas positivas são as predominantes.

É importante a determinação do PCZ em trabalhos relacionados ao fenômeno eletrocinético dos solos tropicais, uma vez que a capacidade de troca catiônica varia de acordo com o pH e influencia diretamente na capacidade de adsorção, podendo até mesmo influenciar fisicamente (surgimento de trincas, expansão, etc) no solo.

Vários autores, dentre eles Iniguez e Val (1982), Pardo e Guadalix (1988), mencionaram em seus trabalhos que a composição mineralógica, o grau de alteração química, o teor de matéria orgânica e a porcentagem de óxidos amorfos dos solos refletem diretamente no PCZ.

A Tabela 2.3 mostra os valores do PCZ em alguns estudos realizados em solos tropicais, em que os autores atribuíram a diferença do valor na camada subsuperficial com a superficial ao maior teor da matéria orgânica na camada superior, uma vez que algumas propriedades como composição mineralógica das duas camadas eram bastante similares.

**Tabela 2.3** - Valores de PCZ em diferentes solos brasileiros.

SOLO	PCZ		Referência
	Superficial	Subsuperficial	
Estado de São Paulo	1,9 a 3,5	2,7 a 6,0	Raij (1971)
Região amazônica	1,2 a 3,4	4,0 a 6,1	Morais <i>et al</i> (1976)
Região do Sul da Bahia	1,1 a 3,3	4,1 a 6,2	Morais <i>et al</i> (1976)
Zona da Mata de Pernambuco	3,3 a 4,6		Magalhães e Page (1984)
Latossolo Vermelho - Escuro (DF)	4,04	4,55	Zorzo (1993)
Latossolo Vermelho – Amarelo (DF)	4,18	5,07	Zorzo (1993)

No entanto, existem alguns métodos para a determinação do PCZ no solo, destacando-se a titulação potenciométrica, a retenção iônica, as técnicas electrocinéticas, a titulação salina e a técnica de adição mineral. Porém, são metodologias que contém um certo grau de dificuldade, os quais requerem grande domínio técnico da área de química. Assim, para resolver esse problema operacional, calculou-se o PCZ do solo pela equação proposta (Equação 2.9) por Keng e Uehara (1974).

$$PCZ = (pH_{KCl} \times 2) - pH_{H_2O} \quad \text{Equação (2.9)}$$

O valor do potencial elétrico de superfície ( $\psi_0$ ) expresso em mV, também poderá ser calculado utilizando-se a equação de Nernst simplificada por Raij e Peech (1972):

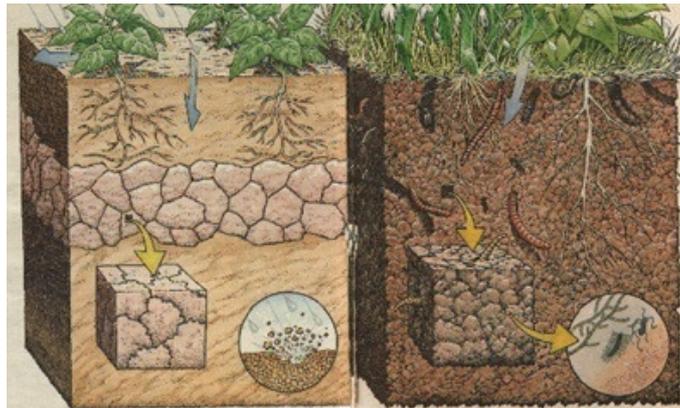
$$\psi_0 = 59,1(PESN - pH) \quad \text{Equação (2.10)}$$

PESN é o ponto de efeito salino nulo.

---

## 2.10. INFLUÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA NO SOLO

A matéria orgânica (MO) é proveniente de plantas, animais e microorganismos e por este motivo tem maior teor na camada superficial do solo (Figura 2.14). Essa desempenha um importante papel nas características químicas, físicas e microbiológicas do solo, sendo inclusive, responsável por mais de 70% da capacidade de troca catiônica (CTC) dos solos tropicais.



**Figura 2.14** - Formação da matéria orgânica no solo. (Sítio Duas Cachoeiras, 2009)

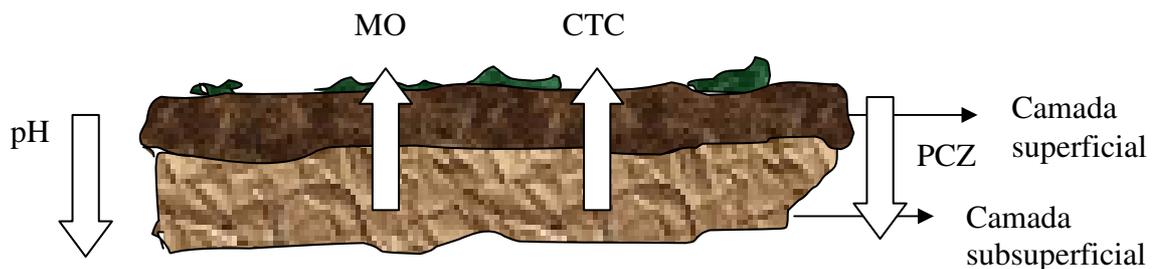
Portanto, a MO sendo portadora, predominantemente, de radicais  $\text{OH}^-$  e  $\text{NH}_2^-$ , os quais se comportam como base de Lewis, reagem com  $\text{H}^+$  abaixando o pH. Assim, Os valores de pH são maiores nas camadas subsuperficiais devido ao fato de nesta linha o teor de matéria orgânica ser menor e, conseqüentemente, apresentar um menor poder tampão hidrogeniônico. Isso foi devidamente comprovado por Guilherme *et al.* (1989), os quais encontraram uma estreita “relação inversa” entre o aumento do pH e o teor de matéria orgânica do solo, mostrando com isso o efeito totalmente tamponante dessa matéria em relação à elevação do pH.

Raij (1971) estudou as propriedades eletroquímicas de alguns solos do Estado de São Paulo e identificou que o maior teor de matéria orgânica presente na camada superficial teria ocasionado maiores valores do PCZ na camada subsuperficial em relação à camada superficial.

Contudo, os principais grupos funcionais da matéria orgânica, tais como, amino e carboxil, de uma maneira similar às superfícies hidroxiladas dos óxidos minerais de argila, podem adsorver ou desorver  $\text{H}^+$  ou  $\text{OH}^-$ , formando isso um sistema de cargas variáveis (Sposito, 1981).

Siqueira *et al* (1990b) mencionaram a importância da matéria orgânica nas propriedades eletroquímicas. Segundo esses autores, a contribuição da matéria orgânica na variação das propriedades eletroquímicas dependeu do grau de intemperismo desse solo e da natureza dos colóides presentes na fração argila. Em solos mais intemperizados verificou-se um maior efeito da matéria orgânica.

A Figura 2.15 mostra a influência que a matéria orgânica presente nos solos tropicais tem sobre as propriedades químicas de pH, PCZ e CTC.



**Figura 2.15** - Relação de pH, PCZ e CTC com a matéria orgânica.

## 2.11. INFLUÊNCIA DOS CÁTIONS E ÂNIONS NO SISTEMA ARGILA + ÁGUA

A presença de íons, dissolvidos no líquido em que a argila está dispersa, afeta as partículas de argilominerais de três maneiras diferentes, que podem ocorrer simultaneamente (Santos, 1975):

- influencia a estrutura da camada de água adsorvida (na espessura e na orientação);
- confere carga negativa à partícula;
- provoca a clivagem ou separação das partículas em partículas menores.

Para uma compreensão satisfatória desse item, define-se “água rígida” como a água que tem moléculas organizadas ou orientadas como uma espécie de estrutura rígida nas superfícies dos argilominerais.

Argilas, tendo sódio como cátion trocável (argilas sódicas), têm, na superfície do argilomineral, a água “rígida ou orientada” formando uma partícula bastante espessa, mas o “grau de cristalinidade” da água é pequeno, isto é, é uma “água frouxa”, de modo que essa água exerce pouca força de ligação entre as partículas dos argilominerais. Praticamente, isto significa que uma caulinita ou illita, se colocada na forma sódica, necessita de um menor teor de água para obter a plasticidade em comparação com a forma cálcica. Isto porque o sódio

---

reduz a rigidez da água adsorvida e, portanto, a força de ligação causada pela água rígida entre as partículas. Diminuindo a força de ligação, diminui a força de cisalhamento necessária para o deslizamento das partículas. Portanto, o sódio como cátion trocável diminui o limite de plasticidade e, por isso, diminui a plasticidade das argilas caulínicas e ilíticas. Isso foi identificado por Nascimento e Murrieta (2005).

O efeito na plasticidade do sistema argila + água pela adição de defloculante, na forma sódica, a uma montmorilonita é oposto ao observado em uma caulinita e illita. Na montmorilonita, o limite de plasticidade e a viscosidade aumentam, na caulinita e na illita, todos diminuem.

Por outro lado, se cálcio (ou magnésio) for o cátion trocável (argilas cálcicas ou magnesianas), a película adsorvida na superfície dos argilominerais é de água “muito rígida”, isto é, com elevado grau de orientação ou cristalinidade. Portanto, a água já pode exercer uma força de ligação apreciável em teores de água pequenos e médios. Cálcio e magnésio trocáveis tendem a manter as várias camadas cristalinas unidas pela maior carga em relação ao sódio. (Santos, 1975).

Assim, o efeito do cátion cálcio (ou magnésio), quando adicionado as argilas como hidróxido ou carbonato, é oposto ao do sódio. Em argilas caulínica ou ilítica, formando a película de água rígida, aumenta o teor de água total necessário para se ter água quase como lubrificante, aumentando, pois, o limite de líquidez e a plasticidade da argila. Praticamente, isso significa que uma argila caulínica ou ilítica, na forma cálcica ou magnesiana é superior ao da forma sódica.

## **2.12. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SOLOS LATERÍTICOS**

Na decomposição sob condições tropicais de altas temperaturas e precipitação de chuvas, os minerais de argila tendem a decompor-se em várias formas de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio de acordo com a natureza das condições de intemperismo. O teor de óxido de ferro livre e o estado dos complexos alumino-ferruginosos (grau de desidratação e/ou endurecimento), bem como a estrutura granular típica de alguns solos lateríticos, são responsáveis pelas diferenças no comportamento de engenharia destes em relação às expectativas da mecânica dos solos convencional para solos de zona temperada (Gidigas, 1976).

---

### 2.12.1. ESTRUTURAS E CARACTERÍSTICAS SECUNDÁRIAS

A estrutura e ligação inter-partículas são geralmente aceitas como os mais importantes parâmetros dos solos lateríticos (De Brito Galvão, 1993). Esta estrutura é resultante dos processos químicos sofridos durante o intemperismo, que normalmente mostram uma estrutura granular, onde as partículas de solo, principalmente a argila, formam agregados de vários tamanhos, envolvendo uma grande variação de tamanhos de poros.

Para a maioria dos estudiosos da área de geotecnia, a formação desta estrutura agregada e porosa deve-se à forte presença dos oxi-hidróxidos de ferro, que quimicamente são responsáveis pela floculação das partículas e suas ligações inter-partículas na forma de cimentantes, como pode ser observado nos trabalhos de Newill (1961) e Wallace (1973). Esses trabalhos definiram que o solo laterítico possui uma estrutura granular devido à presença de oxi-hidróxidos de Fe que cobrem a parede dos poros, preenche os vazios e agrega as menores partículas de argila em agregados de vários tamanhos. Botelho da Costa (1973) descreve que a agregação em solos lateríticos decorre também devido à ação floculante (irreversível ou não) dos hidróxidos de ferro ou alumínio.

Esse fenômeno ocorre, segundo ele, porque os hidróxidos de alumínio e os hidróxidos de ferro são anfóteros; têm ponto isoelétrico, sendo eletropositivos para pH inferior e eletronegativos para pH superior àquele ponto. A Tabela 2.4 apresenta os pontos isoelétricos dos hidróxidos.

**Tabela 2.4** - Pontos isoelétricos de alguns hidróxidos e amorfos (Van Schuylenborgh e Sanger, 1949).

<b>Mineral</b>	<b>Ponto Isoelétrico pH</b>
Gibbsita	4,8
Geles amorfos de Al e Si	8,3
Goethita	3,2
Geles amorfos de Fe	8,5

A magnitude do seu potencial elétrico e a facilidade de floculação do solo serão tanto maiores quanto menos afastado estiver o pH do ponto isoelétrico. Deste modo, floculam para pH suficientemente próximo do ponto isoelétrico, porque, um pouco abaixo deste, têm superfície com carga positiva e, acima dele, têm carga negativa.

---

Outras áreas das ciências do solo, além de estabelecer a importância aos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio na estrutura dos solos tropicais, apresentam como outro fator preponderante a fraca resistência à floculação dos sistemas dominados por íons de  $Al^{3+}$  e  $H^+$  em comparação com os solos saturados por elementos alcalinos e principalmente alcalinos-terrosos, típicos de regiões temperadas (Russell, 1961).

Em solos lateríticos, a lixiviação geralmente provoca a libertação de  $Al^{3+}$  da malha cristalina que passa a ocupar posições de troca. A forte retenção do íon trivalente corresponde fraca espessura da camada dupla e forte neutralização das cargas negativas das partículas coloidais, o que principalmente deve explicar o domínio do processo de floculação em sistemas controlados por íons de  $Al^{3+}$  e  $H^+$  em comparação com solos saturados por  $Mg^{2+}$  e, sobretudo, com os saturados com  $K^+$  e mais ainda  $Na^+$  (Botelho da Costa, 1973).

Os solos ácidos de minerais de argila (típicos de regiões tropicais), com alto teor de íons de  $Al^{3+}$  e  $H^+$ , são no geral mais facilmente floculáveis do que solos com elevado grau de saturação devido à abundância de alcalinos e/ou alcalinos-terrosos de troca (típicos de regiões temperadas).

Após a discussão neste item, pode-se estabelecer algumas características físicas dos solos tropicais de grande importância para a área geotécnica e oriundas diretamente da estrutura dos solos lateríticos:

- Índices de vazios de solos lateríticos normalmente maiores do que seria ao associado com a distribuição granulométrica, sendo uma função do processo de intemperismo e não está relacionada à história de tensões;
- O índice de vazios de solos lateríticos pode variar bastante, independente da rocha-mãe. Na Tabela 2.5 são dados índices de vazios típicos para solos residuais do Brasil;

**Tabela 2.5** - Índice de vazios em solos lateríticos.

<b>Índice de Vazios</b>	<b>Referência</b>
0,25 - 1,50	Vargas (1953)
0,30 - 2,15	Sandroni (1985)
0,95 - 2,21	Guori (1986)
0,48 - 2,10	Zongyuan (1986)
0,82 - 2,21	Dias e Gehling (1986)

- 
- ✓ Resistências mais baixas e compressibilidades mais altas como consequência da estrutura dos solos e a sua pedogênese. Estas características são claramente observadas em Dias (1994);
  - ✓ Permeabilidades normalmente mais altas do que seria associada à distribuição granulométrica, como resultado dos elevados índices de vazios.

### **2.12.2. PLASTICIDADE**

Uma das mais importantes propriedades dos solos lateríticos é a plasticidade. Vários são os fatores que podem influenciar nos valores finais do limite de liquidez e do limite de plasticidade. Normalmente a natureza mineralógica e o teor da fração fina, são os principais fatores citados como aqueles que definem praticamente a plasticidade de um solo (Queiroz de Carvalho, 1986). Independente da origem do solo (de região tropical ou temperada), os limites de plasticidade e liquidez aumentam à medida que aumentam os teores de argila no solo.

Em solos formados em regiões tropicais, os principais constituintes argilominerais são os dos grupos da caulinita, illita e montmorilonita. Um fator também muito importante na plasticidade dos solos, lateríticos ou não, é o seu teor em oxi-hidróxidos de ferro. Queiroz de Carvalho (1986) formula duas hipóteses para explicar a influência dos oxi-hidróxidos na plasticidade:

- ✓ Se o ferro presente no solo ocorre associado às partículas finas, recobrando-as ou mesmo cimentando-as, é de se esperar que a plasticidade seja afetada por uma redução nos valores dos limites de liquidez e de plasticidade (Gidigas, 1976). Assim, a extração deste ferro deve aumentar a plasticidade.
- ✓ Se por outro lado, o ferro ocorre no solo como partículas discretas ou parcialmente discretas, é de se esperar que o mesmo não tenha efeito (ou se o tiver será em escala reduzida), sobre os valores dos limites de plasticidade e liquidez.

Yong *et al.* (1980) mostram uma correlação direta da superfície específica com a plasticidade. De acordo com este trabalho, ao se inserir elementos amorfos de sílica e ferro em solos naturais em diferentes proporções, ocorre um acréscimo dos limites de Atterberg em função do aumento da superfície específica no solo tratado. Yong *et al.* (1992) complementam esta análise, associando o aumento da plasticidade não somente ao aumento da superfície específica, mas também ao da capacidade de troca catiônica (CTC) e ao decréscimo do pH no

---

ambiente a partir da inserção de amorfos de sílica e ferro no sistema estudado (solos ricos em ílita). Este trabalho também descreve que os amorfos de sílica possuem maior superfície específica e capacidade de troca catiônica (CTC) e, por isso, dão maior incremento aos limites de Atterberg, quando comparados aos amorfos de ferro.

Paul e Barras (1999) mostram que a extração da matéria orgânica de solos pobres neste componente, reduz o limite de liquidez e o índice de plasticidade a valores mais comensuráveis à mineralogia dos solos, enquanto que no limite de plasticidade a redução é menor. Isto demonstra que a plasticidade aumenta de acordo com o crescimento do teor de matéria orgânica em um solo.

Outra característica fundamental da plasticidade em solos lateríticos é a mudança irreversível na desidratação. Solos que contêm hidróxidos de ferro e alumínio podem se tornar menos plásticos, i.e., exibir valores dos limites de Atterberg mais baixos sob secagem. Isto é em parte devido à desidratação dos hidróxidos que cria uma ligação mais forte entre as partículas e resiste à penetração pela água. O processo não pode ser revertido pela re-umidificação. O efeito é observado durante a secagem ao ar, mas é mais evidente na secagem em estufa à alta temperatura (Vargas, 1982; Camapum de Carvalho *et al.*, 1985; Queiroz de Carvalho, 1985).

## **2.13. SOLOS DA REGIÃO DO DISTRITO FEDERAL**

No Distrito Federal, o solo apresenta propriedades, estruturas e comportamento hidráulicos e mecânicos peculiares. Alguns trabalhos comprovam essas características, mas de forma pontual e fragmentada.

### **2.13.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICO-MINERALÓGICAS**

Os solos do Distrito Federal representam bem os solos da região do Cerrado. Melfi e Pedro (1977) afirmam que os solos de Brasília são abundantes em gibbsita. Tal fenômeno é também constatado por Martins (2000), que caracteriza as camadas mais superficiais da região por sofrerem essencialmente o processo de alitização em áreas com solos bem drenados, em porções de vertentes média a alta. Este mesmo autor mostra que nas porções mais baixas das vertentes, os solos são mal drenados, possibilitando a ressilicatização da gibbsita para caulinita.

---

Cardoso (1995), Cardoso *et al.* (1995, 1998a, b), Farias *et al.* (1999) e Martins (2000) descrevem que os solos do DF são formados basicamente pelos minerais secundários caulinita, illita, goethita, hematita, gibbsita, anatásio/rutilo e o quartzo primário. Existe também uma quantidade importante de amorfos de Fe, Al e Si, que varia nos horizontes mais superficiais de 0,2 a 0,4 % do total.

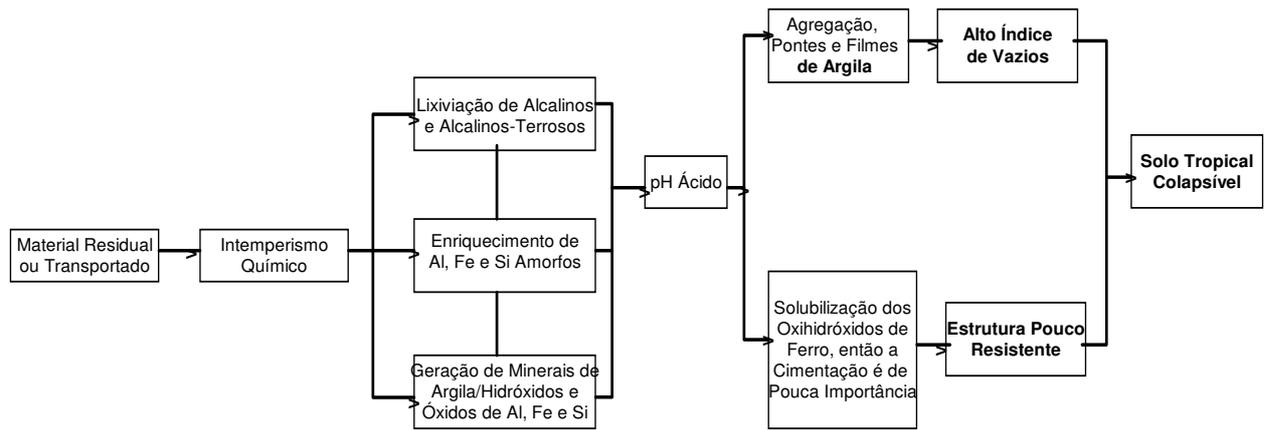
A lateritização é o processo pedogenético que controla basicamente toda a formação de solos da região, e conseqüentemente é responsável pela gênese dos Latossolos e Cambissolos, que ocupam cerca de 86% da área do Distrito Federal (EMBRAPA, 1978).

Melfi e Pedro (1977 e 1978), estudando os solos lateríticos brasileiros, definem que estes são formados basicamente pelas reações de hidrólise total e parcial, e que a queluviação parcial é responsável pela formação destes solos em pequena áreas de nosso país, incluindo o DF. Martins (2000) considera que tanto as reações de hidrólise, como a queluviação parcial agem conjuntamente na formação dos solos da região do DF.

Segundo EMBRAPA (1978) e Eiten (1994), Latossolos e Cambissolos encontrados no DF, possuem pH ácido, normalmente com valores entre 4,0 e 5,5, que os tornam, mesmo quando extremamente argilosos, em solos bem drenados, devido à forte agregação de seus materiais sólidos constituintes.

Cardoso (1995) e Camapum de Carvalho *et al.* (1996) descrevem que a agregação das partículas de solo e a conseqüente geração de grandes vazios, associados aos contatos estruturais realizados através de pontes de argila, bem como a inexpressiva ação de cimentação, devido ao pH ácido e conseqüente dissolução e precipitação dos oxí-hidróxidos de ferro, mostram-se como os principais fatores para que os solos do DF apresentem elevados potenciais de colapso.

Cardoso (1995) demonstra que os solos lateríticos do DF possuem uma evolução químico-mineralógica decorrente do intemperismo e propõe o modelo de evolução químico-mineralógica dos solos tropicais colapsíveis (Figura 2.13), que de certa forma, é um modelo de formação de solos profundamente intemperizados da região do Cerrado.



**Figura 2.16** - Modelo de evolução químico-mineralógica dos solos tropicais colapsíveis (Cardoso, 1995).

3 - FENÔMENOS ELETROKINÉTICOS

A eletrocinese é definida como o transporte físico-químico de cargas, ação das partículas carregadas e efeito da aplicação de um potencial elétrico na formação e transporte de fluido em meio poroso (Alshawabkeh e Bricka, 2000). Esse método é normalmente utilizado em solos de granulometria fina, em processos de remediação e consolidação, onde outras técnicas se mostram pouco eficientes.

Em solos finos, a presença da dupla camada difusa promove o surgimento de diversos fenômenos eletrocinéticos com a aplicação do campo elétrico. Uma combinação entre fluxos e gradientes elétricos e hidráulicos pode ser o responsável pelos fenômenos eletrocinéticos nesse tipo de material, onde há partículas carregadas balanceadas por cargas móveis.

Mitchell (1993) dividiu os fenômenos eletrocinéticos relacionados ao solo em quatro fases: eletro-osmose, eletroforese, potencial de corrente ou escoamento e migração ou potencial de sedimentação. A Figura 3.1 mostra uma representação esquemática dessas fases: (a) Eletro-osmose, (b) Eletroforese, (c) Potencial de Corrente e (d) Potencial de Sedimentação.

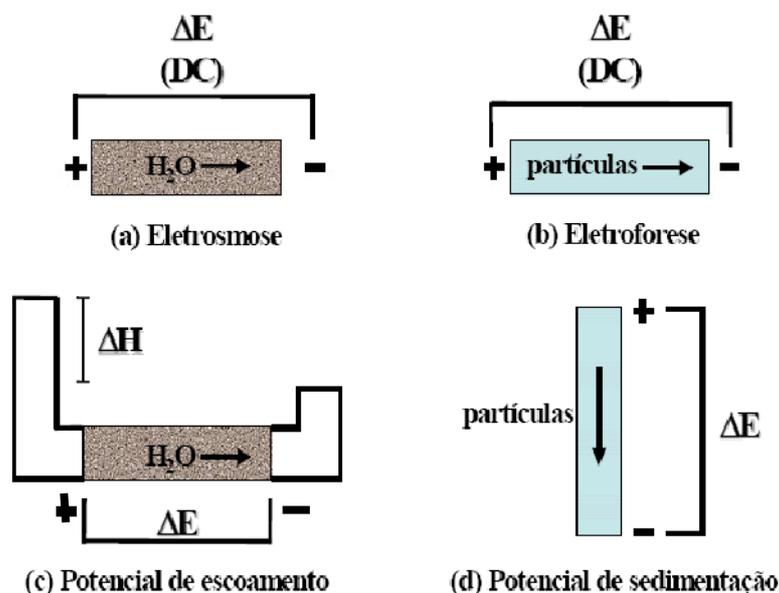


Figura 3.1 - Representação Esquemática de Fenômenos Eletrocinéticos.

(Mitchell, 1993)

---

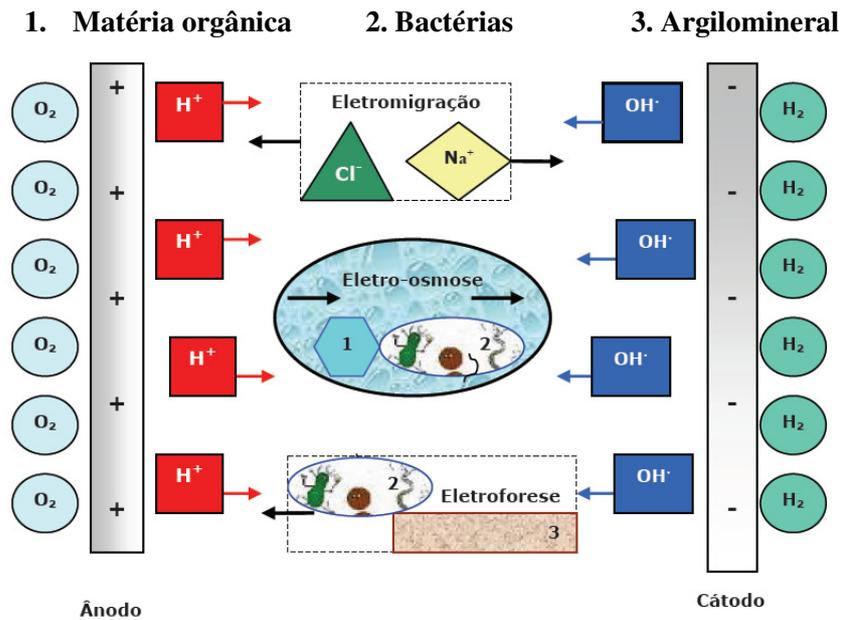
**Eletro-osmose:** quando um potencial elétrico é aplicado através da massa de solo saturada, cátions são atraídos para o cátodo e ânions para o ânodo. Como há migração de íons, eles carregam sua água de hidratação, exercendo um arraste viscoso na água que está em sua volta. Desde que haja mais cátions do que ânions num solo contendo partículas de argila carregadas negativamente, existe uma rede de fluxo de água em direção ao cátodo (Figura 3.1a). Esse fluxo é chamado eletro-osmótico e sua magnitude depende do coeficiente de condutividade eletro-osmótica ( $K_e$ ) e do gradiente de voltagem ( $i$ ).

**Eletroforese:** refere-se ao movimento da fase sólida (partículas em suspensão) ou líquida descontínua contida em uma fase líquida sob a ação de um campo elétrico externo. Quando um campo contínuo é aplicado ao sistema, as partículas carregadas são atraídas eletrostaticamente por um dos eletrodos e repelidas pelo outro. Se as espécies carregadas são íons, este fenômeno é denominado eletromigração ou migração iônica. Os cátions movem-se para o cátodo e ânions para o ânodo (Figura 3.1b). Basicamente, a eletroforese é o movimento de partículas sob um campo elétrico e a migração iônica ou eletromigração é o movimento dos cátions e dos ânions sob um campo elétrico.

**Potencial de Corrente ou Escoamento:** quando há fluxo de água através do solo devido a um gradiente hidráulico, as cargas da dupla camada são deslocadas na direção do fluxo. O resultado é uma diferença de potencial proporcional à razão de fluxo hidráulico entre as extremidades opostas da massa de solo, chamado potencial de corrente (Figura 3.1c).

**Migração ou Potencial de Sedimentação:** O movimento de um grande número de partículas carregadas em uma direção, por exemplo, durante a sedimentação de sólidos, produz uma corrente elétrica na direção do movimento das partículas. Isto é causado pelo efeito de arraste da fase líquida viscosa que retarda o movimento dos íons da camada difusa relativo aos íons das partículas. Esse fenômeno foi citado por Mitchell (1993) como um dos processos eletrocinéticos, mas há dificuldade em sua visualização (Figura 3.1d).

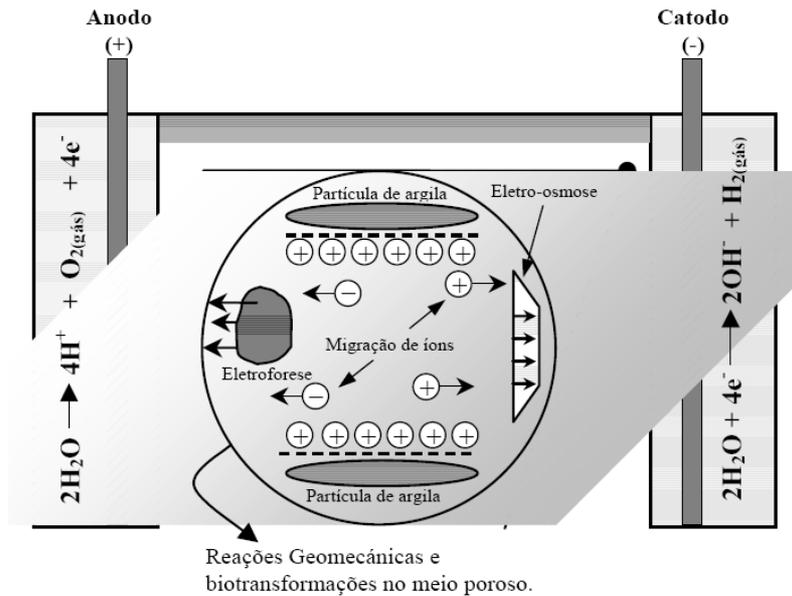
A Figura 3.2 mostra os fenômenos eletrocinéticos existentes em uma massa de solo totalmente saturada.



**Figura 3.2** - Fenômenos eletrocinéticos em uma massa de solo totalmente saturada  
(Harbottle, 2003)

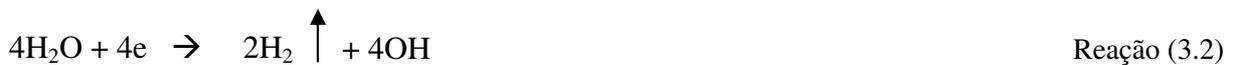
Com o tempo, os íons hidrogênio ( $H^+$ ) migram do ânodo para o cátodo como uma frente ácida, predominantemente por eletro-osmose e eletromigração. As hidroxilas ( $OH^-$ ) migram do cátodo para o ânodo como uma frente básica, por eletromigração e difusão. O avanço da frente básica é muito mais lento, pois se dá em sentido oposto ao do fluxo eletro-osmótico, além da mobilidade iônica do  $H^+$  ser igual a 1,76 vezes a mobilidade iônica da  $OH^-$ . Assim, a frente ácida domina a química através do solo exceto em seções próximas ao cátodo (Alshawabkeh e Bricka, 2000). Até que a capacidade tampão do solo consiga neutralizar o pH, o domínio da frente ácida se estabelece, influenciando nas reações geoquímicas do solo.

Esses são os fenômenos mais relevantes, no entanto, no processo de consolidação do solo, a eletro-osmose é a mais significativa, mas surgem reações que influenciam diretamente no processo. Dentre essas reações, se destaca a eletrólise, que surge com a aplicação de um potencial elétrico em uma massa de solo saturado, fazendo que a corrente contínua induza reações nos eletrodos. Nos eletrólitos posicionados no ânodo, ocorrem reações de oxidação, gerando a chamada frente ácida, enquanto nos eletrólitos localizados no cátodo há reações de redução produzindo uma frente básica, ambas sendo representadas esquematicamente na Figura 3.3, juntamente com os fenômenos eletrocinéticos.



**Figura 3.3** - Modelo esquemático mostrando os processos que ocorrem no solo durante a aplicação de um campo elétrico (Alshwabkeh (1998), apud Mergulhão, 2002).

Vários autores, incluindo Shapiro *et al.* (1989) e Acar *et al.* (1990), formalizaram o desenvolvimento das frentes ácido/base como,



Segundo Acar *et al.* (1990), devido a essas reações o pH no ânodo poderá diminuir a um valor abaixo de 2,0, sendo que no cátodo poderá aumentar acima de 12,0, dependendo da densidade da corrente aplicada. Acar (1993) sugeriu que a frente ácida irá avançar através da amostra em direção ao cátodo com o tempo devido à:

- advecção no fluido do poro por causa do fluxo eletro-osmótico;
- advecção carreando o fluido dos poros devido a alguma aplicação interna ou externa gerada por diferentes potenciais hidráulicos;
- difusão devido a gradientes de concentração;
- migração devido a gradientes elétricos.

O avanço da frente ácida e da atividade do íon  $\text{H}^+$  resultará na troca com outros cátions trocáveis na superfície dos argilominerais. Segundo Hamed *et al.* (1991), essa troca levará ao desprendimento de cátions adsorvidos no fluido dos poros. No entanto, a migração, a difusão e a advecção poderão resultar no movimento de íons trocáveis na superfície, bem como de cátions/ânions no fluido do poro, a depender de seus respectivos eletrodos no meio poroso.

### 3.1. TEORIAS DE FLUXO POR ELETRO-OSMOSE

Na prática, o método eletrocinético de melhoria de solo (eletro-osmose) consiste na aplicação “in situ” de uma corrente contínua ou uma diferença de potencial elétrico, por meio de eletrodos inseridos no solo de consistência mole. Quando uma corrente elétrica contínua é passada através de um solo saturado, a água tende a se mover em direção ao cátodo. Se a água não retorna ao ânodo e é removida no cátodo, o solo saturado decresce em volume (isto é, sofre adensamento) em quantidade igual ao volume de água removida. A resistência do solo é aumentada por este decréscimo de volume, chamando-se todo o processo de consolidação por eletro-osmose.

Algumas teorias foram desenvolvidas para descrever a evolução do fluxo de água por eletro-osmose, incluindo a teoria de Helmholtz-Smoluchowski, teoria de Schmid, modelo friccional de Spiegler e a teoria de hidratação do íon. As descrições dessas teorias foram apresentadas em Gray e Mitchell (1967) e Mitchell (1993) e suas principais diferenças são resumidamente apresentadas na Figura 3.4.

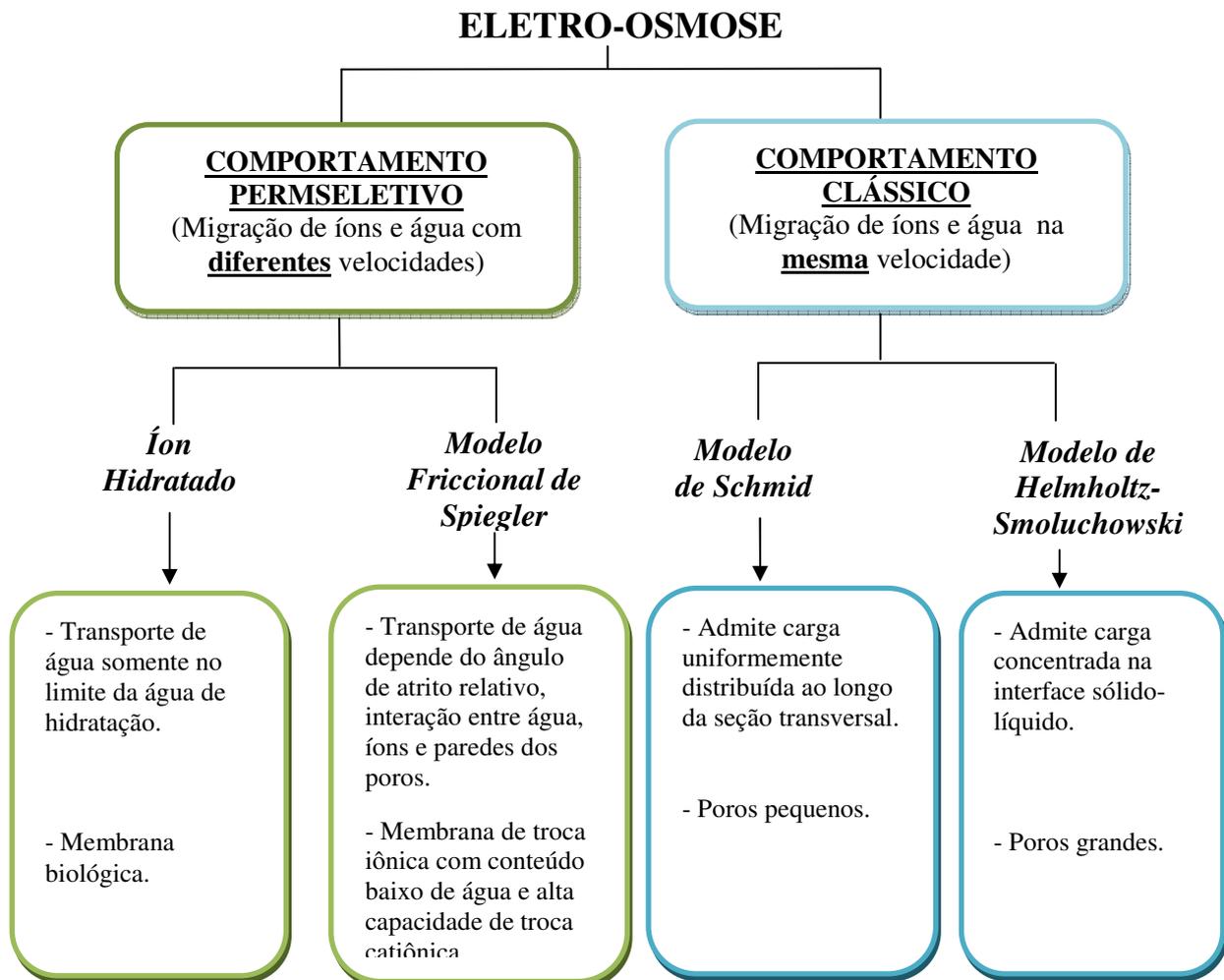
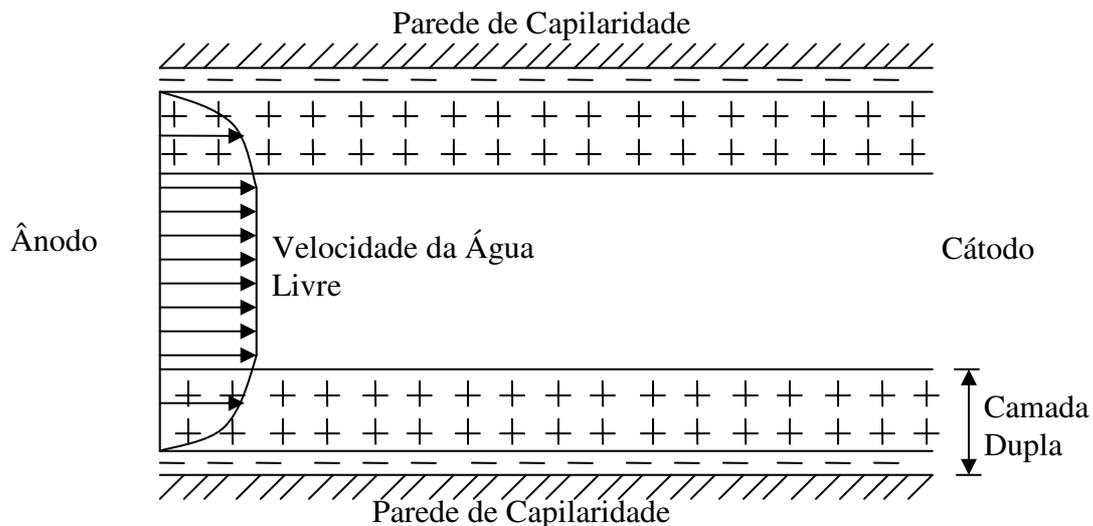


Figura 3.4 - Características e relações entre os vários modelos que descrevem eletro-osmose (Mitchell, 1993).

### 3.1.1. TEORIA DE HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI

Esta teoria considera o solo como tubos capilares cheios de água e assume que a velocidade do fluxo é controlada pelo balanço entre as forças elétricas que causam o movimento e a fricção entre o líquido e a parede do tubo, ou melhor, assume que o transporte do fluido no solo ocorre devido ao transporte de carga positiva em excesso na camada dupla difusa em direção ao cátodo (Mitchell, 1993).

Um modelo matemático para fluxo eletro-osmótico foi desenvolvido por Helmholtz, em 1879, e depois refinado por Smoluchowski, em 1914. Tubos capilares são tratados como condensadores elétricos, com cargas de um sinal na superfície das paredes, e cargas opostas concentradas no líquido. O modelo indica que existe uma camada dupla imediatamente adjacente à parede do tubo capilar, como mostrado na Figura 3.5 (Casagrande, 1952, *apud* Lo *et al.*, 1991).



**Figura 3.5** - Modelo de Helmholtz-Smoluchowski para o fenômeno de eletro-osmose.

(Casagrande, 1952, *apud* Lo *et al.* 1991).

Observa-se na figura que a camada delgada interior contém íons negativos (ânions) firmemente adsorvidos. A camada exterior contém íons positivos (cátions) móveis. Imediatamente adjacente à camada dupla existe água livre. Aplicando corrente elétrica, os íons positivos móveis serão atraídos em direção ao cátodo, levando com eles água livre por efeito de capilaridade, resultando em um movimento de água do ânodo para o cátodo. Portanto, ocorre um fluxo advectivo eletro-osmótico, que transporta as espécies iônicas e não iônicas presentes no fluido dos poros. Os ânions presentes na dupla camada difusa também

---

migram para o ânodo, porém, como há um excesso de cátions, o fluxo eletro-osmótico resultante ocorre em direção ao cátodo. Esse modelo ficou conhecido como Teoria de Helmholtz-Smoluchowski.

Por analogia com a lei de Darcy, o fluxo eletro-osmótico, produzido pela aplicação de campo elétrico é dado pela expressão:

$$Q_e = K_e \cdot i_e \cdot A \quad \text{Equação (3.1)}$$

Onde,  $Q_e$  é a vazão eletro-osmótica ( $L^3T^{-1}$ );

$K_e$  é o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico ( $L^2T^{-1}V^{-1(*)}$ );

$A$  é a área da seção transversal normal à direção do fluxo ( $L^2$ );

$i_e$  é o gradiente elétrico ( $V^{(*)}L^{-1}$ ).

A Equação (3.1) é análoga à lei de Darcy do fluxo de líquido. Entretanto, contrário ao caso da permeabilidade hidráulica,  $K_h$ , a permeabilidade eletro-osmótica,  $K_e$ , é independente do tamanho dos grãos.

Pode-se obter o gradiente elétrico por meio da diferença de voltagem entre os eletrodos dividido pela distância entre os mesmos. O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico é uma propriedade do solo que indica a velocidade do fluxo hidráulico sob um gradiente elétrico unitário e é então análogo à permeabilidade hidráulica, que é a velocidade do fluxo sob um gradiente hidráulico unitário.

A medida de  $K_e$  pode ser feita pela determinação da razão de fluxo de água através de uma amostra de comprimento e seção transversal conhecidos sob um gradiente elétrico também conhecido.

Por meio de experimentos, é sabido que  $K_e$  está geralmente no intervalo de  $1 \times 10^{-9}$  a  $1 \times 10^{-8}$   $m^2/s/V$  e que este é relativamente independente do tipo de solo, mas sensível à concentração eletrolítica da água (Mitchell, 1993). Bruel e Segall (1992) definiram o valor de  $K_e$  entre  $1 \times 10^{-10}$  a  $1 \times 10^{-9}$   $m^2/s/V$ .

---

(\*) A diferença de potencial elétrico é obtida pela divisão do trabalho da força elétrica em Joules por carga em Coulomb. A resultante das unidades padrões do sistema será:  $V = ML^2T^{-2}C^{-1}$ .

Segundo Hamed *et al.* (1991),  $K_e$  não é substancialmente afetado pela estrutura da massa do solo e seus valores variam dentro do intervalo  $1 \times 10^{-8}$  a  $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s/V}$  para todos os solos, o que difere um pouco dos resultados obtidos pelos autores citados anteriormente; os valores mais altos geralmente ocorrem em solos de grãos finos com baixa atividade, com maiores umidades e nas menores concentrações eletrolíticas.

Pela teoria de Helmholtz-Smoluchowski, a permeabilidade eletro-osmótica pode ser determinada em função da porosidade do solo, da viscosidade do fluido, da permissividade elétrica do meio e do potencial zeta da interface solo-fluido, conforme mostra a Equação 3.2. Note-se que, de acordo com a teoria, o tamanho dos poros não tem influência na permeabilidade eletro-osmótica.

$$K_e = \frac{n \cdot \epsilon \cdot \zeta}{\eta} \quad \text{Equação (3.2)}$$

Onde:  $n$  = porosidade  
 $\epsilon$  = permissividade do meio (farad/L)  
 $\zeta$  = potencial zeta (V)  
 $\eta$  = viscosidade do fluido ( $\text{FT/L}^2$ )

O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica também pode ser calculado usando a Equação 3.3:

$$K_e = \frac{Q_e \cdot L}{A \cdot t_e \cdot E} \quad \text{Equação (3.3)}$$

Onde:  $Q_e$  = volume de água retirada em um tempo  $t_e$ ;  
 $L$  = comprimento da amostra;  
 $A$  = área da seção transversal da amostra;  
 $t_e$  = tempo transcorrido;  
 $E$  = gradiente de potencial elétrico gerado.

Da eletrostática, extrai-se o potencial elétrico para um condensador de placas paralelas, no caso dos solos é o chamado potencial zeta, que representa a diferença entre o potencial da superfície considerada imóvel e o potencial do fluido. Esta superfície é o limite entre a camada de Stern e a dupla camada difusa, situada a uma distância  $\delta$  da superfície da partícula. Assim, o potencial elétrico nessa superfície é o potencial zeta, como visto no item 2.8.

---

De acordo com Alshawabkeh e Acar (1992), extensivas pesquisas foram realizadas em relação ao potencial zeta na interface vidro-água e indicam que existe uma relação linear entre o potencial zeta ( $\zeta$ ) e o logaritmo da concentração de eletrólitos no sistema (na solução) -  $c_0$  (Equação 3.4).

$$\zeta = A - B \log C_0 \quad \text{Equação (3.4)}$$

Onde, A e B são duas constantes determinadas experimentalmente e  $C_0$  ( $M/L^3$ ) é a concentração eletrolítica total.

Existe a hipótese de que a queda no pH do solo devido ao processo eletrocinético causará um decréscimo no coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico associado com a queda no potencial zeta. Daí, o fluxo eletro-osmótico começará a decrescer e eventualmente parar no último estágio do processo. Os resultados de Hamed *et al.* (1991) e Acar *et al.* (1993) demonstraram o decréscimo e cessão da eletro-osmose sob ensaios continuados. Consequentemente, o valor de  $K_e$  determinado em ensaio unidimensional é dependente do tempo e controlado pela geração química nos eletrodos.

De acordo com a expressão, quanto maior a concentração eletrolítica, menor é o potencial zeta. Assim, altas concentrações eletrolíticas no fluido dos poros limitam o fluxo eletro-osmótico, podendo, segundo Alshawabkeh e Acar (1992), para um determinado valor de pH, ser atingido o chamado ponto isoelétrico, onde o potencial zeta cai a zero, e o fluxo eletro-osmótico pode ser virtualmente eliminado. Então, o efeito do pH no potencial zeta e fluxo eletro-osmótico varia significativamente com o tipo de mineralogia (Alshawabkeh e Bricka, 2000). Quando a carga negativa na superfície das partículas de argila (potencial zeta negativo), a eletro-osmose ocorre do ânodo para o cátodo, enquanto quando carga positiva na superfície, a eletro-osmose tem sentido inverso (Eykholt e Daniel, 1994).

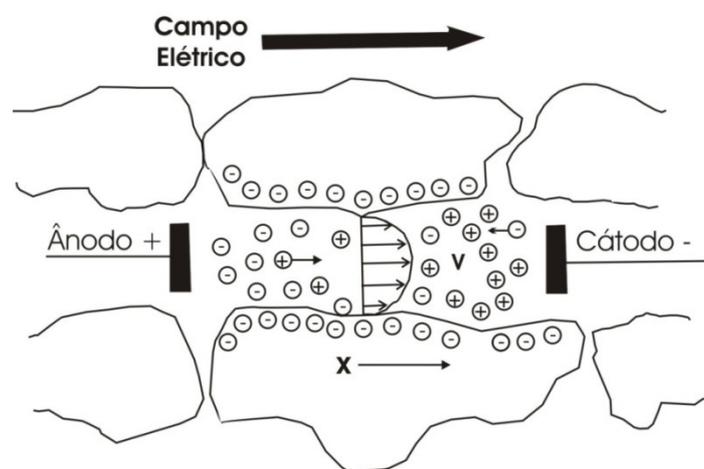
A teoria de Helmholtz-Smoluchowsky é considerada uma teoria para grandes poros. Esta não leva em consideração a interação entre duplas camadas de partículas adjacentes. Como a espessura da dupla camada difusa (DCD) é inversamente proporcional à concentração eletrolítica, DCDs adjacentes podem se sobrepor para concentrações no fluido intersticial muito baixas. Isso implica que, para muito baixas concentrações, a teoria pode não ser aplicável, pois a espessura da DCD não pode mais ser desprezada (Penn, 1997, *apud* Schmidt, 2004).

### 3.1.2. TEORIA DE ESRIG E COMPLEMENTAÇÕES

A explicação teórica de consolidação eletro-osmótica foi também apresentada por Esrig (1968), baseado no desenvolvimento da poropressão resultante da aplicação de um campo de potencial uniforme. Esrig mostrou que, aplicando a equação da continuidade e a lei da conservação de massa, a equação da consolidação unidimensional convencional também é verdadeira para consolidação eletro-osmótica unidimensional. A teoria foi validada por Wan e Mitchell (1976). Admite-se que o fluxo causado por um campo elétrico deve ser superposto ao fluxo causado pelo gradiente hidráulico.

Em um sistema água-argila, a camada dupla de água consiste de uma parte fixa e uma parte difusa, como descrito na teoria de Helmholtz-Smoluchowski (Figura 3.5). A água, que é dipolar, é atraída tanto por superfície carregada negativamente nas partículas argilosas quanto por cátions na camada dupla. Se uma corrente direta é aplicada a um sistema, cátions na dupla camada difusa movem-se em direção ao cátodo para ganharem elétrons e desse modo tornarem-se descarregados.

Nota-se na Figura 3.5 que a velocidade do fluxo é constante em toda a seção da coluna de água circundada pela dupla camada difusa, enquanto testes em tubos capilares mostram que a velocidade do fluxo aumenta das paredes para o centro do tubo (Mitchell, 1976). Dessa forma, fazendo uma comparação do fluxo de água no solo com o fluxo através de um tubo capilar, o movimento de água dentro da camada de argila comporta-se como indicado na Figura 3.6.



**Figura 3.6** - Movimento da água devido aplicação de campo elétrico (Nascimento, 2005).

Durante o processo, a poropressão muda seu desenvolvimento na massa de solo. Assumindo que a tensão total permanece constante, a mudança na poropressão, portanto, levará a mudanças na tensão efetiva do solo e, por consequência, a mudanças na resistência do solo. Se a água for removida no cátodo e não reposta no ânodo, resultará em consolidação do solo.

De acordo com Esrig (1968), a eletricidade induz a velocidade de fluxo de água através do solo,  $V_e$ , sendo que o gradiente de voltagem (campo elétrico)  $\partial V/\partial x$ , está relacionado proporcionalmente ao coeficiente de permeabilidade eletro-cinético,  $K_e$ , dado por:

$$V_e = K_e \frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{Equação (3.5)}$$

Pela lei de Darcy, a velocidade de fluxo,  $V_h$ , devido a algum excesso do gradiente da poropressão é dada por:

$$V_h = \frac{K_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Equação (3.6)}$$

Onde,  $K_h$  é a condutividade hidráulica,  $u$  é o excesso de poropressão, e  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

Assumindo a validade da superposição dos fluxos induzidos eletricamente e hidraulicamente, segue-se que

$$\frac{\partial V_e}{\partial x} + \frac{\partial V_h}{\partial x} = 0 \quad \text{Equação (3.7)}$$

Integrando os termos da equação (3.7)

$$K_e \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{K_h}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad \text{Equação (3.8)}$$

Dessa maneira, uma corrente elétrica é aplicada de um lado a outro em uma massa de solo por eletrodos situados em um arranjo de fluxo aberto ou fechado. O arranjo de fluxo aberto é o caso onde eletrodos são dispostos em uma configuração que permita entrada ou saída de água. No arranjo de fluxo fechado, o eletrodo ou sua configuração não permite fluxo de líquidos (Acar *et al.*, 1994). Dessa forma, sob um gradiente de voltagem uniforme (Esrig, 1968), a poropressão desenvolvida é dependente das condições de contorno no ânodo e no cátodo. Assim, pode-se ter as seguintes formas:

---

**(i) Ânodo e cátodo abertos com livre acesso à água:**

Neste caso, a água no ânodo será reabastecida resultando em nenhum excesso de poropressão. Contudo, um campo elétrico não uniforme deve ser produzido durante a eletro-osmose devido a uma mudança na concentração de íon e pH. A resultante do campo não-uniforme gera poropressão no solo (Acar *et al.*, 1994; Alshawabkeh e Acar, 1996).

**(ii) Ânodo fechado, cátodo aberto:**

Estas são as condições de contorno normais usadas para consolidação eletro-osmótica e estabilização em depósitos de solos moles. Neste caso, a água não é repostada no ânodo, resultando no acréscimo de poropressão negativa. O valor de poropressão  $u$ , desenvolvida, é dado pela expressão:

$$u = - \frac{K_e \gamma_w}{K_h} V \quad \text{Equação (3.9)}$$

Onde  $V$  é a tensão aplicada.

Portanto, um ânodo fechado produz poropressão negativa em alguns pontos que é proporcional à tensão aplicada. Nettleton *et al.* (1998), em experiência com geossintéticos condutores elétricos (GCEs), gerou poropressão negativa durante a eletro-osmose.

**(iii) Cátodo fechado, ânodo aberto com livre acesso à água:**

Neste caso, o acréscimo de poropressão positiva é gerado no cátodo. O valor da poropressão positiva,  $u$ , é dado por

$$u = \frac{K_e \gamma_w}{K_h} (V_m - V), \quad \text{Equação (3.10)}$$

Onde  $V_m$  é a máxima tensão aplicada.

**(iv) Técnica da polaridade reversa**

Polaridade reversa é uma técnica efetiva que previne a secagem excessiva no ânodo e diminui a corrosão no eletrodo. Promove uma quantidade de água mais uniforme e uma distribuição de resistência ao cisalhamento devido a um aumento mais uniforme na tensão efetiva, como também melhora o desenvolvimento da poropressão (Shang *et al.*, 1995).

---

Durante consolidação eletro-osmótica, poropressão máxima negativa ocorre no ânodo e a poropressão tende a zero no cátodo. Isso produz uma variação na resistência ao cisalhamento do solo entre o ânodo e cátodo, o que não é interessante na prática. Um método sugerido para se resolver esse problema é reverter a polaridade dos eletrodos, desse modo induz a consolidação de solo adjacente ao cátodo (agora o novo ânodo) produzindo uma maior consolidação uniforme entre os eletrodos.

O efeito da polaridade reversa na eficiência do tratamento de eletro-osmose foi estudado também por Shang *et al.* (1995). Os autores concluíram que a técnica aumentou a eficiência do tratamento, o benefício sendo atribuído à redução na reação eletroquímica adversa que pode ocorrer durante a eletro-osmose relacionado à mudança no gradiente de pH e inversão de eletrodo. A voltagem aplicada no tempo de polaridade reversa deve ser aumentada ou diminuída. Estudos teóricos feitos por Wan e Mitchell (1976) sugerem que um maior ganho na tensão efetiva pode ser alcançado em um curto tempo duplicando a voltagem aplicada depois da polaridade reversa.

A poropressão desenvolvida por eletro-osmose é também dependente da densidade de corrente e da resistividade do solo. A Equação 3.9 pode ser expressa em termos de densidade de corrente ( $J$ ) e resistividade do solo ( $\rho$ ):

$$u = -\frac{K_e}{K_h} \gamma_w J \int_0^x \rho(x) dx \quad \text{Equação (3.11)}$$

Isto mostra que a corrente é um parâmetro que governa o processo. Se não existir corrente, o processo não será eficaz (Lo *et al.*, 1991a). O primeiro efeito importante da corrente elétrica no solo é a imposição de uma direção ao movimento da água. Uma segunda consequência favorável é o fato da corrente elétrica permitir a extração da água do solo, apenas utilizando o eletrodo negativo como um poço filtrante. Isso porque, graças à sua corrente elétrica, esse poço será alimentado pela água presente no solo envolvente, sendo que o solo saturado situado na vizinhança do eletrodo positivo tornar-se-á cada vez mais seco à medida em que a água é expelida para o eletrodo negativo. Na prática, a eletro-osmose não visa secagem do solo, mas sim direcionar a percolação da água de forma a provocar um efeito de estabilização.

---

### 3.2. EFICIÊNCIA ELETRO-OSMÓTICA

A permeabilidade eletro-osmótica ( $K_e$ ) também está relacionada com a eficiência eletro-osmótica de transporte de água ( $K_i$ ) (Equação 3.12). A economia e eficiência da extração da água são governadas pela quantidade de água transferida por carga elétrica unitária, que é quantificada pela eficiência eletro-osmótica de transporte de água,  $K_i$ .

$$K_i = K_e / \sigma_e, \quad \text{Equação (3.12)}$$

Onde  $\sigma_e$  é a condutividade elétrica do solo.

Segundo Mitchell (1991), aplicações de campo com condutividade no intervalo de 0,02-0,035 S<sup>(2)</sup>/cm tem mostrado sucesso, mas tratamento em solos com condutividade em torno de 0,25 S/cm é pouco provável de ser efetivo.

No caso do parâmetro  $K_i$ , este deve variar entre 0 a 1,2 cm<sup>3</sup>/A/s, dependendo da condutividade elétrica do meio poroso. A condutividade muda com a quantidade de água, capacidade de troca catiônica e o conteúdo eletrolítico livre no solo, como também está relacionado à química dominante durante a eletro-osmose, (Acar *et al.*, 1994 e Gray e Mitchell, 1967).

Gray e Mitchell (1967) indicaram que a eficiência eletro-osmótica inicial ( $K_i$ ) decresce com o decréscimo da umidade e com o aumento na atividade do solo. Hamed *et al.* (1991) também mostraram que  $K_e$  e  $K_i$  não são constantes, mas que decrescem com as reações químicas existentes ao longo da massa de solo durante o processo.

Estudos feitos por Hamed *et al.* (1991), mostraram que  $K_i$  decresceu com um aumento no gradiente elétrico, possivelmente devido a uma alta influencia do íon H<sup>+</sup>.

Acar *et al.* (1994) afirmam que o valor de  $K_i$  mudou na ordem H>Cu>Al>Na>Ca presente em argila e que gradientes de voltagem maiores foram requeridos para iniciar fluxo em argilas com elemento alumínio (Al) predominando, do que em outras argilas com outros elementos predominando.

---

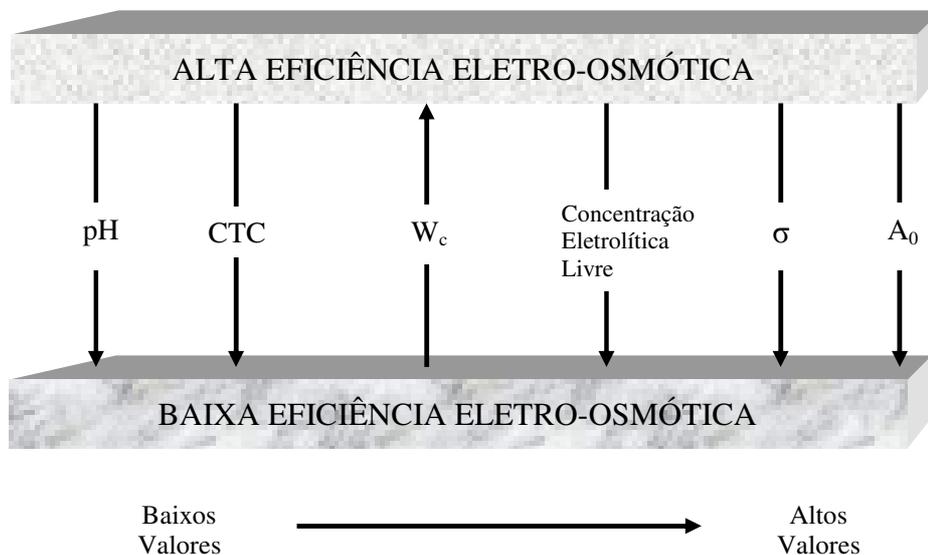
<sup>(2)</sup> A condutividade elétrica é expressa em  $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ , a unidade  $\Omega^{-1}$  aparece tão freqüentemente que foi dado um nome especial, o Siemens ( $S = 1\Omega^{-1}$ ).

---

Por conseguinte, influenciam positivamente na eficiência eletro-osmótica os seguintes fatores:

- Alta umidade  $W_c$ ;
- argilomineral com baixa CTC;
- Baixa valência dos cátions trocáveis;
- Alta densidade de carga na superfície e uma alta área de superfície;
- Uma composição de água que tem baixa condutividade ( $\sigma$ ), baixa salinidade, baixo pH e uma baixa densidade de carga na superfície por unidade de volume dos poros -  $A_0$ .

A relação desses fatores está esquematizada na Figura 3.7.



**Figura 3.7** - Influência das variáveis no solo na eficiência eletro-osmótica. (Jones *et al.*, 2008)

---

**4 - GEOSSINTÉTICOS E APLICAÇÕES**

Os produtos geossintéticos estão cada vez mais presentes no dia a dia das obras de engenharia no Brasil e no mundo, com destaque para as áreas geotécnicas, hidráulicas e hidrológicas. Hoje, as opções disponíveis permitem realizar obras mais rápidas, com menores gastos em equipamentos e mão de obra. Sua versatilidade tende a aumentar os campos de aplicação, surgindo continuamente novos produtos para minimizar e/ou eliminar as situações de risco.

Os geossintéticos podem solucionar problemas que envolvam desde as partes hidráulicas até as estruturais, como aumentar a resistência do reforço de aterro, elementos de muro e acelerar a consolidação de solos moles. Essas utilizações, bem como o benefício do uso de geossintéticos em aplicações hidráulicas estão sendo bastante exploradas por vários autores de todos os Continentes (Heibaum *et al.*, 2006).

Nos últimos tempos, um tipo de geossintético obteve destaque, o geocomposto, produto industrializado formado pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebido para desempenhar uma função específica.

Produtos como geocompostos drenantes, geotubos, geogrelhas, geomembranas e geoformas, podem substituir materiais convencionais como areia, pedra, tubos de concreto, aterros, muros, diques e outros, viabilizando a construção de obras mais econômicas, mais esbeltas e mais seguras. Assim, entre os vários benefícios, inclui-se a redução do impacto ambiental, pois esses materiais geossintéticos substituem materiais naturais como areia, pedra, madeira, etc.

Inicialmente, os geossintéticos eram mais direcionados para obras referentes à drenagem rodoviária e aterros sobre solos compressíveis; hoje, abrangem também os setores de saneamento, controle de erosão, aterros sanitários, obras marítimas e fluviais, barragens de terra, recapeamento asfáltico, ferrovias entre outros. A Tabela 4.1 mostra de forma resumida e clara alguns tipos de geossintéticos e suas devidas funções na engenharia geotécnica.

**Tabela 4.1** - Tipos de Geossintéticos e suas aplicações possíveis. [modificado – Zornberg e Christopher (1999)]

Tipo	Função Característica					Impermeabilização
	Reforço	Separação	Drenagem	Filtração	Proteção	
Geotêxtil Tecido	X	X			X	
Geotêxtil Não-Tecido	X	X	X	X	X	
Geogrelha	X					
Geomembrana		X			X	X
Geocélula	X				X	
Geocompostos	X		X	X	X	X
Geodreno			X	X		

Em complementação a Tabela 4.1, inclui-se a função de filtração no geotêxtil tecido e impermeabilização no geotêxtil não tecido quando impregnado por asfalto. Dentre os tipos de geossintéticos apresentados dar-se-á ênfase ao geodreno por ser o produto utilizado nesta pesquisa.

#### **4.1. TÉCNICAS PARA ACELERAÇÃO DA CONSOLIDAÇÃO DE SOLOS E CUSTO DA ENERGIA DO TRATAMENTO ELETROCINÉTICO**

Muitas técnicas construtivas podem ser aplicadas para se conseguir a diminuição do recalque durante a vida útil de uma obra. As principais técnicas utilizadas para aceleração da consolidação de solos moles, conseqüentemente diminuição de recalques, estão apresentadas na Tabela 4.2.

Ao planejar a construção de uma obra sobre um solo mole, algumas alternativas de projeto devem ser levadas em consideração para a análise de viabilidade técnica e econômica. A primeira delas consiste em evitar o problema, removendo a camada mole, alternativa que geralmente é executada quando a camada é de espessura relativamente pequena. Depois disso, deve-se avaliar caso a caso quais das técnicas poderão ser utilizadas.

**Tabela 4.2** - Principais características dos métodos para controle de recalques (modificado - Magnan, 1994)

<b>Método</b>	<b>Dados Necessários</b>	<b>Desvantagens</b>	<b>Confiabilidade</b>	<b>Comentários</b>
Pré-carregamento	Compressibilidade, Permeabilidade	Tempo necessário	Baixa – se recalques desejados são pequenos	Lento e baixo custo
Pré-carregamento com drenos verticais	Compressibilidade, Permeabilidade vertical e horizontal	Menor tempo necessário que pré-carregamento simples	Mais confiável	Rápido e relativamente caro
Substituição da Argila	Espessura da Camada	Local para disposição do solo extraído	Boa em casos de total substituição	Rápido e alto custo
Colunas Granulares	Resistência do solo e módulos	Equipamento, testes de campo preliminares	Boa após análise dos testes de campo	Rápido e alto custo
Lajes Estaqueadas	Resistência do solo	-	Boa	Alto custo
Eletro-osmose	Propriedades físico-químicas, Permeabilidade, compressibilidade	Destruição de eletrodos, eletricidade necessária	Incerta	Alto custo
Aterros com materiais leves	Compressibilidade, Permeabilidade	Proteção do material leve	Baixa – se recalques desejados são pequenos	Alto custo
Aterros estaqueados	Resistência do solo e módulos	-	Boa	Rápido e alto custo
Colunas de argamassa injetadas	Resistência do solo e módulos	-	Boa	Rápido e alto custo

Dentre as técnicas apresentadas, a mais amplamente utilizada são os drenos verticais na camada de argila com aplicação de uma sobrecarga. O fluxo de água na direção horizontal no sentido dos drenos ocorrerá de forma mais rápida devido ao aumento da tensão confinante pela pré-carga e haverá redução do caminho do comprimento de drenagem com a instalação do dreno vertical pré-fabricado (DVP), conseqüentemente, o tempo para completar a consolidação será reduzido.

Os princípios da consolidação de solos por DVPs têm sido extensivamente investigados na literatura (Hansbo *et al.*, 1981; Indraratna *et al.*, 1994; Bergado *et al.* 2002; Lorenzo *et al.*, 2004; Bo, 2004; Terashi e Katagiri, 2005). Algumas considerações devem ser observadas no momento do projeto e processos de construções, o que poderá elevar o custo final (Chu *et al.*, 2004). Contudo, essa técnica tem uma razoável confiabilidade e é relativamente rápido, podendo se tornar em alguns momentos mais caro.

A Tabela 4.2 mostra, de forma clara, as características dos métodos. Apenas em relação ao método que utiliza a eletro-osmose se mostrou desatualizada com comentários relativamente

---

precipitados. Desatualizada, dada a inovação no final da década de 90, em que polímeros foram preparados para serem condutores, os geossintéticos eletrocínéticos (CGE). Comentários precipitados, visto que a confiabilidade é dada como incerta. Todavia, após a realização dessa tabela, muitas experiências com eletro-osmose destinadas à consolidação de solo mole foram realizadas, inclusive em campo. Ocorreram experimentos de campo em Cingapura (Karunaratne *et al.*, 2002 e Chew *et al.*, 2004) e vários estudos experimentais, dentre estes: no Reino Unido (Jones *et al.*, 2002, Nettleton *et al.*, 1998), na Malásia (Hamir *et al.*, 2001), na Tailândia (Bergado *et al.*, 2000) e Coréia (Kim *et al.*, 1997). Logo, a classificação da confiabilidade poderá ser mudada de incerta para alta ou baixa a depender do objetivo a ser atingido.

Com relação ao custo, classificado como alto, pode-se contrapor com o trabalho de campo realizado por Bjerrum *et al.* (1967). Tratava-se de uma escavação em uma argila marinha mole para construção de um sistema de tratamento de esgoto. Utilizou-se o processo eletro-osmótico em uma área de 200 m<sup>2</sup> e atingiu-se o recalque desejado em apenas 120 dias, consumindo um total de 30.000kWh de energia elétrica. O efeito do tratamento eletro-osmótico foi imediato, apresentando-se consolidação inicial a uma taxa de 8 mm/dia e final de 4-5 mm/dia. Baseando-se no custo de energia do Distrito Federal (CEB, 2009), o custo total de energia para o tratamento seria de aproximadamente R\$ 9.300,00. Portanto, os autores concluíram que a eletro-osmose foi uma solução econômica, visto que atingiu o aumento na resistência ao cisalhamento necessário para alcançar o objetivo principal de permitir a escavação. Ou seja, o custo foi relativamente baixo para o benefício alcançado.

A Tabela 4.3 mostra, de forma resumida, o consumo de energia obtido em tratamentos eletrocínéticos realizados em campo. Para adquirir uma melhor sensibilidade de custo, o consumo de energia normalizado é dado pelo volume de solo tratado.

Nesses trabalhos que foram realizados em quatro décadas, o consumo de energia variou de 0,5 a 17 kWh/m<sup>3</sup>. A energia consumida no tratamento utilizando os novos eletrodos DVEs reportados por Chew *et al.* (2004) e Rittirong *et al.* (2008) foi 1,8 e 0,7 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente. Logo, pode-se observar a tendência da redução do custo do tratamento com o passar do tempo, devido à descoberta de novos materiais e ao conhecimento dos mecanismos que a tecnologia oferece.

**Tabela 4.3** - Consumo de energia em ensaios em campo.

PROJETO	TIPO DE ELETRODO	ENERGIA (kWh/m <sup>3</sup> )	CUSTO (R\$/m <sup>3</sup> )	Referência
Estabilização de escavação	Aço	17	5,27	Bjerrum <i>et al.</i> (1967)
Estabilização de aterros em estaleiro	Aço	0,5	0,16	Chappell e Burton (1975)
Estabilidade de taludes no rio Kootenay	Aço	6,7	2,08	Wade (1976)
Ensaio de campo de reforço de argila	Cobre	6,4	1,98	Lo <i>et al.</i> (1991b)
Melhoria de grupos de estacas	Aço	1	0,31	Milligan (1994)
Recuperação de terras em Tuas	DVE	1,8	0,56	Chew <i>et al.</i> (2004)
Construção de estradas	DVE	0,7	0,22	Rittirong <i>et al.</i> (2008)

Também pode-se observar essa tendência, na comparação dos trabalhos de Lo *et al.* (1991b) e Bjerrum *et al.* (1967). No trabalho reportado por Bjerrum *et al.* (1967), o custo de eletricidade foi 25% do custo total do projeto. Já o consumo de energia total, no ensaio realizado por Lo *et al.* (1991b) foi de, aproximadamente, 1% do custo total do projeto. Na comparação dos dois casos, a última versão do tratamento eletro-osmótico deve, portanto, ser considerada relativamente eficiente e econômica.

Os estudos feitos por Rittirong *et al.* (2008) em laboratório encontraram um consumo de energia da ordem de 200kWh/m<sup>3</sup>, utilizando uma voltagem de 25V. Glendinning e Lamont Black (2005) fizeram um ensaio piloto em dois contêineres de 9,5m<sup>3</sup> de capacidade para o tratamento de esgoto, utilizando um espaçamento entre os eletrodos de 0,9m e um gradiente de voltagem de 33V/m. Em 63 dias de tratamento houve um consumo de energia de 134 kWh/m<sup>3</sup>.

A variação do consumo de energia é grande porque depende muito da condutividade elétrica do meio. Portanto, com maiores estudos nesta área de atuação, poder-se-á otimizar alguns parâmetros, obtendo-se um custo de energia total no projeto menor.

## 4.2. GEOSSINTÉTICO ELETROCINÉTICO

Materiais geossintéticos eletrocínéticos (GE) podem ter a forma de materiais simples e serem condutores elétricos ou materiais compostos, em que pelo menos um elemento é condutor elétrico. Pode ser da combinação de tecido, não tecido, tricotados por agulhas ou materiais laminados ou por extrusão e ter formato 2D e 3D. Segundo Hall *et al.* (2008), o conceito de materiais geossintético eletricamente condutor (GEC) foi introduzido por Jones *et al.* (1996).

---

Um geocomposto que seja condutor elétrico e hidráulico permite que um simples elemento seja usado como um eletrodo, removendo a necessidade de instalação de um filtro/dreno separado de eletrodos metálicos. Os principais materiais condutores considerados para uso de GEC incluem: materiais de fibras de carbono, polímeros preenchidos para se tornar condutores e compostos formados de elementos condutores/não condutores.

Um eletrodo GEC usado para consolidação consiste de um condutor, um filtro e um dreno. Materiais geossintéticos convencionais são usados para drenagem e filtração, e o condutor é costurado ao material ou misturado às fibras poliméricas, formando o geotêxtil. Assim, geossintéticos eletrocínicos são formados pela inclusão de elementos condutores usando tecido, tricô e as técnicas de extrusão ou lamelar e podem continuar com a forma de um material geossintético convencional.

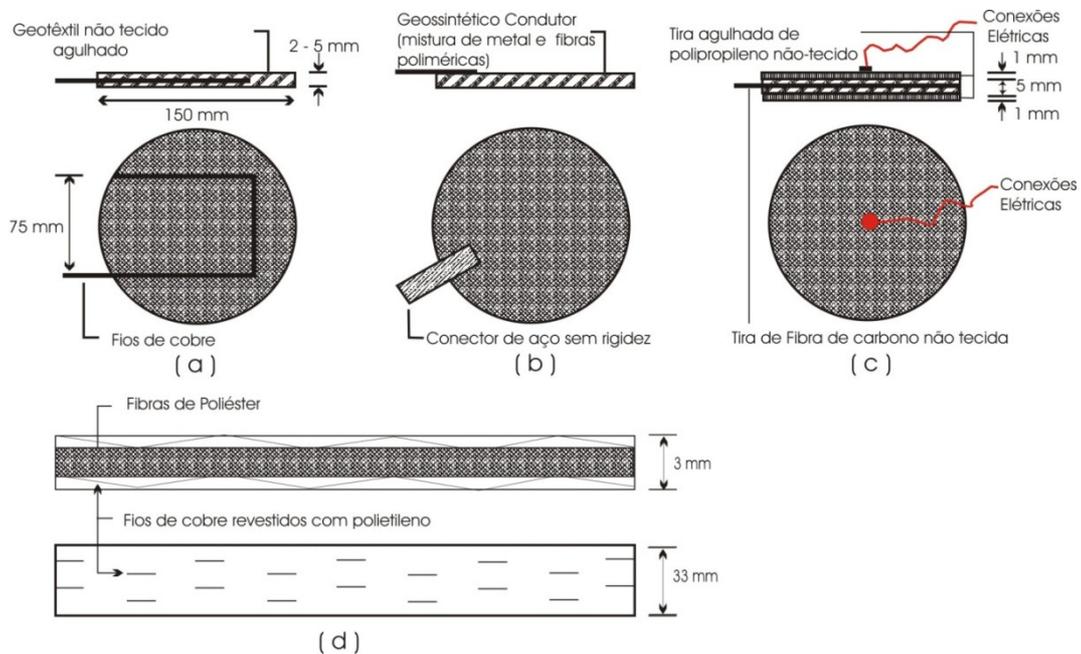
GEC pode ser usado para consolidar argila muito mole, permitir a construção em pasta argilosa ou lama, estabilizar aterros de ferrovias, rebaixar esgotos, controlar condições de drenagem em turfas e rebaixar aterros sanitários e minas de rejeitos entre outros (Lamont - Black, 2001).

#### 4.2.1. TIPOS DE ELETRODOS GEC

Seguem alguns tipos de eletrodos GEC citados por Hamir et al. (2001).

- a) **GEC Tipo 1:** Um material geossintético contendo um cordão de fio de cobre. Este eletrodo é formado por um geotêxtil agulhado convencional de polipropileno. A corrente elétrica é transferida por um fio de cobre costurado dentro do material como mostrado na Figura 4.1(a).
- b) **GEC Tipo 2:** Um material geossintético incorporado por fibras de aço inoxidável. Este eletrodo é formado por um tecido eletricamente condutor feito de uma mistura de aço inoxidável e fibras poliméricas (Figura 4.1(b)). As fibras de aço inoxidáveis constituem 20% do peso do material.
- c) **GEC Tipo 3:** Um composto de polipropileno e chapa de fibra de carbono não tecido. Este eletrodo é formado do sanduíche de fibra de carbono entre duas camadas de chapa de polipropileno não tecido (Figura 4.1(c)). A corrente elétrica é transmitida pelo material carbono com o material polipropileno fornecendo drenagem e filtração.

- d) **GEC Tipo 4:** Geocomposto reforçado com uma corda de fio de cobre. Este eletrodo é formado usando uma fita de reforço comercialmente disponível formado de fibras de poliéster anexado em polietileno. Um fio de cobre é costurado no polietileno tornando-se condutor (Figura 4.1(d)).



**Figura 4.1** - Eletrodos GEC: Tipos dos eletrodos para ensaio eletro-osmótico.

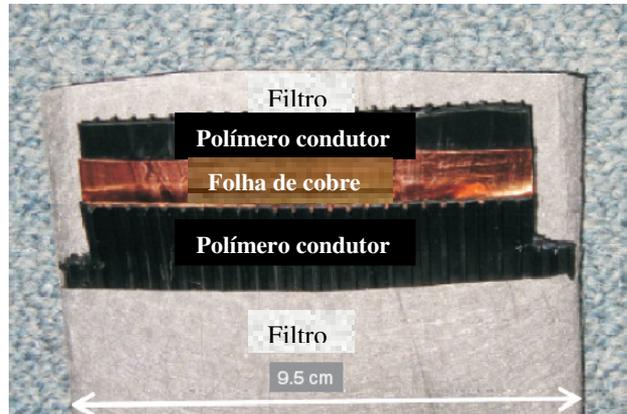
(modificado - Hamir *et al*, 2001)

Chew *et al.* (2004) confeccionaram drenos verticais elétricos (DVE) com dois fios de aço inoxidável e com dois e três fios de cobre dentro do núcleo de plástico tornando-se um polímero condutor. A corrente era passada para os DVEs devido ao contato com fios de cobre de maior diâmetro,  $6 \text{ mm}^2$  de seção transversal, que foi conectado a fonte DC (Figura 4.2).



**Figura 4.2** - DVE com dois fios de cobre no núcleo do plástico. (Chew *et al.*, 2004)

Outro DVE foi desenvolvido por Rittirong *et al.* (2008) baseado na versão apresentada anteriormente. A composição desse DVE é mostrada na Figura 4.3, na qual uma folha de cobre é presa ao núcleo plástico. O núcleo é feito de polímero, que passa a ser condutor com a inserção da folha de cobre. Este DVE tem 6 mm de espessura e 95 mm de largura. A folha de cobre dentro do centro do polímero DVE foi conectada a fonte DC.



**Figura 4.3** - Componentes do Dreno Vertical Elétrico (DVE) (Rittirong *et al.*, 2008).

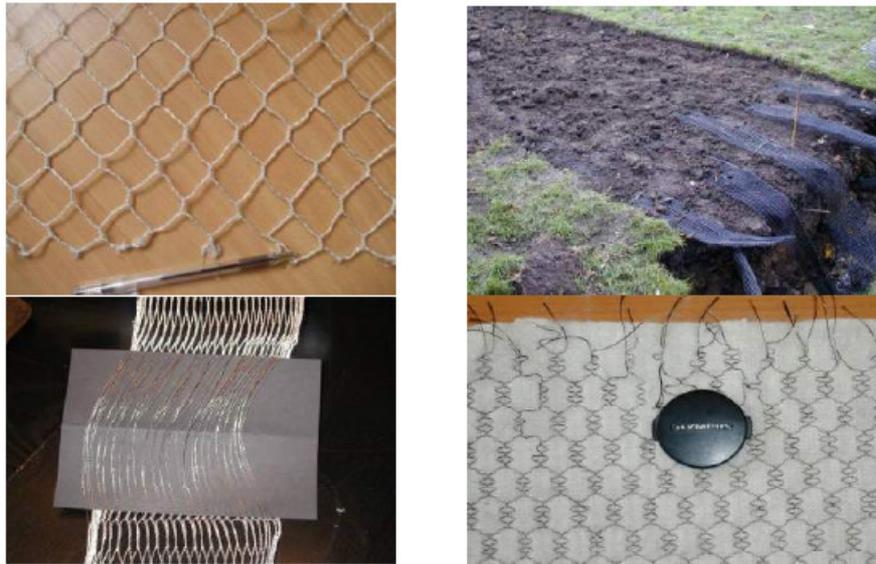
Outros exemplos de materiais GEC que estão sendo desenvolvidos são mostrados nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6.



**Figura 4.4** - Materiais GEC lineares (Jones *et al.*, 2008).



**Figura 4.5** - Eletrodos GEC para misturas de pastas fluidas ou lamas (Jones *et al.*, 2008).



**Figura 4.6** - Eletrodos GEC para condições planares (Jones *et al.*, 2008).

Desde o fim da década de 70, os cientistas Alan Heeger, Alan MacDiarmid e Hideki Shirakawa pesquisam os polímeros, tentando alterar radicalmente a percepção das propriedades desses materiais plásticos. Esses cientistas, no ano 2000, foram laureados com o prêmio Nobel de Química, pela descoberta que polímeros podem conduzir correntes elétricas. Essa descoberta poderá gerar mais uma versão dos GEC, pois os polímeros contidos nos geodrenos serão realmente condutores, portanto sem inserção de material para tal finalidade. Estudos nesse sentido já estão sendo planejados, com grande esperança que esse processo poderá aumentar ainda mais a eficácia do GEC.

### **Polímeros Condutores**

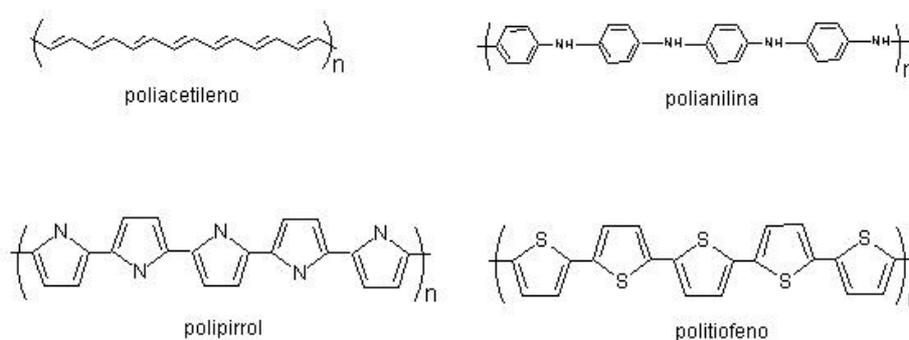
A idéia de associar propriedades elétricas dos metais às propriedade mecânicas dos polímeros ocorreu por volta da década de 50, pela incorporação de cargas condutoras (negro de fumo, fibras metálicas, ou fibra de carbono) a estes, produzindo os chamados “polímeros condutores extrínsecos” – Extrínsecos porque a carga condutora é adicionada. Recentemente, uma outra classe de materiais condutores, “polímeros condutores intrínsecos”, vem sendo estudada e suas propriedades podem vir a contribuir para o uso de diversas aplicações, como exemplo uso do método eletrocínético.

Polímeros são moléculas que repetem sua estrutura regularmente ao longo da cadeia. Os polímeros conjugados são também conhecidos como polímeros condutores porque são caracterizados pela alternância de camadas simples e duplas entre átomos de carbono na

---

coluna do polímero. Esta conjugação permite que seja criado um fluxo de elétrons em condições específicas (Faez *et al.*, 2000). A condutividade desses polímeros pode ser aumentada muitas vezes por processos que envolvem a remoção ou adição de elétrons da cadeia, sendo este processo denominado “dopagem”. Isto significa que elétrons são removidos (por oxidação) ou introduzidos (por redução), gerando uma lacuna ou elétrons extras que poderá mover-se ao longo da molécula e assim tornar-se eletricamente condutor.

Na Figura 4.7 estão representadas as estruturas dos quatro polímeros condutores mais estudados, em sua forma neutra.



**Figura 4.7** - Estruturas de alguns polímeros intrinsecamente condutores.

Desde a primeira versão dos geossintéticos condutores elétricos, com a inserção de um material condutor no centro, ensaios confirmaram que eletro-osmose é um efetivo método de melhorias de solo para argila mole (Lo *et al.*, 1990a e b). Porém, existem algumas desvantagens no uso dessa versão. Por exemplo, a eletrólise da água no eletrodo sempre produz condições ácidas no ânodo que contribuem para a corrosão dos eletrodos metálicos. Em certo período de tempo, a corrosão reduz o contato elétrico com o solo e a eficiência elétrica é reduzida. Outra situação é que esta versão exige a polaridade reversa para tentar manter por mais tempo os eletrodos, e com isso causa o aumento no custo do processo (Su *et al.*, 2004).

Entretanto, Jones *et al.* (2008) tiveram uma percepção positiva dessa limitação, observando ser benéfico incluir elementos corrosíveis dentro da estrutura do GCE porque esses poderão dissolver e assim passar corrente dentro do solo, mantendo o gradiente de voltagem que direciona a eletro-osmose para os devidos fins como acelerar o processo de consolidação do solo.

---

### 4.3. CORROSÃO ELETROQUÍMICA

Em alguns casos, pode-se admitir a corrosão como o inverso do processo metalúrgico, cujo objetivo principal é a extração do metal a partir de seus minérios ou de outros compostos, ao passo que a corrosão tende a oxidar o metal. Assim, muitas vezes o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério encontrado na natureza, dos quais foram originalmente extraídos.

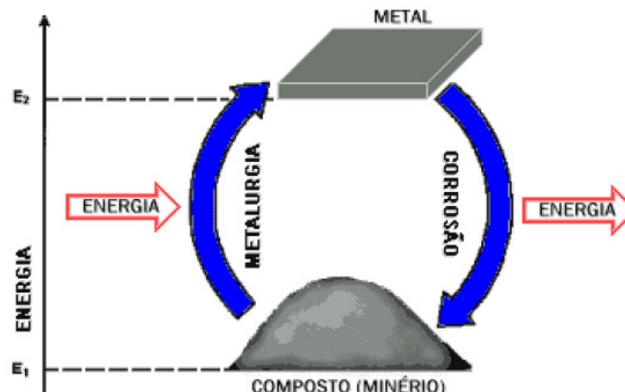


Figura 4.8 - Ciclo dos Metais. (Dutra, 1987)

A maior deficiência dos geossintéticos electrocinéticos que usam materiais metálicos em seu interior para conduzir a eletricidade é que, quando ocorre o processo de eletrólise da água, produzem-se condições ácidas no ânodo que contribuem para a rápida corrosão dos eletrodos metálicos.

Quando um processo químico ocorre, produzindo transferência de elétrons, chama-se de pilha ou bateria, mas quando o processo químico é provocado por uma corrente elétrica (variação da quantidade de elétrons no tempo) é denominado de eletrólise. Resumindo, pilha e bateria são processos químicos que ocorrem espontaneamente e geram corrente elétrica, já eletrólise é um processo químico (reação química) que ocorre de forma não espontânea, ou seja, ocorre na presença de uma corrente elétrica.

Portanto, a corrosão consiste na deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associado a esforços mecânicos. A deterioração leva simultaneamente, ao desgaste, às variações químicas na composição e às modificações estruturais (Gentil, 1982).

---

Dependendo do tipo de ação do meio corrosivo sobre o material, os processos corrosivos podem ser classificados em dois grandes grupos:

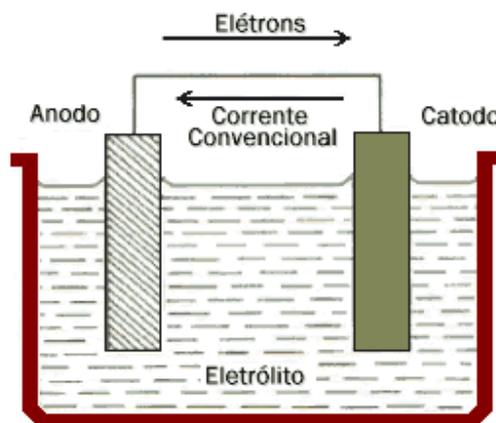
- Corrosão Eletroquímica;
- Corrosão Química.

Por ocorrer neste processo à corrosão eletroquímica em maior intensidade, restringe-se à sua explicação. Entende-se por corrosão eletroquímica os processos de destruição que se desenvolvem, por meio de eletrólitos (água do mar, solo, soluções aquosas de ácidos, bases, sais, ar atmosférico com umidade, etc...) em contato com o metal. O processo de corrosão eletroquímica é devido ao fluxo de elétrons que se desloca de uma área da superfície metálica para outra. Esse movimento de elétrons é devido à diferença de potencial, de natureza eletroquímica, que se estabelece entre as regiões.

O mecanismo se traduz no funcionamento de uma pilha de corrosão que requer quatro elementos fundamentais, a saber:

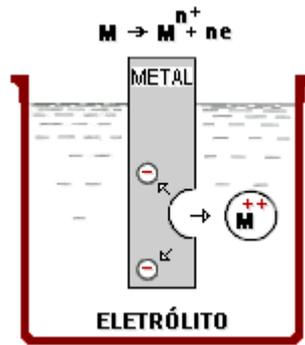
- **área anódica:** superfície onde verifica-se a corrosão (reações de oxidação);
- **área catódica:** superfície protegida onde não há corrosão (reações de redução);
- **eletrólito:** solução condutora ou condutor iônico que envolve simultaneamente as áreas anódicas e catódicas;
- **ligação elétrica** entre as áreas anódicas e catódicas.

A Figura 4.9 mostra esquematicamente uma pilha de corrosão eletroquímica.



**Figura 4.9** - Pilha de corrosão eletroquímica.

Um conceito importante aplicável às pilhas de corrosão é o da reação de oxidação e redução. As reações da corrosão eletroquímica envolvem sempre estas reações chamadas de oxirredução. Na área anódica onde se processa a corrosão ocorrem reações de oxidação, sendo a principal a da passagem do metal da forma reduzida para a forma iônica (Figura 4.10).



**Figura 4.10** - Reação surgida na área anódica.

Como pode ser visto, o desgaste do material ocorre com a passagem do metal da forma reduzida para a iônica (combinada).



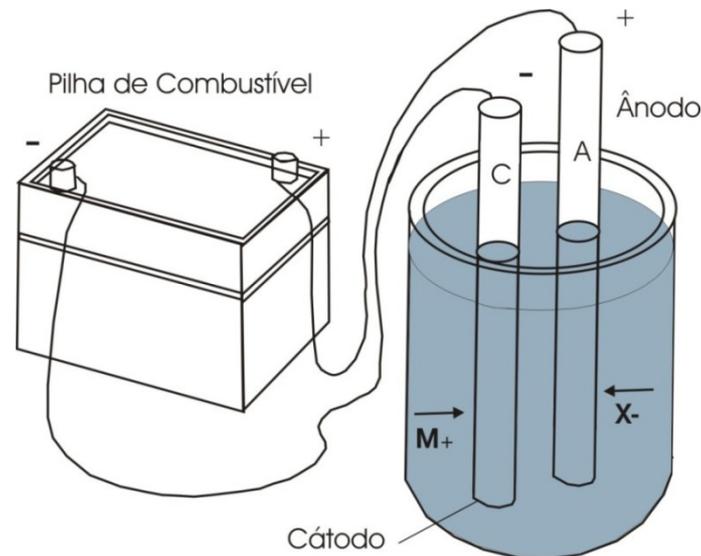
Reação (4.1)

Para melhor compreender a corrosão eletroquímica resultante da eletro-osmose, faz-se uma analogia do processo de eletro-osmose com o processo de uma pilha eletrolítica (Figura 4.11). Na pilha eletrolítica ocorre uma reação redox (oxidação-redução) não-espontânea pela introdução de energia elétrica no sistema. O solo saturado seria representado pelo líquido existente na pilha, e os eletrodos no ânodo e cátodo seriam os eletrodos A e C da pilha eletrolítica.

Na Figura 4.11, a bateria é uma fonte de corrente elétrica contínua, assim como a fonte geralmente utilizada no processo de eletro-osmose. Dois fios saem dos terminais da fonte e entram na célula eletrolítica. Ela consiste em dois eletrodos mergulhados em um líquido que contém os íons  $M^+$  e  $X^-$ .

A bateria atua como uma bomba de elétrons, empurrando elétrons para C e removendo-os de A. Para manter neutralidade elétrica, algum tipo de processo no interior da pilha deve consumir elétrons em C e liberá-los em A. Esse processo é uma reação Oxidação-redução. No eletrodo C, denominado cátodo, íon ou uma molécula sofre redução ao aceitar elétrons. No ânodo, A, são produzidos elétrons pela oxidação de um íon ou molécula. A reação global na

pilha é a soma das duas meias reações nos eletrodos. Enquanto está ocorrendo reação, há um fluxo constante de íons nos dois eletrodos. Íons positivos (cátions) são atraídos para o cátodo; íons negativos (ânions) são atraídos para o ânodo como geralmente ocorre no processo de eletro-osmose.



**Figura 4.11** - Diagrama esquemático de uma pilha eletrolítica. (Nascimento, 2005)

A corrosão pode ocorrer sob diferentes formas, e o conhecimento das mesmas é muito importante no estudo de um processo corrosivo. A caracterização da forma de corrosão auxilia no esclarecimento do mecanismo e na aplicação de medidas adequadas de proteção, daí serem apresentadas as características fundamentais das diferentes formas de corrosão. Os tipos de corrosão mais comuns são (Gentil, 1982):

- **uniforme:** a corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura.
- **por placas:** a corrosão se localiza em regiões da superfície metálica e não em toda sua extensão, formando placas escavadas.
- **alveolar:** a corrosão se processa na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro.
- **puntiforme:** a corrosão se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o seu diâmetro.

- **intergranular:** a corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos.

- **intragranular:** a corrosão se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar à menor sollicitação mecânica.

- **filiforme:** a corrosão se processa sob a forma de finos filamentos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam. Ocorre geralmente em superfícies metálicas revestidas com tintas, ocasionando o deslocamento do revestimento.

- **esfoliação:** a corrosão se processa em diferentes camadas e o produto de corrosão, formado entre a estrutura de grãos alongados, separa as camadas ocasionando o inchamento do material metálico. Geralmente ocorrem nas ligas de alumínio.

A Figura 4.12 mostra os vários tipos de corrosão existentes em um material metálico.

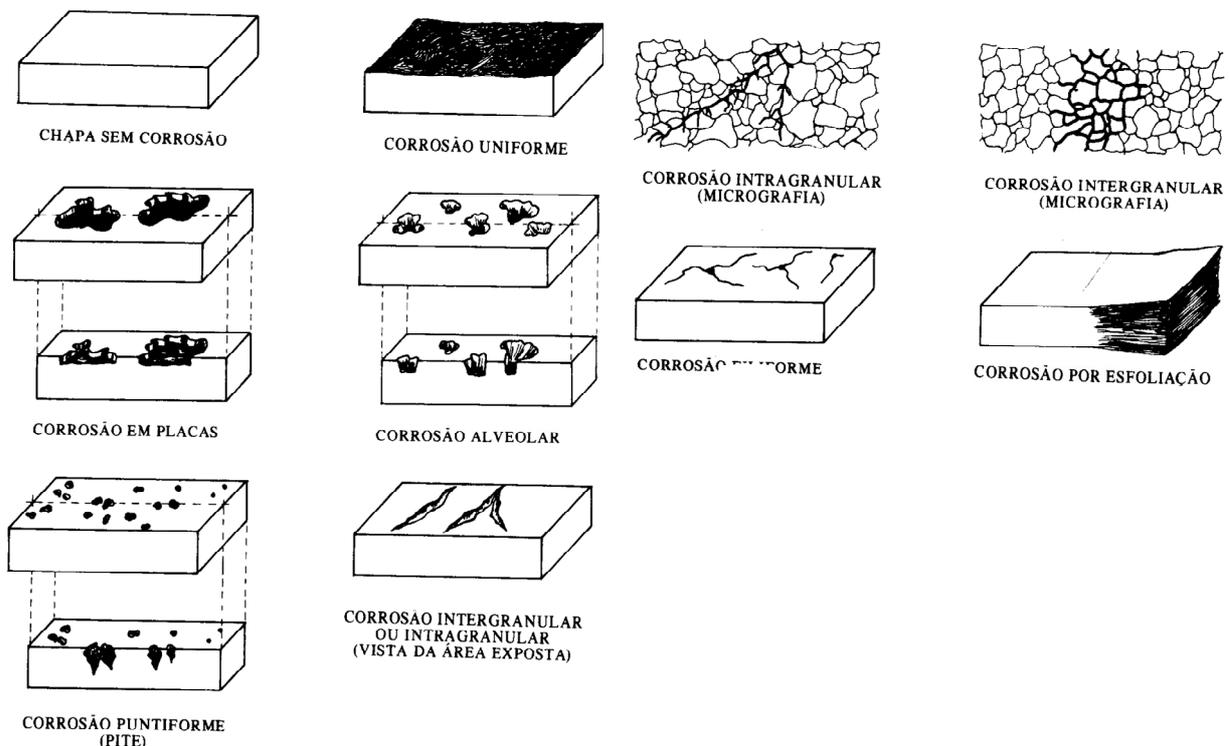


Figura 4.12 - Tipos de corrosão. (Gentil, 1982)

#### 4.4. RECENTES APLICAÇÕES DOS GEOSINTÉTICOS ELETROCINÉTICOS

Geossintéticos eletrocinéticos (CCEs) foram identificados como uma plataforma tecnológica que combina uma grande variedade de materiais, funções e processos para desempenhar diversas atividades, entre elas: secagem do solo e reforço de materiais. Isso poderá ocorrer em diversas condições como lamas, pasta fluida, resíduos e compostos.

A Tabela 4.4 mostra que materiais eletrocinéticos e geossintéticos têm juntos quatorze funções. A combinação das diferentes funções resulta em um grande número de materiais GCEs, logo essa combinação pode ser produzida com propriedades únicas e específicas. Por isso que uma variedade de novas aplicações pode ser executada por materiais GCEs e não poderão ser conduzidas por materiais geossintéticos convencionais. A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros, efeitos e implicações práticas das principais funções dos GCEs.

**Tabela 4.4** - Funções utilizadas nas aplicações práticas dos GCEs (Jones et al., 2008).

MATERIAL	FUNÇÃO	EFEITO
<b>Eletrocinética (EK)</b>	1. Eletro-osmose	- Fluxo de água - Mudança na poropressão - Mudança no volume
	2. Eletroforese	- Movimento das partículas - Orientação das partículas
	3. Migração de Íon	- Movimento do soluto
	4. Eletrólise da água	- Evolução do oxigênio - evolução do hidrogênio - Mudança no pH
	5. Aquecimento	- Aquecimento Joule (Eletrodo) - Aquecimento resistivo (solo)
	6. Reações de Oxidação	-Cimentação do solo - Redução na plasticidade do solo
	7. Reações de Redução	-Atração elétrica de íons metálicos - Evolução da amônia
<b>Geossintéticos (G)</b>	1. Drenagem	-Fluxo de água - Fluxo de gás
	2. Reforço	- Resistência à tração em planos rígidos
	3. Filtração	- Barreiras para sólidos contidas (entrained) nos fluxos
	4. Separação	- Reforço e prevenção de misturas
	5. Contenção	- Contenção física de sólidos
	6. Ação de Membrana	- Barreira para fluxo (contenção de fluidos)
	7. Sorção	- Captura de líquidos ou espécies dissolvidas

**Tabela 4.5** - Parâmetros chaves, seus efeitos e implicações práticas das principais funções eletrocinéticas dos GCEs (Jones et al., 2008).

COMPONENTES ELETROKINÉTICOS	PARÂMETROS	EFEITO	IMPLICAÇÕES PRÁTICAS
<b>Eletro-osmose</b>	- Vazão Q $Q = k_e \cdot (V/L) \cdot A$	- Drenagem e umidade	- Produz movimento de água em materiais de granulometria fina.
	- Poropressão $u = (k_e/k_h) \cdot V/L$	- Consolidação ou descompactação	- Produz consolidação em materiais compressíveis.
<b>Eletrólise</b>	- pH - $\Delta pH = f. (I/A)$ - $[O_2], [H_2]$ - $\Delta [O_2], [H_2] = f. (I/A)$	- Mudanças ácidas e alcalinas  - Oxigenação, i.e., potencial redox	Promove crescimento de raízes e atividade microbiana do solo
	<b>Eletrocinética</b>	$f$ pH.CTC. eletrodo	Rigidez do solo
<b>Endurecimento</b>	Composição	Resíduos	Estabilização
<b>Aquecimento Joule</b>	$f = I^2 R$ e condutividade do material	Geração de calor	Aumento da atividade química e atividade microbiana

Um dos objetivos iniciais dos geossintéticos foi a substituição de materiais naturais como areia e brita por materiais sintéticos para incentivar a proteção ambiental. Continuando com esse raciocínio de proteção ao meio ambiente, os geossintéticos eletrocinéticos estão se adequando para uma melhoria crescente da eficiência de energia e, conseqüentemente, da proteção ambiental. Por este motivo, eles estão sendo cada vez mais aceitos em diversas aplicações práticas. Exemplos:

- na indústria de mineração, o uso de materiais eletrocinético para a secagem de rejeitos produz recuperação da água e uma maior redução da liberação do carbono nas operações de mineração, preocupações que devem ser levadas em consideração porque estarão ajudando a cumprir o protocolo de Kyoto.

- um filtro prensa de correia eletrocinética tem um desempenho de secagem de resíduos sólidos maior do que por meio de centrífuga, mas usa apenas 1/3 da energia para esse tratamento equivalente. Similarmente, em aplicações em gramados para esportes, o uso de GCE melhora a tolerância da planta para condições sombreadas, o que requer um custo elétrico menor que 1/10 em comparação com a implantação de um sistema de iluminação artificial.

Pesquisas em aplicações com GCEs, juntamente com o desenvolvimento de novos materiais, estão sendo realizados em uma variedade de países, como mostra a Tabela 4.6. Em termos gerais, os GCEs desenvolvidos são aplicados em seis áreas de atuação conforme Tabela 4.7.

**Tabela 4.6** - Pesquisas em aplicações com GCEs e materiais em desenvolvimento (Jones *et al.*, 2008).

Países /Aplicações	Secagem	Resistência	Contenção	Limpeza	Esportes	Horticultura / Agricultura	Materiais em Desenvolvimento/f abricados
Austrália	X						
Canadá	X						
China	X	X					X
Filândia				X			
Alemanha	X						X
Cingapura	X	X					X
Africa do Sul	X						
Sri Lanka	X						
Suécia							X
Tailândia	X	X					
Reino Unido	X	X	X		X	X	X
USA	X	X					X

**Tabela 4.7** - Indústria, mercado e setores correntes da aplicação e GCE desenvolvidos ( Jones et al., 2008).

INDÚSTRIA	MERCADO	SETOR DO MERCADO	TIPO DO GCE
Água	Tratamento de esgoto	Maquinário de secagem	- Prensa de correia CGE - Prensa de chapa CGE
		Adubação	Sistemas ePD
	Tratamento de água	Secagem	Sacos de filtração CGE
		Secagem	Prensa de chapa CGE
		Consolidação	Sistemas ePVD
Alimento	Comidas e bebidas processadas	Secagem	- Prensa de chapa CGE - Sacos CGE
Mineração	Cobre	Estabilização	ePVDs
	Diamante	Secagem	Prensa de correia GCE
	Minério de ferro	Secagem	ePVDs
	Argila da China	Produto de secagem	Prensa de chapa CGE
	Carvão e resíduos de carvão	secagem	Prensa de correia GCE e vácuo
	rejeitos de lagoas de estabilização	secagem	ePVDs
	combate a liquefação	Estabilização	ePVDs
Engenharia Civil	Engenharia em solos	Secagem	- Sacos EKG - Prensa de correia GCE
	Engenharia de via navegável	Secagem de dragagem	Sacos EKG

		Estabilização de aterro	ePVDs e solo grampeado eletrocínético
	Ferrovias e manutenção de rodovias	Estabilização de aterro e taludes	ePVDs e solo grampeado eletrocínético
	Geral e construção de rodovias	Solo reforçado Consolidação do solo	RCGE ePVD
	Desenvolvimento de campo / recuperação de terra	Consolidação do solo Solidificação de resíduos	ePVD Dranagem GCE
	Manutenção de rodovias / secagem de resíduos	Solidificação de resíduos	Sacos EKG
	Resíduos nucleares	Solidificação de resíduos	Sacos EKG
<b>Esportes</b>	Construção	Futebol Golfe	Sistema ePD Sistema ePD e eMat
<b>Horticultura</b>	Manutenção	Futebol	Sistema ePD
<b>Engenharia Ambiental</b>	Descontaminação / desenvolvimento de campo	Meio ambiente	Sistema ePD

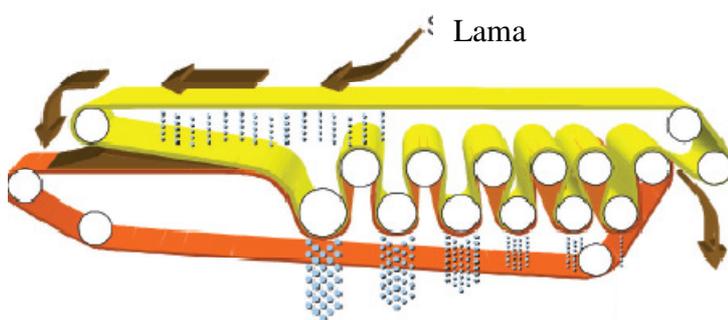
Destas pesquisas que aplicam GCEs, destacam-se os ensaios de campo de consolidação na argila marinha de Cingapura usando drenos eletrocínéticos, realizados por Chew *et al.* (2004). O objetivo do ensaio foi consolidar a argila e melhorar as propriedades geotécnicas. Antes de começar o estudo de campo, ensaios em laboratório foram executados em amostras de argilas remodeladas. O ensaio em campo consistiu de uma espessa camada de 18,7 m de aterro de areia sobre uma camada de 8 m de argila marinha mole que por sua vez estava sobre argila rija e rocha sedimentar. Foi reportado que o dreno eletrocínético confeccionado (ver item 4.2.1) produziu um notável aumento da resistência ao cisalhamento em um período de 13 dias. Uma resistência similar usando drenos convencionais levaria 130 dias para ocorrer. O consumo de energia foi de 1,8 kWh/m<sup>3</sup>.



**Figura 4.13** - GCE instalados com máquinas de instalação de drenos convencionais (Chew *et al.*, 2004).

Também deve-se citar o problema que os engenheiros de Siri Lanka têm que enfrentar devido a presença de turfa argilosa mole em algumas regiões, pois alguns quilômetros dos projetos de rodovias propostos estão sobre esses materiais de quase nenhuma resistência e umidade entre 300 – 400%. Sobrecarga usando drenos verticais pré-fabricados foi utilizado, mas, devido à resistência ao cisalhamento ser muito baixa, a carga do aterro teve que ser colocada em estágios, aumentando consideravelmente a duração do projeto. Em outras regiões, não é possível colocar nenhuma sobrecarga devido à natureza mole da turfa. Por isso, o uso da técnica eletrocinética foi ensaiada em laboratório por Kulathilaka *et al* (2004), citado por Jones *et al* (2008), para tentar resolver esse problema. A técnica se mostrou bastante viável, melhorando de forma efetiva a resistência ao cisalhamento não drenada, índice de compressão e coeficiente de compressibilidade do volume. Um fato notável desse ensaio é que eletrodos metálicos convencionais foram muito susceptíveis a corrosão, resolvendo o problema usando eletrodos CGE.

Outro caso interessante foi a simulação da secagem das minas de rejeitos, em laboratório, em Botswana<sup>(3)</sup> e Africa do Sul, utilizando a tecnologia da prensa de correia eletrocinética (Figura 4.14). Ensaio em escala de campo em Kimberley<sup>(4)</sup> têm confirmado os resultados dos ensaios de laboratório e demonstraram que maior economia pode ser obtida com relação ao custo de energia devido à disposição, redução em volume de resíduos, recuperação da água e uma significativa redução na emissão de carbono (CO<sub>2</sub>) nos processos de mineração (Figura 4.15), bem como a potencial eliminação da necessidade das barragens de rejeitos.



**Figura 4.14** - Conceito do modelo de prensa de correia. A correia superior é o anodo e a inferior é o catodo (Lamont-Black et al, 2006a).

<sup>(3)</sup> País da África Austral com divisa ao sul com a África do Sul.

<sup>(4)</sup> É uma cidade da África do Sul com exploração da mineração por ter um subsolo rico em diamantes e ouro.



**Figura 4.15** - Disposição do lodo de Kimberlite (a), secagem do rejeito (b) e recuperação da água (c). (Jones *et al.*, 2008)

Também o caso para tratamento de esgoto bruto que produz lama com teor de sólidos na ordem de 1-3%. A secagem desse material é um problema complexo para as companhias de água e esgoto de todos os países. A secagem convencional da lama de esgoto envolve o uso de prensas de correia ou centrifugas para reduzir a umidade e permitir a disposição. A disposição é melhor efetivada se a lama tiver o teor de sólido seco maior que 30%.

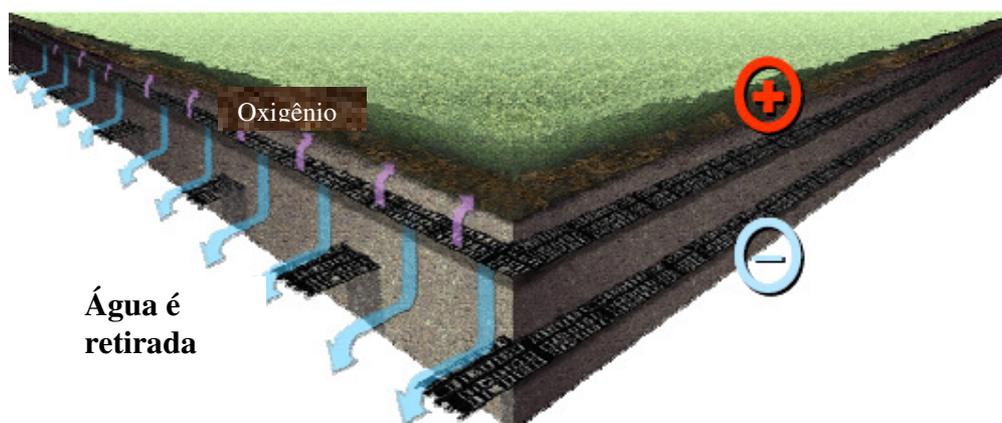
Em termos gerais, sistemas de tratamento convencionais com prensa de correia produz um bolo de lama com sólidos secos de 16 – 20% e centrífugas não ultrapassam 25% dos sólidos secos no material. Uma mudança na performance da secagem com prensa de correia tem sido alcançada pela combinação da tecnologia da prensa convencional com GCE para permitir a secagem eletro-osmótica em adição a secagem hidráulica convencional. Os resultados do ensaio feito em uma companhia de esgoto de Londres mostraram que, no tratamento convencional os sólidos secos eram de 19% (Figura 4.16a) e no tratamento com GCE os sólidos secos eram de 31% com uma redução de volume de 50 % (Figura 4.16b). Resultados similares foram obtidos na Alemanha. Assim, a economia usando a tecnologia GCE para secagem de lama de esgoto foi identificada por McLoughlin (2005), Lamont-Black et al (2006a), Jones et al.(2006) e Glendinning, et al. (2006).



**Figura 4.16** - Tratamento da lama do esgoto do modo convencional (a) e com GCE (b).

(Huntley *et al.* 2006).

Uma aplicação do GCE inusitada, mas que se tornou realidade, é sua pesquisa em gramados para prática de esportes. Os problemas mais comuns que afetam este tipo de superfície são: drenagem, aeração e concentração de nutrientes. Portanto, aplicação de GCE nos gramados esportivos pode melhorar significativamente o desempenho físico e as condições químicas da superfície da área esportiva (Lamont-Black *et al.* 2006b). O sistema do gramado com GCE está ilustrado na Figura 4.17, mostrando o modo de operação da polaridade normal com o ânodo no topo e cátodo no fundo. O tratamento será mais efetivo quando o oxigênio for liberado na zona da raiz ( $O_2$  no ânodo) e quando houver a carga máxima da poropressão (cátodo), o que vai melhorar a resistência ao cisalhamento na superfície. Logo, o esporte ocorrerá mesmo após período de chuvas pesadas. Aumento da umidade na zona próxima à superfície poderá ser alcançada com a reversão da polaridade.



**Figura 4.17** - Esquema do sistema CGE-grama (Lamont-Black *et al.* 2006b).

#### 4.5. APLICAÇÃO DO MÉTODO ELETROCINÉTICO NO BRASIL

A técnica eletrocínética na área de engenharia civil e ambiental tem se desenvolvido em todo o mundo, principalmente, no início deste século XXI, com a introdução de novos materiais voltados para esse campo de estudo. Como apresentado anteriormente, essa técnica está sendo pesquisada desde a descontaminação *in situ* de solos até a melhoria da tecnologia de solos reforçados.

No Brasil, o interesse pela técnica eletrocínética foi despertada a partir do ano 2000, justamente quando a técnica passou a ter um papel importante no grupo científico mundial. Ao contrário da tendência mundial, em que eletrocinese está sendo aplicada em várias áreas de atuação, no Brasil está concentrada na área de biorremediação de solos, como pode ser observado na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** - Aplicação do método eletrocínético no Brasil.

ÁREA	TÍTULO	REFERÊNCIA
<b>Biorremediação</b>	Injeção de nitrato de amônio em solo residual por eletrocinese e seu efeito sobre a sobrevivência da microbiota nativa	Mergulhão (2002)
<b>Biorremediação</b>	Transporte eletrocínético de gasolina e óleo através de um solo residual gnáissico e borra de petróleo da Bacia de Campos	Souza (2002)
<b>Biorremediação</b>	Condutividade eletro-osmótica e descontaminação de um solo de comportamento laterítico de Minas Gerais via fenômenos eletrocínéticos.	Damasceno (2003)
<b>Biorremediação</b>	Remediação eletrocínética de chumbo em resíduos industriais	Pedrazzoli (2004)
<b>Biorremediação</b>	Aplicação de técnica eletrocínética em laboratório a dois tipos de solos argilosos	Schmidt (2004)
<b>Biorremediação</b>	Remediação eletrocínética de chumbo e níquel em solos de Landfarming <sup>(5)</sup> de refinaria	Guaracho (2005)
<b>Biorremediação</b>	Controle de pH na técnica de biorremediação eletrocínética	Deotti (2005)
<b>Consolidação</b>	Aceleração da consolidação de solos argilosos com o uso de eletro-osmose	Nascimento (2005)
<b>Consolidação</b>	Consolidação de solos moles com o uso de célula eletro-osmótica	Feitoza (2007)
<b>Biorremediação</b>	Transporte eletrocínético de cromo em sedimentos da Baía de Guanabara	Portillo Miranda (2008)
<b>Biorremediação</b>	Condutividade eletro-osmótica e remediação de solos contaminados com cádmio	Velten (2008)
<b>Estabilização Química</b>	Uso da técnica eletrocínética para estabilização de um solo arenoso	Fonini(2008)

<sup>(5)</sup> Landfarming é um sistema para tratamento de solos contaminados, ou seja, tratamento biotecnológico que aproveita a população microbiana do solo para a degradação de poluentes orgânicos.

---

Portanto, as técnicas eletrocinéticas estão sendo bastante exploradas na área de biorremediação do solo. Tudo indica que apenas os autores Nascimento (2005) e Feitoza (2007), ambos na linha de pesquisa de eletro-osmose em solos argilosos do Distrito Federal, trabalharam com eletrocinese direcionada para a consolidação de solos argilosos brasileiros e Fonini (2008) na estabilização química em solos.

Fonini (2008) pretendeu melhorar a estabilidade do solo com a técnica eletrocinética associada à injeção de soluções químicas. Isso ocorreu, em pequena proporção, com a aplicação de um baixo gradiente elétrico através de eletrodos em um meio poroso inundados com soluções químicas de cloreto de cálcio com água carbonatada, cloreto de cálcio com bicarbonato de sódio e cloreto de cálcio com silicato de sódio. O autor afirmou que esta técnica associada a injeções químicas é complexa e difícil de prever devido ao número de variáveis que podem modificar o seu resultado final.

Em relação à consolidação de solos moles, Nascimento (2005) fez um trabalho de pesquisa que consistiu em ensaios em modelos físicos. A experiência foi feita com instalação de drenos verticais em duas caixas experimentais de escala intermediária (2,5 m de larg., 3,0 m de comp. e 1,0 m de altura) para tratamento simultâneo. Em uma das caixas, o solo mole foi tratado por meio do processo de eletro-osmose juntamente com sobrecarga e na outra caixa o tratamento foi feito convencionalmente, ou seja, sem o processo de eletro-osmose. O autor encontrou que o solo submetido ao processo eletro-osmótico recalçou 40 % a mais e estava 26 % mais resistente do que o solo que usou o processo convencional.

Feitoza (2007) usou uma célula eletro-osmótica para avaliar a capacidade do geossintético eletrocinético adaptado ( $EKG_{\text{adap}}$ ) e observar alguns parâmetros eletrocinéticos testados com várias diferenças de potencial elétrico e duas variações de carregamento. Foi constatada a redução do tempo de consolidação e o aumento da resistência não drenada do solo. É importante ressaltar que essa pesquisa de 2007 foi desenvolvida a partir da presente tese.

É preciso, portanto, conhecer os fenômenos eletrocinéticos e o comportamento dos solos para compreender dessa técnica que amplia a sua capacidade de aplicação de modo muito rápido, observando a experiência relatada sobre o assunto e executando ensaios experimentais.

## **5 - MATERIAIS E EQUIPAMENTOS**

Os fenômenos eletrocinéticos direcionados para aceleração da consolidação de solos moles da região tropical foram avaliados, inicialmente, por meio de ensaios em modelo físico de pequena escala - ensaio em laboratório (pequeno cilindro); posteriormente foram analisados em um modelo de maior escala - ensaios em campo (reservatórios experimentais). Essas experiências consistiram na instalação de drenos condutores elétricos em recipientes experimentais, contendo argila de sítios do Distrito Federal remodelados com consistência mole.

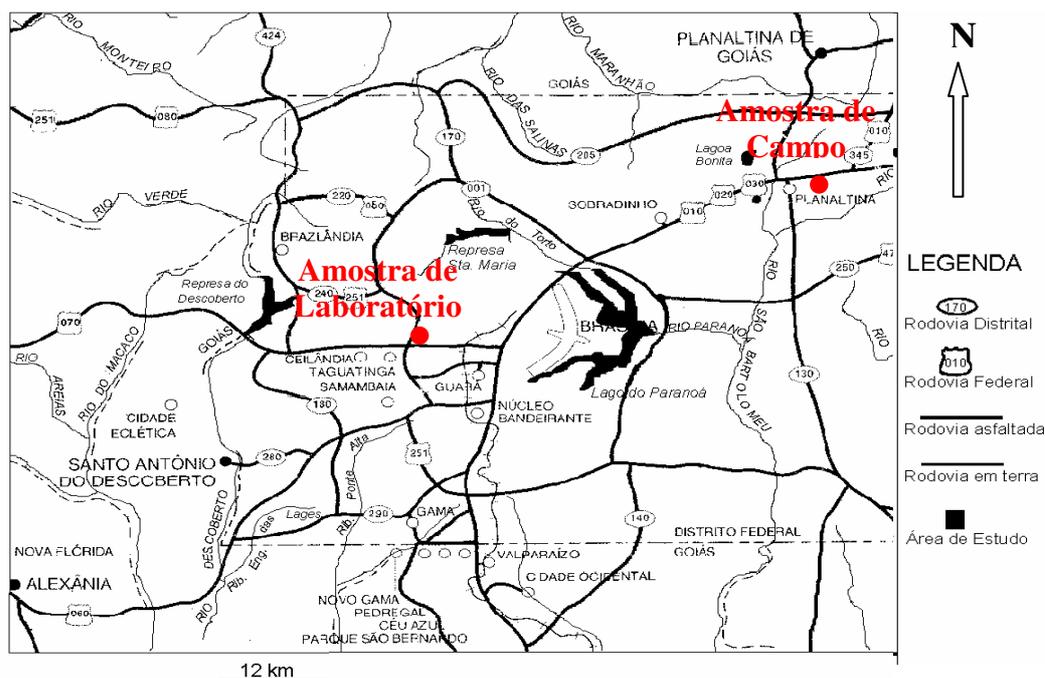
### **5.1. SOLOS DE GRANULOMETRIA FINA**

Os solos lateríticos da região do Distrito Federal representam muito bem os solos encontrados em todo Planalto Central Brasileiro, área nuclear do Cerrado (IBGE, 1993), bem como constitui a extensão do processo de laterização do solo brasileiro. Os materiais estudados tiveram como requisitos de escolha: solos com granulometria fina, pelo fato da consolidação ocorrer de forma mais lenta nesse tipo de material; matéria-prima disponível para doação e, por fim, ser próximo ao local a ser ensaiado.

Por ser um solo tropical, sabe-se que esse pode apresentar propriedades e comportamentos bastante variáveis, uma vez que seus parâmetros, além de dependerem de fatores tais como rocha mãe, dependem também das condições de intemperismo, como temperatura e umidade.

Assim, com a observação em campo, definiram-se características morfológicas (cor, textura, estrutura, consistência, etc) dos horizontes pedológicos. As características físicas, químicas e mineralógicas foram determinadas por meio de ensaios laboratoriais e as duas últimas serão descritas no capítulo de análise dos resultados.

A Figura 5.1 mostra a localização no mapa do Distrito Federal do ponto de coleta das amostras dos ensaios de laboratório e dos ensaios de campo.



**Figura 5.1** - Mapa de localização dos pontos de coleta dos solos estudados.

### 5.1.1. SOLOS DOS ENSAIOS DE LABORATÓRIO

O solo utilizado na primeira etapa dos ensaios de laboratório foi retirado de uma jazida do Jóquei Clube do Distrito Federal, mas conhecido como “Lixão da Estrutural” que tem uma área total de 200 hectares. Foi observado no campo que até aproximadamente 4 metros de profundidade, o perfil do solo estava estruturado em apenas um horizonte. Foram coletadas amostras entre as profundidades de 200 e 300 cm, denominando-as de amostras JC (Jóquei Clube). Salienta-se que essas amostras estavam a 1,5 Km de distância das células de lixo presentes no Jóquei Clube.

Visualmente, o perfil do solo é homogêneo, sem a presença de descontinuidades, possui cor vermelha, textura argilosa e pequenos poros (Figura 5.2), ou seja, sua descrição pedológica é Horizonte B do Latossolo Vermelho de Textura Argilosa, baseado na proposta de classificação de Cardoso (2002) e do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999).



**Figura 5.2** - Perfil do horizonte B do Latossolo Vermelho de textura argilosa.

O solo utilizado na segunda etapa dos ensaios de laboratório foi retirado de um depósito do bairro estrutural, cerca de 2 km do “Lixão da Estrutural”. Foram coletadas amostras entre as profundidades de 150 e 250 cm, denominando-as de amostras EST (Estrutural). O perfil desse solo é similar ao anterior, solo JC - homogêneo, e sua descrição pedológica também é Horizonte B do Latossolo Vermelho de Textura Argilosa.

Para ajudar a compreender o comportamento mecânico e hidráulico dos solos, executou-se a caracterização física das amostras de solo, ou seja, do solo natural retirado da jazida e do depósito. A Tabela 5.1 apresenta a caracterização física dos solos utilizados nos ensaios de laboratório com os métodos de ensaios executado obedecendo às normas brasileiras NBR 7181, NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 1984).

**Tabela 5.1** - Propriedades físicas dos solos usados nos ensaios de laboratório.

PROPRIEDADES	SOLO JC	SOLO EST
Pedregulho (%)	0,3	0
Areia (%)	31,3	13,9
Silte (%)	10,8	17,5
Argila (%)	57,6	68,6
Limite de Liquidez - $W_L$ (%)	37	52
Limite de Plasticidade - $W_P$ (%)	30	34
Índice de Plasticidade - IP (%)	7	18
Massa Especifica dos Grãos - $\rho_G$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,79	2,64

### 5.1.2. SOLO DOS ENSAIOS EM CAMPO

Os solos utilizados nos ensaios em campo estavam situados em áreas de empréstimo paralelas à rodovia BR-020, entre as cidades satélites de Sobradinho e Planaltina, relativamente próximos a Universidade de Brasília – Campus Planaltina, local onde foram construídos os reservatórios experimentais para execução dos ensaios.

O solo utilizado no primeiro ensaio em campo foi extraído junto à rodovia BR-020, após a segunda entrada da cidade satélite de Planaltina a 2,5 km da UnB - Campus Planaltina (Figura 5.3). Conseguiu-se 24 m<sup>3</sup> desse solo que foi levado por duas caçambas de 12 m<sup>3</sup> de capacidade cada. No segundo ensaio, o solo foi retirado de uma área na comunidade de Mestre D'armas a 4,1 km da UnB – Campus Planaltina (Figura 5.3), onde conseguiu-se 18 m<sup>3</sup> de solo dessa reserva, levados por 3 viagens de uma caçambas de 6 m<sup>3</sup>.



**Figura 5.3** - Distâncias das áreas de empréstimo até a UnB – Campus Planaltina.

(Google Earth, 2009)

Os perfis desses solos, até aproximadamente 3 metros de profundidade, também estavam estruturados em apenas um horizonte. Foram coletadas amostras entre as profundidades de 100 e 300 cm, denominando-as de solo BR (BR-020) (Figura 5.4) e solo MD (Mestre D'armas) (Figura 5.5).



**Figura 5.4** - Perfil do horizonte B próximo a BR-020.



**Figura 5.5** - Perfil do horizonte B na comunidade de Mestre D'armas.

Pode-se observar que este perfil é similar ao perfil do solo dos ensaios de laboratório, ou seja, o solo é homogêneo, sem a presença de descontinuidades, entretanto contendo um pouco mais de raízes. Por isso sua descrição pedológica também é Horizonte B do Latossolo Vermelho de Textura Argilosa.

A Tabela 5.2 apresenta a caracterização física dos solos utilizados nos ensaios de campo, com os métodos de ensaios executado obedecendo às normas brasileiras NBR 7181, NBR 6459 e NBR 7180 (ABNT, 1984).

**Tabela 5.2** - Propriedades físicas dos solos usados nos ensaios em campo.

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>Solo BR</b>	<b>Solo MD</b>
Pedregulho (%)	0,1	0,6
Areia (%)	34,3	28,8
Silte (%)	15,4	17,7
Argila (%)	50,2	52,9
Limite de Liquidez - $W_L$ (%)	42	50
Limite de Plasticidade - $W_P$ (%)	28	35
Índice de Plasticidade - IP (%)	14	15
Massa Específica dos Grãos - $\rho_G$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,71	2,77

## 5.2. SOBRECARGA

Pré-carregamento é uma técnica ainda utilizada para consolidar solo mole, porém esse processo isolado é muito lento. Geralmente, uma carga, tal como aterro granular, é colocada na superfície do terreno para aumentar a tensão confinante na massa do solo mole. Essa massa é consolidada quando a poropressão é reduzida no sistema devido à saída de água, que poderá ser acelerada com a ajuda de drenos.

Assim sendo, utilizou-se uma sobrecarga mecânica nos ensaios de laboratório para ajudar a acelerar a consolidação dos solos argilosos moles, detalhe que será apresentado em itens posteriores. No ensaio em campo, o material utilizado como sobrecarga para induzir a consolidação da argila foi uma areia de coloração rosa, por isso, comercialmente chamada de areia rosada. A granulometria dessa areia é mostrada na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** - Propriedades físicas da sobrecarga.

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>SOBRECARGA</b>
Pedregulho (%)	1,8
Areia (%)	58,2
Silte (%)	18
Argila (%)	22
Massa Específica dos Grãos - $\rho_G$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,83

### 5.3. GEOSINTÉTICOS UTILIZADOS

#### 5.3.1. GEOTÊXTIL

Uma manta de geotêxtil foi utilizada apenas nos ensaios de campo, inserido entre a camada de solo mole e a sobrecarga de areia, simplesmente com a função de separação entre essas duas camadas. Esse geotêxtil é classificado como sendo do tipo Bidim, não tecido, de poliéster, agulhado, com filamentos contínuos. A Tabela 5.4 descreve suas principais propriedades.

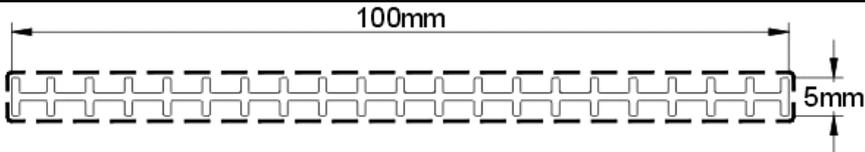
**Tabela 5.4** - Propriedades do geotêxtil utilizado entre o solo mole e a sobrecarga.

Parâmetro	Bidim
Gramatura	300 g/m <sup>2</sup>
Espessura	2,7 mm
K <sub>normal</sub>	0,22 cm/s
K <sub>longitudinal</sub>	0,6 cm/s
Permissividade	0,62 s <sup>-1</sup>
Transmissividade	0,02 cm <sup>2</sup> /s
Abertura de Filtração(O <sub>95</sub> )	0,114 mm

#### 5.3.2. DRENOS VERTICAIS

Os drenos verticais ou geodrenos foram utilizados tanto nos ensaios de laboratórios quanto nos ensaios de campo, para direcionar a água para fora do sistema. Dessa forma, estar-se-á acelerando o processo de consolidação da argila mole. São compostos de um núcleo plástico e um filtro de material têxtil na forma de bainha que envolve o núcleo em toda sua extensão. Utilizou-se o geodreno fabricado pela empresa ESTE Engenharia denominado de ESTEDRAIN. Esse geodreno apresenta as especificações técnicas nas Tabelas 5.5 e 5.6.

**Tabela 5.5** - Configuração do geodreno bem como os materiais técnicos utilizados.

CONFIGURAÇÃO/MATERIAIS	
CONFIGURAÇÃO	
MATERIAIS	Filtro: Geoespaçador; Manta Polipropileno: Polietileno

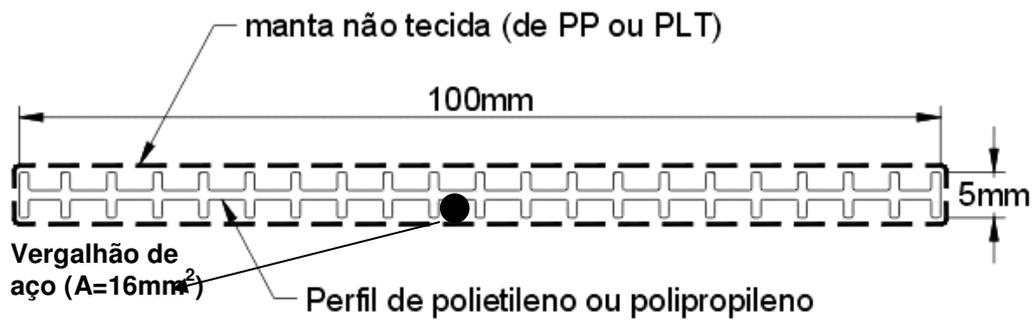
**Tabela 5.6** - Propriedades do Geodreno ESTEDRAIN.

<b>PROPRIEDADES FÍSICAS</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>VALOR MÉDIO</b>
PESO	g/m	120
LARGURA	mm	100
ESPESSURA	mm	5
GRAMATURA DO FILTRO	g/m <sup>2</sup>	100
<b>PROPRIEDADES HIDRÁULICAS E MECÂNICAS</b>		
CAPACIDADE DE DESCARGA (200KPa; $i_h = 0,5$ )	m <sup>3</sup> /s	70 x 10 <sup>-6</sup>
RESISTENCIA À TRAÇÃO	kN	3,0
ALONGAMENTO NA RUPTURA	%	70
ALONGAMENTO COM 0,5KN	%	6
ABERTURA DE FILTRAÇÃO (AOS)	10 <sup>-6</sup> m	<75

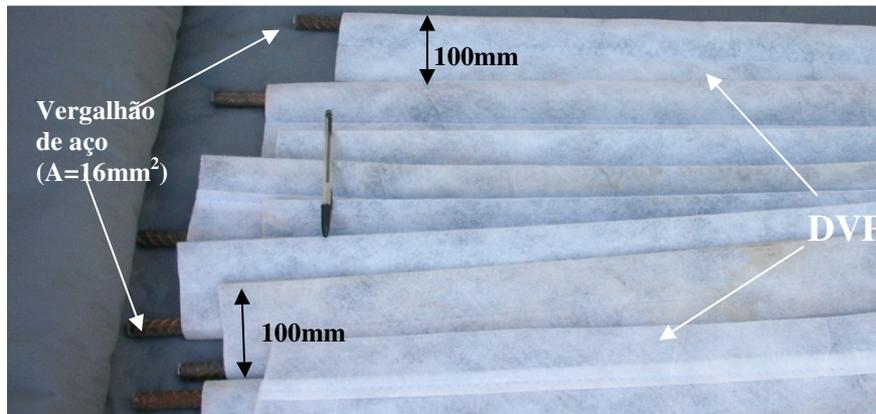
Portanto, foi utilizado o dreno vertical pré-fabricado (DVP) padrão, de 100 mm de largura e 5 mm de altura, nos ensaios convencionais realizados em campo. Esse é formado por um núcleo muito maleável de polietileno envolvido por um invólucro filtrante composto por manta de polipropileno que se adapta facilmente às deformações provenientes do adensamento da camada de solo mole; o núcleo, formando um sistema de canais verticais, conduz a água até a superfície do terreno. O invólucro filtrante, por sua vez, permite a livre passagem da água, retendo as partículas de solo.

Para os ensaios eletrocinéticos, utilizou-se o mesmo DVP padrão com um elemento condutor inserido ao centro, vergalhão de aço com 16 mm<sup>2</sup> de seção transversal, formando os geossintéticos condutores elétricos - GCEs ou drenos condutores elétricos (DCEs) (Figuras 5.6 e 5.7), que têm a função de acelerar e direcionar o fluxo horizontal para o geossintético específico. A seção desse material foi dimensionada a partir de ensaios de laboratório, resultando na barra comercial mais próxima, como será esclarecido no próximo capítulo.

Esse é o formato da primeira versão dos GCEs, apresentado por Jones *et al.* (1996) citado por Hall *et al.* (2008). Optou-se por esse tipo porque a última versão (polímeros realmente condutores) ainda se encontra em desenvolvimento, além de ter menor custo do que as versões posteriores e conseguir atender plenamente os objetivos desta tese.

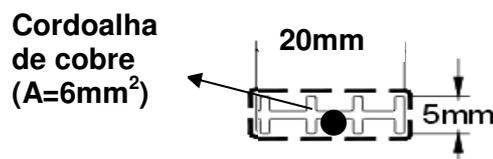


**Figura 5.6** - Vista superior do Dreno Condutor Elétrico (DCE).

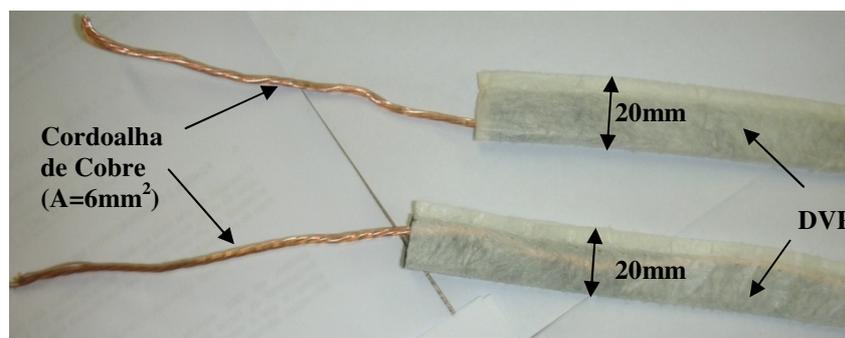


**Figura 5.7** - Vista Lateral do Dreno Condutor Elétrico (DCE).

Nos ensaios de laboratório, foram reduzidas as escalas em cinco vezes do dreno na direção horizontal que, por sua vez, gerou o DVP adaptado (Figuras 5.8 e 5.9), de 20 mm de largura e 5 mm de altura, para os ensaios convencionais. Para os ensaios eletro-osmóticos, utilizou-se o geodreno ESTEDRAIN e anexou-se a cordoalha de cobre de 6 mm<sup>2</sup> de área ou vergalhão de aço de 6,3 mm<sup>2</sup>, como material condutor (eletrodo).



**Figura 5.8** - Vista superior do Dreno Condutor Elétrico adaptado (DCE).



**Figura 5.9** - Vista lateral do Dreno Condutor Elétrico adaptado (DCE).

---

### 5.3.3. ESCOLHA DOS ELETRODOS

O uso do fenômeno eletrocinético requer eletrodos para geração do campo elétrico na massa de solo. Existem inúmeras citações de utilizações dos mais variados tipos de materiais para constituição de eletrodos voltados para ensaios eletrocinéticos. Pode-se citar alguns materiais como cobre, aço, alumínio, carbono, platina, carvão.

Jones e Pugh (2001) fizeram experiências com eletrodos convencionais metálicos e confirmaram uma menor eficiência elétrica dentro do sistema devido à oxidação no ânodo, o que resultou na degradação do eletrodo. É justamente por esse motivo que várias alternativas de materiais foram estudadas para obtenção da melhor eficiência eletrocinética possível.

Algumas alternativas foram investigadas por Lo *et al.* (1991a). Dentre elas, o uso do carvão como material do eletrodo. O perigo desse tipo de material, segundo Lo *et al.* (1991a), é a geração de calor durante a eletro-osmose junto com a geração de oxigênio por causa da eletrólise no ânodo. Outros materiais como aço e alumínio foram também estudados, persistindo o problema de corrosão no eletrodo ânodo. Metais como platina e prata foram cogitados, mas são caros e impraticáveis. Cobre foi então o material escolhido por Lo *et al.* (1991a), por causa da boa condutividade elétrica do material, e por Chew *et al.* (2004), que afirmaram que o cobre favoreceu o processo de cinética de elétrons em seus ensaios.

Mohomedelhassan e Shang (2003, 2001) usaram em seu trabalho eletrodos de grafite e reportaram que a perda de voltagem na posição do ânodo foi bem maior com esse tipo de eletrodo comparado ao eletrodo de cobre ou aço.

John *et al.* (2008) recomendaram que, dentre as várias opções de material corrosível, deve-se incluir o aço e alumínio. Na escolha do alumínio, esse deverá ajudar a melhorar  $K_e$  mais do que o aço por causa da densidade de carga ao redor do pequeno íon  $Al^{3+}$  que será maior do que ao redor do íon mais largo, mas de menor valência do íon  $Fe^{2+}$ . Além disso,  $Al^{3+}$  trocará com outros íons como  $Ca^{2+}$  de materiais como argila, resultando no endurecimento eletroquímico da argila. Entretanto, a desvantagem de usar alumínio é que este tem uma densidade muito mais baixa do que o aço, conseqüentemente, o consumo será bem maior.

---

Mesmo os eletrodos ditos inertes (grafite, platina, titânio, aço inox etc) sofreram o processo de deterioração com o tempo (Acar e Alshawabkeh,1996; Deotti, 2005; Schimidt, 2004; Fonini, 2008). No entanto, nota-se que o eletrodo não inerte mais utilizado nas pesquisas eletro-osmóticas é o cobre (Karunaratne *et al.*, 2004; Su *et al.*, 2004; Nettleton *et al.*,1998)

Desse modo, pensou-se em utilizar cobre, aço e carbono como materiais dos eletrodos nos ensaios de laboratório e de campo nesta pesquisa. No entanto, descartou-se a utilização do carbono por ser impraticável, tecnicamente e financeiramente em campo, e resolveu-se utilizar apenas o cobre e o aço, como observado no item anterior. O cobre por ser um dos materiais condutores mais efetivos em outros estudos realizados. O aço por ser um material alternativo em termos de custo para o sucesso da aplicação da técnica eletrocinética.

Assim, esses dois tipos de materiais condutores atendem as considerações descritas por Alshawabkeh *et al.* (1999) com relação a escolha dos materiais dos eletrodos, as quais são: (i) propriedades de condução elétrica, (ii) disponibilidade do material, (iii) facilidade de fabricação da forma requerida para o processo e (iv) despesas de fabricação e instalação.

A escolha do diâmetro dos eletrodos partiu do fato de encontrar o vergalhão de aço comercial mais fino possível (6,3 mm<sup>2</sup>), encontrando-se uma cordoalha de cobre com diâmetro similar (6 mm<sup>2</sup>) para possibilitar a comparação.

#### **5.4. FONTES GERADORAS DE ENERGIA**

Os componentes empregados em circuitos elétricos são classificados como ativos ou passivos. A distinção entre essas duas classes depende, essencialmente, se fornecem ou absorvem energia. Um componente ativo é capaz de gerar energia e um passivo não pode gerar energia. Componentes ativos típicos são baterias, geradores e modelos de transistores e os componentes passivos comuns são resistores, capacitores e indutores.

Entre os componentes ativos, destacam-se a fonte de tensão independente e a fonte de corrente independente. A fonte de tensão independente é um componente de dois terminais que mantém uma tensão específica entre seus terminais independentemente da corrente através dele, ou seja, não se leva em conta a resistência do meio, pois a tensão aplicada será constante. A fonte de corrente independente é um componente de dois terminais que mantém uma corrente específica independentemente da tensão sobre seus terminais, ou seja, está fixa à corrente e será aplicada a tensão necessária para fornecer aquela intensidade de corrente.

---

Sabe-se que a energia é uma força que rege o processo eletrocinético, por isso, foi utilizado nos ensaios de laboratório uma fonte geradora de energia (componentes ativos) com tensão independente (tensão fixa) e corrente independente (tensão variável) para o tipo de corrente contínua.

Essa fonte é ideal para fins científicos, pois é regulável tanto na corrente (0 – 10A) quanto na voltagem (0 – 30V), como também é estabilizada, ou seja, determina-se uma corrente ou uma tensão sempre fixa, e a fonte ajusta-se automaticamente para manter um componente (tensão ou corrente) sempre estável. As medidas de voltagem e amperagem do circuito são lidas na própria fonte. Esse tipo de fonte é projetada para fornecer energia de forma contínua durante alguns dias. A Figura 5.10 mostra a fonte de energia de modelo EMG 18134 utilizada nos ensaios de laboratório.



**Figura 5.10** - Fonte de energia tipo regulável e estabilizada.

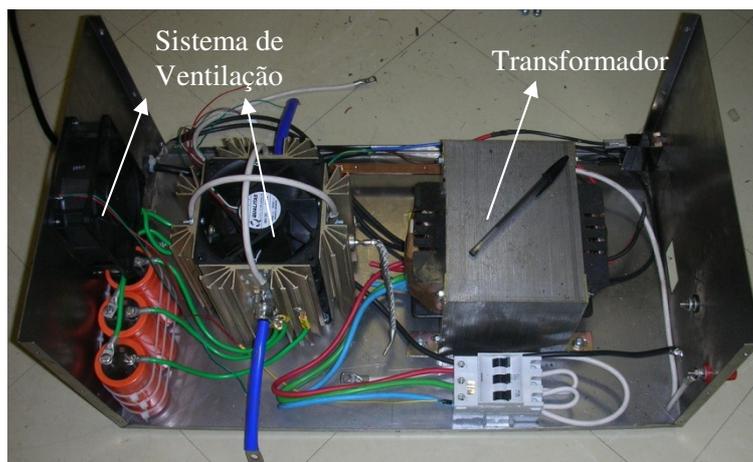
A capacidade da fonte (até 30V e até 10A) foi classificada como ideal para a varredura das voltagens nessa pesquisa, pois ocorreram ensaios prévios em modelo de escala reduzida na dissertação de mestrado de Nascimento (2005) que comprovaram que a voltagem e amperagem nos solos tropicais moles do Distrito Federal com as mesmas características físicas e químicas estavam nessa ordem numérica.

A fonte utilizada nos ensaio de campo foi dimensionada a partir dos resultados dos ensaios de laboratório, detalhe que será explorado no próximo capítulo. Por uma questão de custo elevado, não foi possível utilizar esse tipo de fonte, regulável e estabilizada, também nos ensaios de campo.

---

Por esse motivo, desenvolveu-se no Departamento de Engenharia Elétrica da UnB uma fonte de dimensões 35 x 25 x 60 cm (L x H x C). Essa é uma fonte de alta tensão e amperagem, incomum no comércio, e por isso tem alto grau de dificuldade de dimensionamento elétrico. Não foi contemplada com o ajuste fino de regulagem de voltagem e amperagem, mas tem disponível três voltagens fixas (12, 24 e 36V) e uma capacidade de corrente máxima de 80 A (Figura 5.11). A mesma foi projetada para ter uma variação mínima nas leituras da tensão e corrente. A primeira versão da fonte era composta por um voltímetro de painel digital modelo PM438 de três dígitos e meio, a qual foi calibrada para fornecer a corrente diretamente (Figura 5.12).

Por problemas de ordem técnica, esse painel teve que ser substituído por um multímetro digital, tornando-se a segunda versão da fonte de alimentação (Figura 5.13). Essa fonte teve componentes de grande porte como diodos<sup>(6)</sup>, transformador para 80 A, disjuntor trifásico Siemens de 100 A, sistema de ventilação (Figura 5.11). Esses componentes deram condições para fornecer energia de forma contínua durante alguns dias.



**Figura 5.11** - Fonte projetada para ensaios de campo (1º Versão).



**Figura 5.12** - Painel de voltímetro digital de dois dígitos e meio.

---

<sup>(6)</sup> Diodo - tipo mais simples de componente eletrônico semicondutor, usado como retificador de corrente elétrica.



Figura 5.13 - Segunda versão da fonte de alimentação.

## 5.5. CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA

Montou-se um equipamento em laboratório visando conhecer a capacidade do produto formado (DCE) direcionado para consolidação de solos com baixa condutividade hidráulica. Esse equipamento, denominado de célula eletro-osmótica, foi projetado para estudar e otimizar alguns parâmetros utilizados no processo eletrocinético para consolidação de argilas.

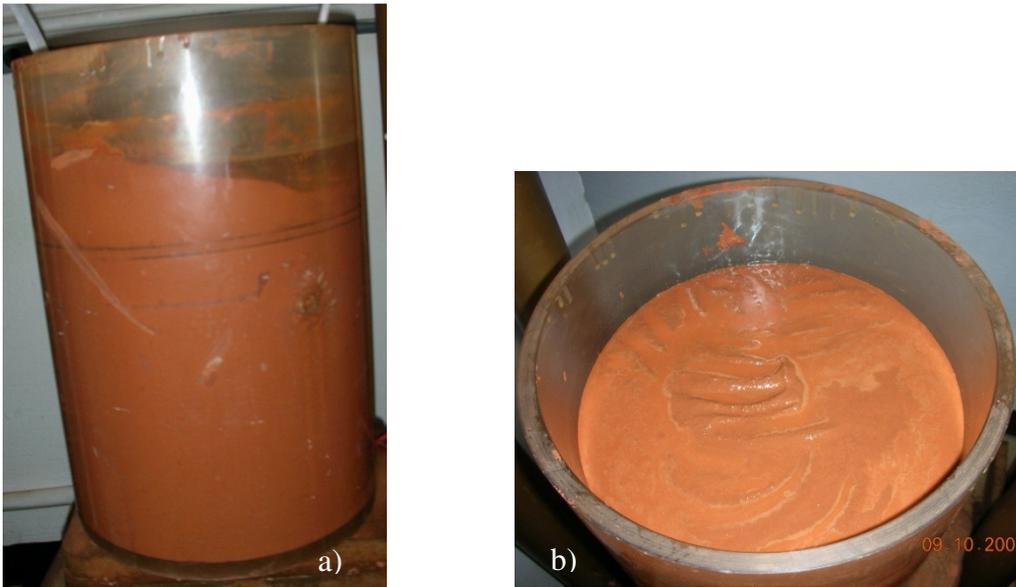
Com essa célula, avaliaram-se os dois tipos de eletrodos (cobre e aço) que foram utilizados no processo; estudou-se que limite de intensidade de corrente movimentava os íons da água livre resultando em eficiência eletro-osmótica; determinou-se o quanto a concentração de sal na água e os valores de carga poderão acelerar o processo de consolidação.

Esse equipamento é similar a uma célula usada por Abiera *et al.* (1998) na consolidação da argila reconstituída de Ariake - Japão e Dinoy (1999) com argila reconstituída de Bangkok – Tailândia, ambos citados por Bergado *et al.* (2000).

A célula eletro-osmótica adaptada no Laboratório de Geotecnia da UnB é constituída dos seguintes componentes:

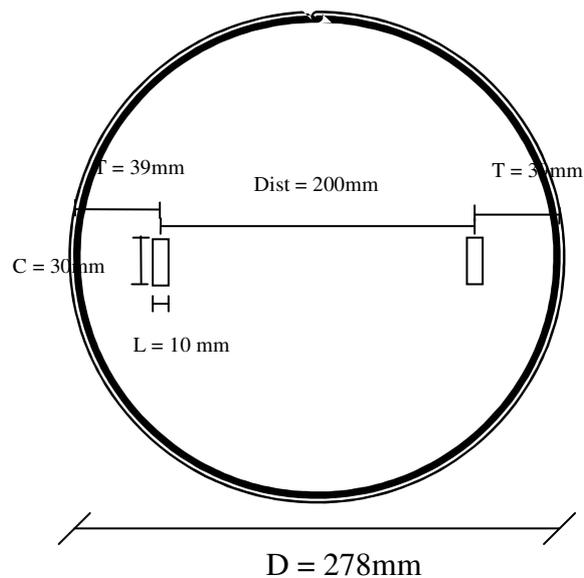
- ✓ Célula cilíndrica e tampa de acrílico

A célula cilíndrica foi fabricada com material acrílico de 12 mm de espessura com as medidas de 280 mm de diâmetro interno e 450 mm de altura. Esse recipiente acomodava o solo mole a ser ensaiado. O acrílico foi escolhido por ser um material inerte que não interfere nos resultados que dependem do circuito elétrico contido no ensaio.



**Figura 5.14** - Célula cilíndrica com solo mole no seu interior. Vista lateral (a) e vista superior (b).

O cilindro contém uma tampa, também de acrílico, de 15 mm de espessura e 278 mm de diâmetro, com dois furos de 10x30 mm e 200 mm de distância entre os centros (Figura 5.15), para facilitar a instalação dos DVPs e DCEs. Portanto, houve a mesma redução de escala do campo para o laboratório, da espessura dos drenos e da distância entre os mesmos, da ordem de cinco vezes. Isso porque os drenos são distanciados em campo, geralmente, por 1000 mm. Na lateral da tampa foram feitas duas ranhuras para o encaixe de dois o-rings com a finalidade de garantir a vedação.



**Figura 5.15** - Vista superior da tampa da Célula Eletro-osmótica.

---

✓ Sistema de carga

A carga foi aplicada, inicialmente, por meio de um macaco hidráulico com capacidade para 2 toneladas. Devido a um problema relacionado à perda de carga com o início da consolidação do solo, substituiu-se o macaco hidráulico por uma câmara de compressão (Croqui no anexo1). Em resumo, essa câmara era composta por uma bolsa interna que recebia ar comprimido até o total preenchimento, por uma pressão predeterminada, que empurra um pistão até que o mesmo encontre o aparato de reação ou até o seu máximo deslocamento vertical. O sistema de ar comprimido era composto por compressor, elemento filtrante, manômetro de até 1100 kPa e duas saídas reguláveis de 6,35 mm do tipo macho. A Figura 5.16 mostra o macaco hidráulico e a câmara de ar ligado ao sistema de ar comprimido.



**Figura 5.16** - Sistemas de carga aplicada no ensaio de laboratório: macaco hidráulico e câmara de compressão ligada ao sistema de ar comprimido.

✓ Célula de carga

A carga aplicada foi medida por meio da célula de carga de compressão TF200 (croqui no Anexo 2) de 1 tonelada (Figura 5.17). O monitoramento da carga foi feito pelo indicador digital modelo IT 100 da marca ReS (croqui no anexo 3) que foi acoplado à célula de carga (Figura 5.18).

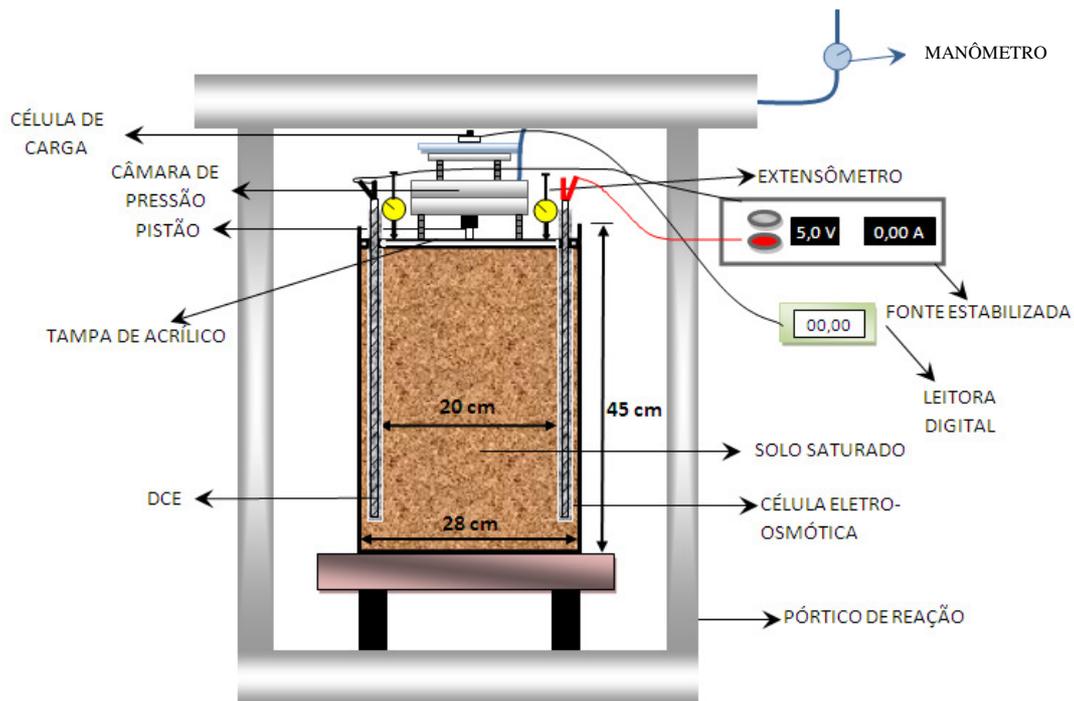


**Figura 5.17** - Célula de carga.



**Figura 5.18** - Indicador digital da célula de carga.

Fazendo-se a composição do conjunto da célula eletro-osmótica, a aplicação da carga vertical no topo da tampa foi feita utilizando, inicialmente, um macaco hidráulico, posteriormente, uma câmara de compressão. Um pórtico de reação revertia à carga para a célula de carga. A Figura 5.19 mostra a representação esquemática da célula eletro-osmótica.



**Figura 5.19** - Representação esquemática da Célula Eletro-osmótica.

O monitoramento da carga foi feito pelo indicador digital que foi acoplado a uma célula de carga localizada entre a câmara de pressão e o pórtico de reação. Os DCEs instalados foram conectados à fonte de energia a qual gerava para um eletrodo carga positiva (fio vermelho) e, para o outro, carga negativa (fio preto) como mostra a Figura 5.20.



**Figura 5.20** - Ensaio Eletro-osmótico.

Visto que muitas publicações presentes na bibliografia relacionada à eletro-osmose estudou o processo de consolidação utilizando equipamentos de laboratório (Lo *et al.*, 1991b; Finno *et al.*, 1996; Bergado *et al.*, 2000; Hamir *et al.*, 2001; Jones *et al.*, 2002.), pensou-se em desenvolver um trabalho com equipamentos de maior escala, para aplicar os resultados relevantes dos ensaios de laboratório e estar mais aproximado de uma escala real. Isso foi possível com a execução de ensaios em reservatórios experimentais.

## **5.6. RESERVATÓRIOS EXPERIMENTAIS**

Resolveu-se aplicar os resultados da otimização dos ensaios eletrocinéticos em ensaios de maior escala, para tanto, utilizaram-se dois reservatórios experimentais, em que um usava os ensaios eletrocinéticos e o outro o ensaio padrão com PVD, simultaneamente. Por isso a necessidade de pelo menos dois reservatórios experimentais.

Os reservatórios têm como material fibra de carbono, material que não interfere no circuito elétrico distribuído no solo, tendo o formato retangular com as seguintes dimensões: 2,0 m x 4,0 m x 1,15 m (larg. x comp. x prof.), perfazendo um volume útil de 9,2 m<sup>3</sup>. Esses eram compostos de três furos de 50 mm de diâmetro, sendo que dois estão localizados na parte superior e um na parte inferior dos reservatórios. Cada reservatório estava interligado, por meio dos furos localizados na parte superior, a dois baldes separados com 60 litros de volume, os quais tinham como finalidade receber a água drenada.

---

Os reservatórios experimentais foram posicionados lado a lado próximos a um depósito especialmente construído para armazenamento dos materiais e equipamentos como: fonte alimentadora, geodreno, eletrodos, geotêxtil, dentre outros, e, principalmente, para fornecimento de um ponto de energia para alimentação da fonte geradora, ver Figura 5.21.



**Figura 5.21** - Reservatórios experimentais próximos a um pequeno depósito.

## **6 – METODOLOGIA**

Tanto os drenos condutores elétricos (DCEs), quanto os não condutores (DVPs), foram investigados, em modelos físicos em diferentes escalas, na consolidação da argila reconstituída com consistência mole. Inicialmente foram realizados ensaios em laboratório (célula eletro-osmótica) com a finalidade de otimizar os principais parâmetros eletro-osmóticos (voltagem, corrente) em diferentes meios de concentrações eletrolíticas (0; 16,5 e 33 g/L) e outros indicadores como tipo de eletrodo e carga concentrada, para em seguida aplicar em um modelo de maior escala (reservatórios experimentais). Um ensaio teste foi inserido entre os ensaios principais para comprovação dos resultados encontrados em laboratório e sua devida aplicação no ensaio em campo.

A seguir serão descritas as etapas do trabalho e os procedimentos criados e empregados ao longo da pesquisa. Procedimentos foram criados devido ao fato da aplicação da eletro-osmose voltada para consolidação de solo ser praticamente inédita no Brasil, com pouca experiência relatada na literatura. É muito importante salientar que essa pesquisa dispôs de limitados recursos financeiros, obrigando a se escolherem prioridades de investimentos para seu desenvolvimento, justificando dessa forma, as adaptações e o seu modo de execução.

Para um maior entendimento do plano de aplicação dessa pesquisa, dividiu-se a metodologia em três etapas, em que uma aprimorava o desenvolvimento da outra: ensaio em laboratório (pequena escala), ensaio teste (escala intermediária) e ensaio em campo (grande escala).

### **6.1. ENSAIO EM LABORATÓRIO – PEQUENA ESCALA**

Os ensaios eletro-osmóticos e sem o uso da eletricidade, bem como os ensaios físicos das amostras foram realizados no laboratório de Geotecnia da Pós-Graduação da UnB. Esses ensaios foram executados em uma célula eletro-osmótica desenvolvida especialmente para consolidação do solo. Esse equipamento foi concebido para trabalhar com variáveis controladas e mensuráveis, onde detalhes relevantes do processo foram extraídos e aplicados em outros ensaios realizados em campo.

---

Os ensaios de laboratório foram divididos em duas etapas. A primeira utilizou a amostra JC fixando-se uma variável e variando-se outras três, como será visto no item planejamento dos ensaios. Na segunda etapa fez-se o contrário, variou-se a variável anteriormente fixa e fixaram-se as outras três, utilizando a amostra EST.

### 6.1.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO

Os solos retirados da jazida do Jockey Clube, amostra JC, e do depósito da estrutural, amostra EST, foram peneirados na # 10 (abertura de 2 mm) para a retirada de pedregulhos e outros materiais indesejáveis e em seguida foram colocados para secagem ao ar. Na primeira etapa, pesaram-se 24 kg da amostra JC, já peneirada e seca, e colocou-se em uma bandeja para homogeneização com água (Figura 6.1a). Na segunda etapa, pesaram-se 30 kg da amostra EST nas mesmas condições e fez-se a homogeneização.

O solo do ensaio pode ser classificado de consistência mole por ter a umidade mantida sempre acima do limite de liquidez ( $W_L$ ) do mesmo. Dessa forma, para a primeira etapa adicionaram-se 11,8 L de água ao solo contido na bandeja e homogeneizou-se até se obter a consistência desejada (Figura 6.1b) e para a segunda etapa foram adicionados 16,7 L. Terminada a homogeneização, retirava-se uma amostra do solo mole para comprovar se a umidade estava realmente acima do limite de liquidez (Figura 6.1c). Vencidas as etapas, convertia-se aos poucos a amostra homogeneizada para a célula cilíndrica, preocupando-se em retirar bolhas de ar oclusas no interior do solo homogeneizado (Figura 6.1d).

A quantidade de água adicionada para homogeneização do solo foi calculada utilizando-se a Equação 6.1 para obtenção de umidade, pois tentou-se manter a mesma umidade inicial para todos os ensaios de sua respectiva etapa. Logo, a umidade inicial foi calculada para um valor 15% acima do limite de liquidez, em torno de 52% no solo JC da primeira etapa. Para a segunda etapa, apenas que tivesse acima do limite de liquidez, mas com percentagem próxima a umidade inicial da primeira etapa, em torno de 58% no solo EST. Destaca-se que, nos dois casos, a umidade estava acima do limite de liquidez das amostras.

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad \text{Equação (6.1)}$$

Onde:  $w$  é a umidade em porcentagem (acima do  $W_L$ ).

$W_w$  é o peso da água no solo e  $W_s$  é o peso do solo seco.



**Figura 6.1** - Homogeneização da amostra JC com umidade acima do limite de liquidez.

Salienta-se que, antes da conversão do solo homogeneizado, passava-se silicone líquido na parede da célula cilíndrica (Figura 6.1d), com o objetivo de diminuir o atrito no momento do deslocamento da tampa. Colocava-se o solo homogeneizado na célula e deixava-se repousar por 24 horas para ocorrer a consolidação do solo por peso próprio.

A altura média do solo, na célula, antes de aplicação de carga foi 33 cm. Foi escolhida essa altura, pois, abaixo dessa cota houve problemas para medir a resistência ao cisalhamento no término do ensaio com o equipamento do ensaio de palheta de laboratório, pois a alavanca do equipamento não conseguia girar por ser interrompida pela parede da célula. Acima dessa cota poderia haver problemas com água drenada da amostra, ou seja, a água poderia ser derramada da célula após a aplicação da carga na tampa.

Nascimento (2005) aumentou a eficiência do processo de eletro-osmose, em seus ensaios, quando elevou a condutividade elétrica do meio ao adicionar sal à água e ao homogeneizar a mistura com o solo. Portanto, para este ensaio também foi modificado o conteúdo eletrolítico no meio, adicionando-se sal de cozinha à água, tornando-se a concentração próxima a da água do mar (33 g/L), a qual pode ser considerada uma concentração ao extremo em termos de salinidade. E também para simular a concentração de uma água salobra (16,5 g/L), que será uma concentração intermediária, ou seja, entre a máxima e a mínima salinidade (0 g/L).

---

Essas modificações de concentrações do eletrólito foram importantes para entender o comportamento dos parâmetros eletro-osmóticos em solo tropical com diferentes situações físicas e químicas. De modo que poderá se aplicar a tecnologia, em solos tropicais com baixa concentração eletrolítica (0 g/L), encontrados em algumas regiões do cerrado brasileiro; com alta concentração eletrolítica (33 g/L), em solos de regiões costeiras; e com concentração eletrolítica intermediária (16,5 g/L), em regiões de mangue e em algumas partes do nordeste brasileiro, onde predomina lençol freático com considerável teor de sal. Fez-se a saturação do solo com essas simulações da água do mar e da água salobra utilizando o mesmo procedimento de homogeneização já exposto.

### 6.1.2. ENSAIO NA CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA

Após a preparação do solo e inserção da massa na célula cilíndrica, colocava-se a tampa de acrílico sobre o solo e a nivelava para a obtenção de uma descida uniforme. Visto que a eletro-osmose é o processo pelo qual a água livre, geralmente, move-se do ânodo ao cátodo sob aplicação de uma corrente direta, instalaram-se dois drenos condutores elétricos adaptados (DCEs) na massa de solo saturado (com baixa, média e alta concentração eletrolítica) com 20 cm de distância entre eles. Esses DCEs eram conectados à fonte de energia para geração de carga positiva e carga negativa.



**Figura 6.2** - Célula eletro-osmótica com tampa acrílica e DCEs inseridos.

A princípio, assentava-se o macaco hidráulico sobre a tampa acrílica, que, por sua vez, estava sobre o solo homogeneizado. Esse macaco era devidamente centralizado para garantir que a carga fosse simetricamente distribuída. Alavancava-se o macaco até o encontro do pistão com o pórtico o qual gerava uma reação de igual magnitude para o macaco, conseqüentemente,

---

para tampa acrílica que empurrava o solo por ser móvel. Esse mecanismo era simplesmente regido pela 3ª lei de Newton, o princípio da ação e reação. Entre o pistão e o pórtico de reação encontrava-se a célula de carga para confirmar a carga que estava sendo aplicada ao processo.

Tentou-se manter a carga sempre constante, mas, com o processo de adensamento do solo, a tampa deslocava-se para baixo ocorrendo perda de pressão. A forma imediata de impedir que tal redução ocorresse era colocar manualmente a carga pré-determinada. Salienta-se que esse cuidado manual era recorrente no início do ensaio, quando ocorriam os maiores recalques. Essa falha foi corrigida transformando o processo manual em um mecânico, por meio da substituição do macaco hidráulico pela câmara de compressão acoplada ao sistema de ar comprimido.

Quando iniciava-se o recalque, a tampa começava a ser deslocada e com isso ocorria a perda de pressão, que imediatamente era repostada pela injeção de ar comprimido no interior da câmara de pressão. Monitoravam-se os recalques com dois extensômetros analógicos apoiados verticalmente na tampa acrílica.



**Figura 6.3** - Sistema de carregamento no solo, macaco hidráulico (a), câmara de compressão (b), e extensômetros para medição do recalque.

Seguia-se o mesmo procedimento para todos os testes com o intuito de manter uma padronização nos ensaios e, dessa forma, ter um mínimo de diferença na comparação entre os mesmos. A válvula de ar comprimido foi aberta de forma gradual, a cada dois minutos, até que ao final de 10 minutos o manômetro atingia a pressão desejada (50 kPa ou 100 kPa). Somente a partir desse tempo a fonte era ligada, começando-se a fazer as leituras de voltagem, corrente e recalque.

---

### 6.1.3. RECALQUE NA AMOSTRA

Inicialmente, fazia-se a leitura do recalque a cada 5 minutos devido o mesmo ocorrer com maior intensidade no momento inicial. Aumentou-se o intervalo para 30 minutos durante as duas primeiras horas e em seguida passou-se a fazer a leitura a cada hora por causa da diminuição da taxa de recalque. O ensaio apenas era finalizado com a estabilização dos recalques do solo, o que era verificado quando as leituras na escala dos extensômetros não variavam mais, ou quando o recalque representado por tal variação era desprezível em relação ao recalque total da amostra. É importante ressaltar que as medidas não foram feitas a noite.

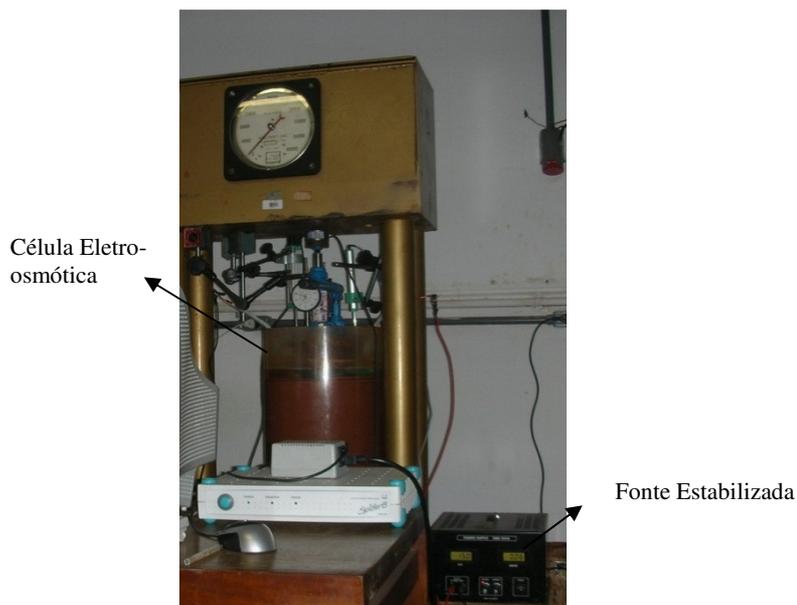
Entretanto, com a tentativa de deixar os ensaios mais informatizados, monitorou-se o recalque de um ensaio com dois LVDTs e dois extensômetros (Figura 6.4). Uma queda de energia na madrugada, interferência que faz parte do cotidiano do prédio SG-12, fez perderem-se as leituras realizadas com o LVDT; restando apenas as leituras dos extensômetros que estavam em conformidade com as leituras digitais. Esse fato fez com que o monitoramento do recalque continuasse a ser feito com extensômetros analógicos.



**Figura 6.4** - Monitoramento do recalque com sistema de aquisição de dados - LVDT.

### 6.1.4. VARIÁVEIS ELETRO-OSMÓTICAS

Nos ensaios eletro-osmóticos, a diferença de potencial aplicada e a corrente que atravessava o solo eram monitorados em um *display* presente na fonte estabilizada, como mostrado no capítulo de materiais e equipamentos. Essas leituras eram feitas no mesmo instante da leitura de recalque, ou seja, a cada 5 minutos no início do ensaio, a cada 30 minutos durante as duas primeiras horas e depois a cada hora no decorrer do ensaio.



**Figura 6.5** – Fonte estabilizada conectada à célula eletro-osmótica.

### **6.1.5. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO**

A resistência não drenada da argila foi determinada antes e após cada ensaio de consolidação por meio do ensaio de palheta de laboratório (Figura 6.6), para se avaliar o aumento da resistência não drenada com a aplicação das técnicas eletro-osmótica e convencional. Esse ensaio consistiu de uma palheta de seção retangular de 15 mm de diâmetro e 30 mm de altura, inserida no solo, e submetida a um torque capaz de cisalhar este solo por rotação. O ensaio seguiu a Norma ASTM D4648-00, no qual gira-se a palheta lentamente por meio de um dispositivo de rotação (60 a 90°/min) até o cisalhamento da amostra (torque máximo).

Destaca-se que, para os ensaios de resistência realizados antes da consolidação, colocava-se uma parte da amostra homogeneizada em um recipiente de plástico de 20 cm de altura e 25 cm de diâmetro que era apoiado dentro do aparelho utilizado no ensaio de palheta. Nesse momento, o solo estava com a capacidade de carga muito pequena e ao colocar o aparelho do ensaio de palheta dentro da célula cilíndrica o mesmo não tinha sustentabilidade, chegando até a afundar. Já para as medidas de resistência após os ensaios de consolidação, o aparelho pôde ser colocado dentro da célula porque o solo já estava com uma resistência considerável para tal ação. Os ensaios de palhetas foram feitos em posições aleatórias, com três repetições em uma única amostra.



**Figura 6.6** - Ensaio de resistência ao cisalhamento antes e após consolidação do solo.

#### **6.1.6. RESUMO DO ENSAIO ELETRO-OSMÓTICO**

Traçou-se uma metodologia dos ensaios para uniformização dos resultados. Mas, como toda pesquisa experimental, até chegar à otimização dos procedimentos, esbarrou-se em alguns problemas que dificultaram a execução dos ensaios. Desde o melhor diâmetro da tampa e da borracha para vedação até o vazamento do ar comprimido pela câmara de compressão. Foram dificuldades na umidade do solo após a homogeneização que estava apenas um pouco acima do limite de liquidez e com o período de seca predominante no DF, essa foi rapidamente diminuída; a altura ideal da amostra de solo que não dificultasse a leitura nos extensômetros e o ensaio de palheta; a retirada da tampa da célula eletro-osmótica que após uma pressão de 100 kPa tinha uma força de atrito maximizada; entre muitos outros empecilhos que foram resolvidos.

Após vencidas as dificuldades, que enriqueceram o trabalho de pesquisa, foram determinados os seguintes procedimentos para a primeira etapa dos ensaios realizados na célula eletro-osmótica, em resumo:

- a. Homogeneização do solo com água com diferentes concentrações eletrolíticas (0, 16,5 ou 33 g/L);
- b. Colocava-se o solo já homogeneizado em camadas proporcionais dentro da célula cilíndrica que anteriormente era lubrificada com silicone líquido. Deixava-se em repouso por 24 horas;

- 
- c. Vedava-se com tampa acrílica contendo dois furos para inserção dos drenos condutores e a nivelava; O material condutor inserido no dreno era o cobre ou aço.
  - d. Faziam-se medidas de resistência com uma parte do solo homogeneizado antes da execução do ensaio;
  - e. Inseriam-se os drenos condutores perpendicularmente à tampa acrílica, de forma que estivessem paralelos entre si até chegar ao fundo da célula;
  - f. Conectava os drenos à fonte de alimentação, sendo que um se tornaria o dreno cátodo e o outro o dreno ânodo;
  - g. Montava-se a câmara de compressão, a célula de carga e zeravam-se os extensômetros, onde esses eram devidamente centralizados e nivelados sobre a tampa acrílica;
  - h. Abria-se a válvula de ar comprimido, gradativamente. Inicialmente a cada dois minutos, até que ao final de 10 minutos o manômetro atingia a pressão desejada (50 ou 100 kPa). Nesse momento já monitorava-se o recalque por meio dos extensômetros;
  - i. Ligava-se a fonte de alimentação e a regulava para uma voltagem fixa (5, 15 ou 25V);
  - j. Acompanhava-se a leitura do recalque a cada 5 minutos, aumentava-se o intervalo para 30 minutos durante as duas primeiras horas e, por fim, a cada hora. No mesmo intervalo acompanhava as leituras da corrente, voltagem e o valor na célula de carga.
  - k. O ensaio era considerado como finalizado quando ocorria a estabilização do solo, daí a fonte era desligada;
  - l. Retirava-se a água drenada, os drenos condutores e a tampa de acrílico.
  - m. Faziam-se as medidas da resistência ao cisalhamento do solo com o ensaio de palheta e da umidade superior (próximo a tampa) e inferior do solo que estava dentro da célula.

Para a segunda etapa dos ensaios realizados em laboratório, adicionou-se o processo de eletro-osmose reversa, que é a inversão das polaridades dos drenos, ou melhor, o dreno cátodo passa a ser ânodo e o dreno ânodo passa a ser cátodo que é, geralmente, o principal condutor de saída de água da massa do solo mole. Seguiu-se a mesma metodologia da etapa anterior, apenas que, a cada 11 horas invertiam-se os pólos dos eletrodos, para ocorrer a eletro-osmose reversa. Nesse ínterim, também monitorava-se o recalque, a voltagem, a corrente e conferia-se a carga aplicada na célula de carga.

---

### 6.1.7. PLANEJAMENTO DO ENSAIO

Em consequência dos ensaios realizados por Nascimento (2005), observou-se que, para se ter o entendimento do comportamento dos solos lateríticos do Distrito Federal no processo de consolidação frente ao fenômeno eletro-osmótico, é de fundamental importância otimizar as variáveis predominantes na tecnologia presente. Para tal compreensão, resolveu-se trabalhar com uma célula eletro-osmótica já definida por Nascimento (2005) e descrita no capítulo anterior.

Lembra-se que a água contendo a concentração de sal de 33 g/L foi denominada de água do mar, por ter uma concentração próxima a essa. A água contendo a concentração de sal de 16,5 g/L foi denominada de água salobra, por ter metade da concentração da água do mar.

Inicialmente foram realizados ensaios pilotos, por não utilizarem a técnica eletrocinética, e sim os drenos verticais pré-fabricados (DVPs) no modo de consolidação normal. Esses foram executados com sobrecargas pré-determinadas e em diferentes meios: solo homogeneizado com água tratada (0 g/L), com água salobra (16,5 g/L) e com simulação da água do mar (33 g/L).

Em seguida, realizaram-se ensaios eletro-osmóticos, que utilizaram os drenos condutores (DCEs) ligados à fonte de alimentação, com as mesmas características dos ensaios pilotos e no mesmo meio. Assim, pôde-se viabilizar uma comparação entre os ensaios pilotos com os ensaios eletro-osmóticos.

Portanto, para otimizar as variáveis contidas nos ensaios de consolidação normal e por eletro-osmose (EO), foi realizado o seguinte planejamento:

1. Carga aplicada: 50 kPa e 100 kPa
2. Diferença de potencial (DDP): 5V (25V/m), 15V (75V/m) e 25V (125V/m)
3. Tipo de eletrodo: cobre e aço
4. Concentração salina: 0g/L, 16,5g/L, 33g/L.

Os valores das cargas aplicadas e da diferença de potencial foram escolhidos baseados em valores constantes na literatura (Finno *et. al*, 1996; Bergado *et. al*, 2000; Mohamedelhasan e Shang , 2001 e 2002; Lorenzo *et. al*, 2004). A escolha dos tipos de eletrodos e concentração salina do meio já foi explicada em momentos anteriores nesta tese.

Para essa primeira etapa de ensaios realizados em laboratório, fixou-se uma variável, o eletrodo cobre, e variaram-se as outras três. A sequência dos ensaios, com suas respectivas características, é mostrada na Tabela 6.1.

Para a segunda etapa de laboratório, onde inverterm-se as situações envolvidas, ou seja, fixaram-se as três variáveis (carga, DDP e concentração) e variaram-se os tipos de eletrodos, aplicaram-se as melhores variáveis, em termos de custo-benefício, encontradas nos ensaios realizados com o eletrodo de cobre.

**Tabela 6.1** - Planejamento da primeira etapa dos ensaios realizados em laboratório (fixa os tipos de eletrodos).

ENSAIOS	CARGA		DDP			CONCENTRAÇÃO			SITUAÇÃO
	50 KPa	100 KPa	5V	15V	25V	0 g/L	16,5 g/L	33 g/L	
<i>Ensaio 1</i>	X					X			Sem EO
<i>Ensaio 2</i>	X							X	Sem EO
<i>Ensaio 3</i>		X				X			Sem EO
<i>Ensaio 4</i>		X						X	Sem EO
<i>Ensaio 5</i>	X		X			X			Com EO
<i>Ensaio 6</i>	X				X	X			Com EO
<i>Ensaio 7</i>	X		X					X	Com EO
<i>Ensaio 8</i>	X			X				X	Com EO
<i>Ensaio 9</i>	X				X			X	Com EO
<i>Ensaio 10</i>		X	X					X	Com EO
<i>Ensaio 11</i>		X		X				X	Com EO
<i>Ensaio 12</i>		X			X			X	Com EO
<i>Ensaio 13</i>	X		X				X		Com EO
<i>Ensaio 14</i>	X			X			X		Com EO
<i>Ensaio 15</i>					X		X		Com EO

EO – Eletro-Osmose.

Na segunda etapa também foi realizado o processo de eletro-osmose reversa, isto é, provocou-se a inversão das polaridades dos drenos. A sequência desses ensaios, com suas respectivas características, são mostradas na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2** - Planejamento da segunda etapa dos ensaios realizados em laboratório (Variação dos tipos de eletrodos).

ENSAIOS	TIPO DE ELETRODO		SITUAÇÃO
Carga – 50 kPa DDP – 5V Conc – 16,5g/L	<i>COBRE</i>	<i>AÇO</i>	
<i>Ensaio B1</i>			Sem EO
<i>Ensaio B2</i>	X		Com EO
<i>Ensaio B3</i>	X		Com EO - Reversa
<i>Ensaio B4</i>			Sem EO
<i>Ensaio B5</i>		X	Com EO
<i>Ensaio B6</i>		X	Com EO - Reversa

## 6.2. ENSAIO TESTE – ESCALA INTERMEDIÁRIA

Foram realizados ensaios testes com os resultados da otimização dos ensaios de laboratório, tendo como objetivo comprovar o dimensionamento da corrente e voltagem para a fonte de alimentação que será utilizada em campo, bem como acompanhar o desenvolvimento da poropressão. O teste também foi importante para traçar uma metodologia a ser utilizada nos ensaios de maior escala.

O ensaio teste pode ser chamado de ensaio de escala intermediária por ter sido executado em um reservatório de 500 litros (Figura 6.7 a), ou seja, um recipiente experimental maior do que o usado em laboratório e menor que o usado em campo.



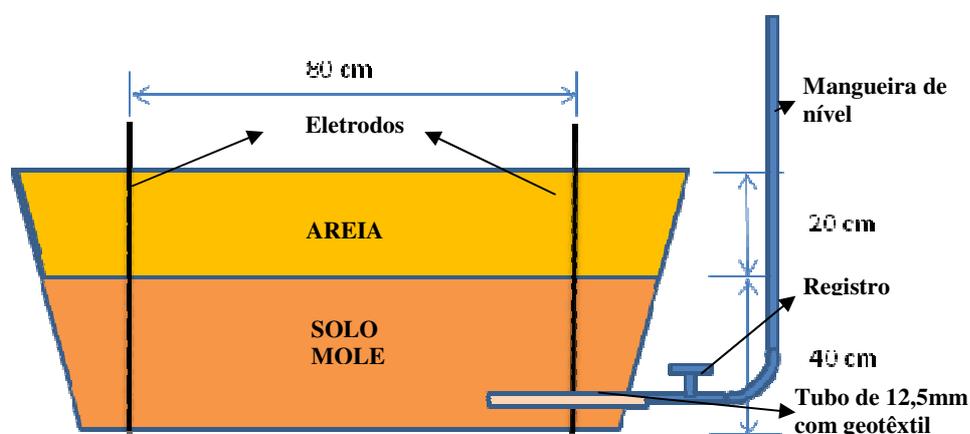
**Figura 6.7** - Reservatório usado no ensaio teste (a), parte interna (b) e externa (c).

Para medir o acréscimo da poropressão no solo, atravessou-se um tubo de 12,5 mm de diâmetro na horizontal na parte inferior do reservatório, que era perfurado e envolto de geotêxtil para filtração da água (Figura 6.7 b), em sua parte interna. O tubo foi atravessado com a ajuda de um flange de 12,5 mm de diâmetro instalado na parede do reservatório, para evitar a passagem da água para a parte externa.

Nessa parte externa do reservatório e ligado ao flange, estava um registro de esfera que era mantido fechado no momento da colocação do solo no recipiente (Figura 6.7 c). Em seguida havia um redutor que era conectado a uma mangueira de nível que estava presa a uma haste de madeira de 1,50 m de altura na posição vertical.

O solo foi homogeneizado com água salobra em um carrinho de mão até a umidade de aproximadamente 65%. Em seguida, o mesmo foi colocado em etapas no reservatório até atingir a cota de 40 cm de altura. Uma manta de geotêxtil foi colocada sobre a argila mole e depois a sobrecarga com 20 cm de areia grossa lavada. A altura de solo mole e areia lavada era metade da altura a ser colocada no ensaio de maior escala. Após colocar a sobrecarga, abriu-se o registro de esfera e fez-se a leitura do nível da água na mangueira em intervalos de tempo.

Inseriram-se dois vergalhões de aço de 90 cm ou dois de cordoalha de cobre, separadamente, com distâncias médias de 80 cm entre si, onde um foi ligado ao pólo positivo da fonte e o outro ao negativo (Figuras 6.8 e 6.9). Esse procedimento confirmou o resultado dos ensaios de laboratório, em termos do melhor material para ser utilizado como eletrodo e em termos do dimensionamento da fonte de alimentação (corrente e voltagem).



**Figura 6.8** - Esquema do ensaio teste.



**Figura 6.9** - Solo mole dentro do reservatório (esquerda) e sobrecarga com eletrodos (direita).

### **6.3. ENSAIOS EM CAMPO – GRANDE ESCALA**

Dois motivos cruciais definiram a escolha do local para os ensaios de maior escala: a falta de espaço no campus da Universidade de Brasília para ensaios experimentais de maior porte e a presença de uma grande quantidade de pessoas transitando na cidade universitária, deixando os equipamentos mais expostos e vulneráveis, exigindo com isso, uma maior segurança, uma vez que qualquer interferência externa poderia vir a prejudicar os resultados.

Considerando os motivos expostos, os reservatórios experimentais foram instalados na Universidade de Brasília - Campus Planaltina, local com muita área a ser explorada por fazer parte da política de expansão da universidade para as cidades satélites. O local atendeu totalmente às demandas necessárias por ter energia, água, espaço físico, segurança e todo o apoio logístico.

#### **6.3.1. PREPARAÇÃO DA ÁREA**

Foi disponibilizada uma área de 150 m<sup>2</sup> no campus de Planaltina – UnB. Essa área foi locada a aproximadamente 40 metros do prédio principal, após a cerca metálica de proteção desse prédio. Este local foi o mais indicado pelo fato de estar próximo a laboratórios e salas, por estar melhor iluminado e por ter pouca quantidade de árvores do cerrado catalogadas pelo IBAMA. Destaca-se que na área reservada para construção do campus de Planaltina existe vegetação protegida pelo IBAMA e, para tanto, necessitaria de autorização prévia para supressão da vegetação.

---

Foi providenciada a limpeza total da área, incluindo a retirada de objetos e da mata rasteira (Figura 6.10a e b); cercou-se a área, um espaço de 110 m<sup>2</sup>, com alambrado de 2 metros de altura, composta de tubo de 37,5mm e tela quadriculada, com 4 fiadas de arame farpado de 45° de inclinação. Essa cerca ajudou a aumentar a segurança do local e garantir a integridade dos equipamentos, bem como evitou interferências de pessoas estranhas. Aproveitou-se em um dos lados o alambrado de proteção do prédio principal que era composto de tubo de 62,5mm e tela quadriculada como mostra a Figura 6.10c e d.



**Figura 6.10** - Limpeza da área (a e b) e instalação de cerca de proteção (c e d).

A cerca continha portão de 4 metros de comprimento para viabilizar a entrada dos reservatórios e dos materiais utilizados na pesquisa. Fizeram-se duas escavações na área para instalação dos reservatórios experimentais (Figura 6.11a), para tanto foi realizado o nivelamento do fundo e colocado uma mistura de solo-cimento 4:1 devidamente nivelada para descida dos reservatórios (Figura 6.11b). A mistura também foi colocada nas laterais, entre os reservatórios e as paredes da escavação para a devida fixação. Em seguida, colocou-se água dentro das piscinas como contrapeso, evitando a elevação das mesmas, até o endurecimento da mistura e estabilização da instalação (Figura 6.11c).



**Figura 6.11** - Escavação para instalação dos reservatórios e sua devida estabilização.

Ao redor dos reservatórios foram feitos contrapisos para evitar a queda de resíduos de solo dentro dos mesmos, gerando uma limpeza física e também visual no ambiente. Foi construído um depósito de 1,5 m<sup>2</sup> de área por 1,2 metros de altura, com orifícios de 50 mm de diâmetro nas laterais para ocorrer à circulação do ar internamente. Dentro do depósito foi colocada a fonte de alimentação e outros materiais utilizados nos ensaios. Salienta-se que fez-se uma extensão do ponto de energia da casa de máquina do prédio do campus para o depósito.



**Figura 6.12** - Reservatórios com contrapiso ao redor e depósito de equipamentos e materiais.

---

Com o propósito de se realizar os ensaios em campo durante todo o ano de 2008, resolveu-se instalar uma cobertura de plástico transparente (utilizados em viveiros e estufas) para proteção dos materiais e dos ensaios das chuvas sempre presentes nos meses de novembro a fevereiro, na região do Distrito Federal. A escolha da cobertura, como material plástico, foi devido ser de menor custo para a pesquisa e, transparente por não ter interferência da sombra no momento dos registros fotográficos.

Para reduzir o tamanho da cobertura, evitar o acompanhamento dos ensaios por pessoas não autorizadas e não deixar a mostra os materiais e equipamentos, fechou-se por completo a área onde foram executados os ensaios, com madeirite e esqueletos de madeira (Figura 6.13). No local foi colocada uma placa de identificação da pesquisa e instalaram-se as sinalizações de perigo de eletricidade de alta tensão e produtos químicos em todo o perímetro do canteiro do ensaio. Todo esse procedimento deixou o ambiente limpo, confortável e protegido para os ensaios serem bem executados.

Portanto, o canteiro dos ensaios tinha uma área de 10 m X 6 m e era composto por esqueleto de madeira preenchido com madeirite com cobertura de duas águas e portão de 4 metros de comprimento. A locação dos reservatórios e de todo o canteiro está apresentada na prancha 1 e 2 do anexo 5 – planta baixa e corte.



**Figura 6.13** - Canteiro dos ensaios com cobertura de plástico transparente.

---

Com o desenvolvimento da pesquisa, a cobertura de plástico foi substituída por uma lona azul, bem mais resistente, conhecida como lona de caminhoneiro. Essa troca ocorreu devido à recorrente ruptura do plástico por causa dos grandes ventos na estação do verão. Por falta de espaço dentro do canteiro central, o solo argiloso foi armazenado ao lado do canteiro (Figura 6.14).



**Figura 6.14** - Canteiro dos ensaios com lona azul como cobertura com solo argiloso armazenado ao lado.

## **6.3.2. PRIMEIRO ENSAIO EM CAMPO**

### **6.3.2.1. PREPARAÇÃO DO SOLO MOLE**

Para a realização desse primeiro ensaio foi utilizado o solo aqui denominado de solo BR. Conhecendo os índices de consistência desse solo, como mostrado na Tabela 5.2 do capítulo anterior, foi possível deixá-lo com consistência mole. Lembra-se que o solo do ensaio pode ser classificado como mole por ter a umidade mantida sempre acima do limite de liquidez ( $W_L$ ) do mesmo. Calculou-se a umidade 15% acima do limite de liquidez, ou seja, em torno de 57%.

Foi possível deixar o solo em uma umidade acima do limite de liquidez, homogeneizando-o em uma caixa quadrada de madeira com as dimensões de 2,5 x 2,5 x 0,30m (C x L x H), especialmente desenvolvida para essa finalidade.

Iniciando o processo da homogeneização do material, determinou-se a umidade da argila *in loco*, retirando-se uma amostra do solo armazenado ao lado do canteiro e pesando-se em uma balança digital modelo CS200 da marca OHAUS. A amostra era seca pela técnica da queima, queimando o solo que estava dentro da cápsula e imerso em álcool etílico. Esse procedimento foi feito até a obtenção da constância de peso do solo seco (Figura 6.15). Assim, aplicavam-se os valores obtidos na equação 6.1 para obtenção da umidade.



**Figura 6.15** - Determinação da Umidade do Solo.

Com o objetivo de aumentar a condutividade elétrica do solo, misturou-se 8,25 Kg de sal a 500 litros de água limpa em uma caixa d'água com capacidade para 500 L. A mistura tem como finalidade obter a água salobra (16,5 g/L) a ser homogeneizada com o solo.



**Figura 6.16** - Preparação da água salobra para ser homogeneizada com o solo.

Após a determinação da umidade da amostra natural, calculava-se a quantidade de água salobra a ser adicionada no solo para a obtenção da umidade na ordem de 57%. Para tanto, colocava-se a medida de solo de 3 baldes de 18 L em um carrinho de mão e o despejava na caixa de madeira (Figura 6.17a e b). No total foram colocados a quantidade de solo de 6 carrinhos de mão na caixa de madeira. Jogava-se água salobra na medida de 5 baldes de 18 L sobre o solo anteriormente depositado dentro da caixa. Por fim, fazia-se a homogeneização manualmente com enxada e convertia-se com pá para o reservatório (Figura 6.17c-f).

Destaca-se que, para acelerar o processo da homogeneização do solo, foram feitas duas caixas de madeira de mesmas dimensões. Cada uma das caixas estava situada próxima aos reservatórios que iriam abastecer, como mostra a Figura 6.17c. Enquanto homogeneizava-se o solo em uma das caixas de madeira, colocava-se o solo na outra para homogeneização, deixando-se o processo dinâmico e eficiente.

Portanto, os reservatórios estavam sendo preenchidos com solo de consistência mole concomitantemente. Após a sua conversão para os reservatórios fazia-se uma nova homogeneização dentro do recipiente para nivelamento do solo e tentar garantir a sua saturação, como mostra a Figura 6.17f.

Como o processo de homogeneização do solo foi todo manual, foram necessários 5 dias para colocar o solo mole em torno da cota de 75 cm nos dois reservatórios, com 3 serventes trabalhando de forma continuada. Encheu-se os reservatórios por etapas, praticamente simultaneamente, para não se ter uma diferença do adensamento entre elas, causado pelo peso próprio. Precisou-se de aproximadamente 2,6 m<sup>3</sup> do solo “BR”, 3420 L de água salobra e 56kg de sal para preencher cada reservatório com o solo mole.



**Figura 6.17a-d** – Homogeneização do solo em etapas (a-d).



**Figura 6.17e-f** - Homogeneização do solo em etapas (e –f).

A Figura 6.18 mostra o solo próximo à cota de 75 cm, com uma lâmina de água espessa resultante do processo de adensamento do solo que ocorreu devido ao peso próprio.



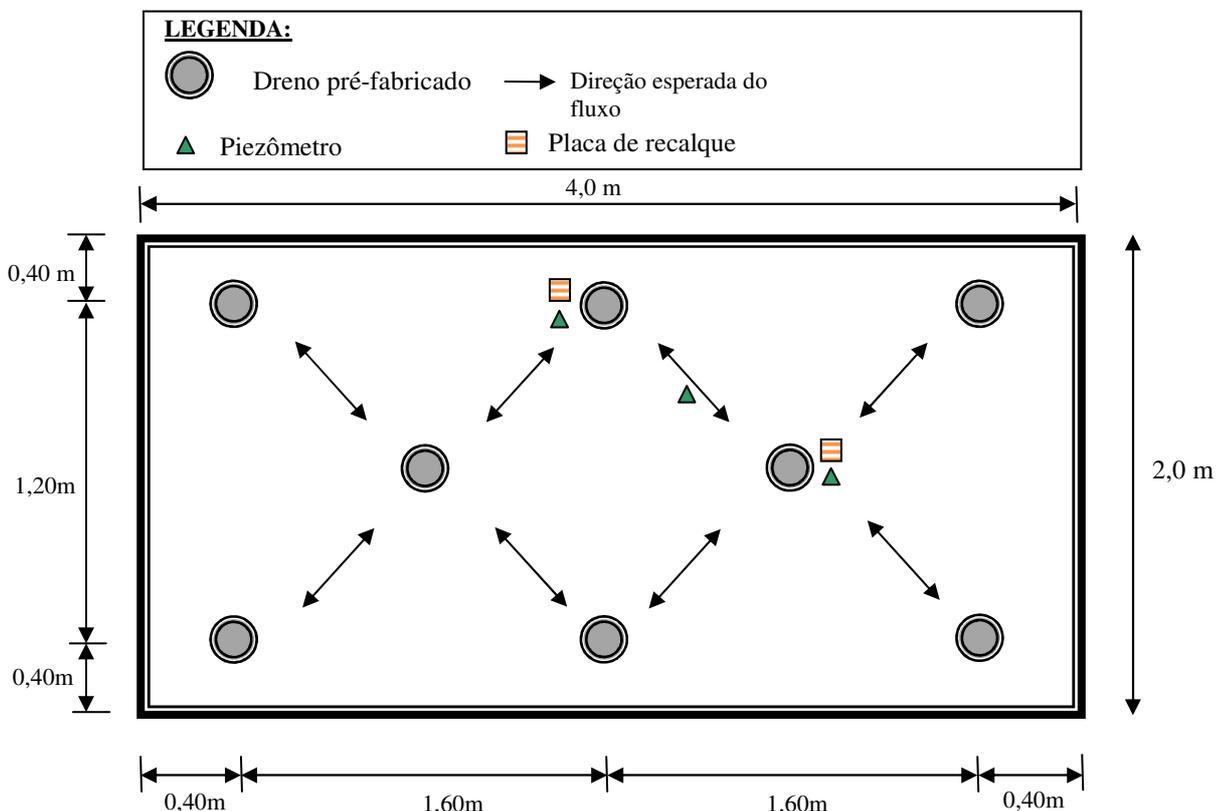
**Figura 6.18** - Reservatório com solo mole próximo a cota de 75 cm, com destaque para lâmina d'água.

### **6.3.2.2. INSTALAÇÃO DOS DRENOS VERTICAIS**

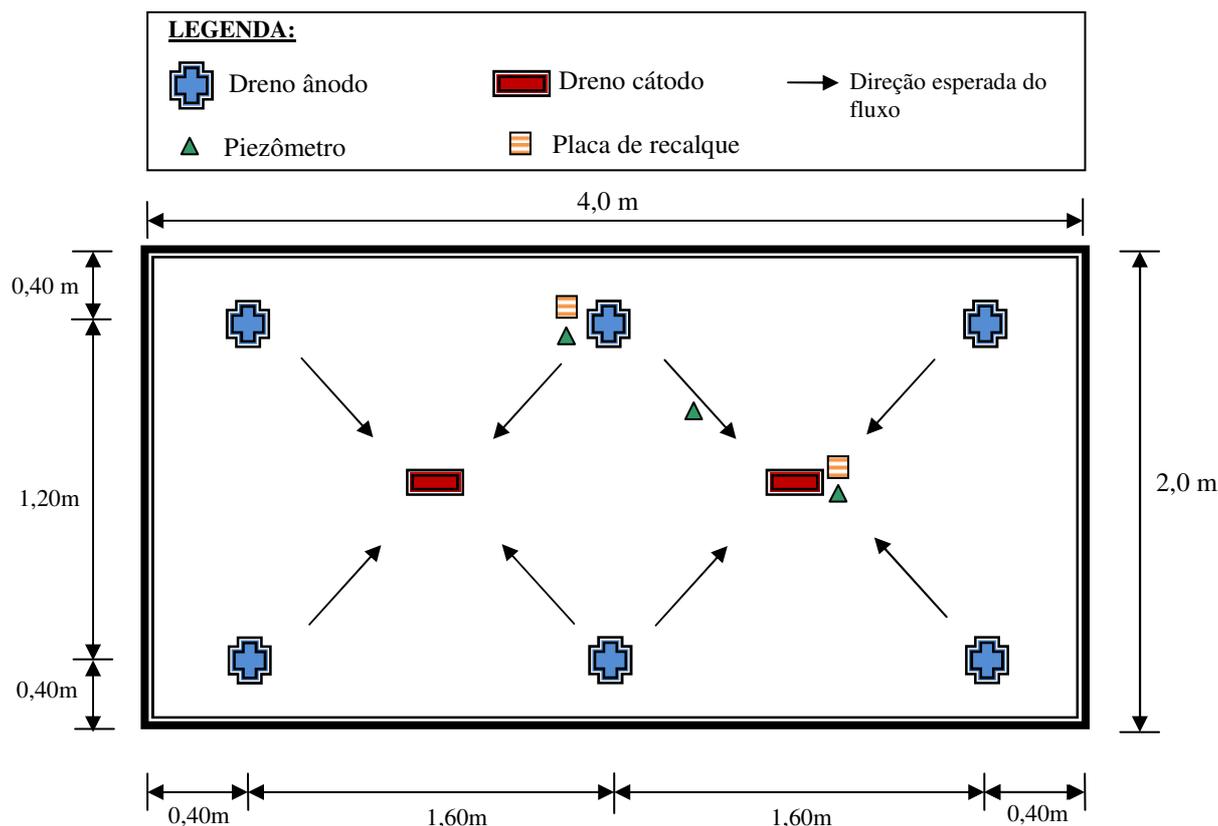
Para uma maior compreensão da metodologia e dos resultados, denomina-se o reservatório que utilizou o método eletro-osmótico, portanto, o dreno condutor elétrico – DCE de “reservatório EO” e o que utilizou o método padrão com dreno vertical pré-fabricado - DVP de “reservatório PAD”.

No reservatório PAD, os drenos verticais foram instalados com ajuda de dois vergalhões de aço em cada lateral. Após cravação no solo, retiravam-se os vergalhões. Esses drenos verticais tinham 1,40 m de comprimento. O espaçamento é da ordem dos valores encontrados na prática construtiva, entre 1,0 e 2,0 metros. O espaçamento entre os drenos foram arbitrados para ser o mais próximo possível da realidade de campo, contudo, devido às dimensões dos reservatórios, os drenos foram obrigados a serem separados da seguinte forma: 1,60m na horizontal, 1,20 m na vertical e 1,0 m na diagonal. Essa configuração resultou na instalação de 8 drenos verticais, como pode ser visto na Figura 6.19. A partir dos resultados dos ensaios de laboratório, determinou-se que o material condutor do geocomposto DCE utilizado em campo seria o aço. Dessa forma, foi utilizado o vergalhão de aço de 16 mm<sup>2</sup> com 1,50 m de comprimento.

No reservatório EO, também utilizou-se o vergalhão como suporte para inserir o DCE no solo. Diferenciando-se do caso anterior pelo fato que após a cravação no solo, apenas um dos vergalhões eram retirados, restando o “geodreno + vergalhão de aço” (DCE) em posição vertical. O número de DCE instalado foi também oito (8), com o mesmo espaçamento, para poder viabilizar uma real comparação entre os processos. Desses, por sua vez, 6 foram conectados ao terminal positivo da fonte, tornando-se eletrodos ânodos, e 2 DCEs conectados ao terminal negativo para serem os cátodos, formando a configuração da Figura 6.20.



**Figura 6.19 - Reservatório experimental sem GCE (PAD) – PLANTA BAIXA**



**Figura 6.20 - Reservatório experimental com GCE (EO) – PLANTA BAIXA**

### 6.3.2.3. SOBRECARGA E INSTRUMENTAÇÃO

Após todo o processo da homogeneização do solo, foram retiradas as lâminas de água em excesso para conseguir o nivelamento do solo mole. Por conseguinte, colocou-se uma manta de geotêxtil sobre esse solo para filtração e separação (Figura 6.21a). Salienta-se que foi colocado um cintamento de madeira de 30cm sobre o reservatório com o propósito de aumentar a altura da camada de areia e, portanto, o peso da sobrecarga.

No dia seguinte, perfurou-se a manta para inserção dos drenos verticais e instalaram-se 3 piezômetros de Casagrande e duas placas de recalques (Figura 6.21b e 6.22e). Maiores detalhes sobre a instrumentação serão vistos em item posterior. Na Figura 6.21b poderá ser notado que outra lâmina de água surgiu devido ao adensamento pelo peso próprio após 36 horas de descanso do solo.



**Figura 6.21** - Manta de geotêxtil sobre o solo mole (a) e drenos e instrumentação instalados (b).

Foram colocados 10 cm de areia grossa lavada e 15cm de brita sobre a manta de geotêxtil (Figura 6.22a). Esses materiais tiveram as funções tanto de sobrecarga como de colchão drenante, pois a camada de brita estava alinhada aos furos superiores nos reservatórios (Figura 6.22b). Destaca-se que a água passava por esse furo para ir em direção ao balde de recepção, por este motivo colocou-se um pedaço de geotêxtil preso ao mesmo para evitar que partículas de solo fossem arrastadas também para o balde (Figura 6.22c).

Pode-se observar na Figura 6.22a que o geodreno ficou encurvado sobre a areia lavada e que quando a brita foi depositada apenas o vergalhão estava para fora do sistema. Para manter a saturação da argila, colocou-se uma quantidade de água conhecida sobre a camada de brita, até que a areia lavada (camada embaixo da brita) estivesse totalmente saturada.



**Figura 6.22** - Camadas de colchões drenantes (a e d), furo para saída de água do reservatório (b e c) e piezômetro de Casagrande e haste da placa de recalque (e).

Mais uma manta de geotêxtil foi colocada sobre a camada de brita (Figura 6.23a), servindo como separação, para em seguida ser depositada e nivelada a sobrecarga de areia rosada com 40 cm de altura (6.23b).



**Figura 6.23** - Manta de geotêxtil sobre a brita (a) e sobrecarga de areia sendo nivelada (b).

A Figura 6.24 mostra o perfil esquemático dos materiais depositados nos reservatórios. Portanto, duplicou a escala em relação ao ensaio intermediário.



**Figura 6.24** - Perfil dos materiais depositados nos reservatório EO e PAD.

---

É importante frisar que, a camada drenante e a sobrecarga foram colocadas simultaneamente nos reservatório experimentais, para não ter uma diferença de recalque considerável antes de serem iniciados os processos. Os registros dos baldes de recepção foram mantidos fechados para se ter o confinamento total da argila mole, provocando o aumento da poropressão devido ao depósito da sobrecarga de areia sobre a argila mole.

#### **6.3.2.4. PREPARAÇÃO, INSTALAÇÃO E MEDIÇÃO NOS PIEZÔMETROS**

Com o objetivo de medir o acréscimo de poropressão na massa de solo, foi instalada uma instrumentação simples e de baixo custo, baseado no princípio do piezômetro Casagrande, que pode atender às necessidades da pesquisa. Pensou-se em utilizar um piezômetro com melhor tempo de resposta, o que não foi possível devido ao restrito recurso disponível para esta pesquisa.

O piezômetro preparado para a pesquisa em campo era composto de tubo semi-rígido transparente de 6 mm de diâmetro interno e 2,50 m de comprimento, sendo que 12 cm desse tubo foi perfurado com 25 furos em sua extremidade e enrolado com geotêxtil para filtração da água em direção ao tubo. Escolheu-se um tubo relativamente fino, para diminuir o tempo de resposta do processo. O tubo foi preso a uma ripa de madeira de 2,0 x 5,0 cm de seção transversal com 3 metros de comprimento. Foram colados à ripa, quatro régua de madeira de 60 cm cada para acompanhamento do nível de água no tubo transparente. A Figura 6.25 mostra o piezômetro preparado.

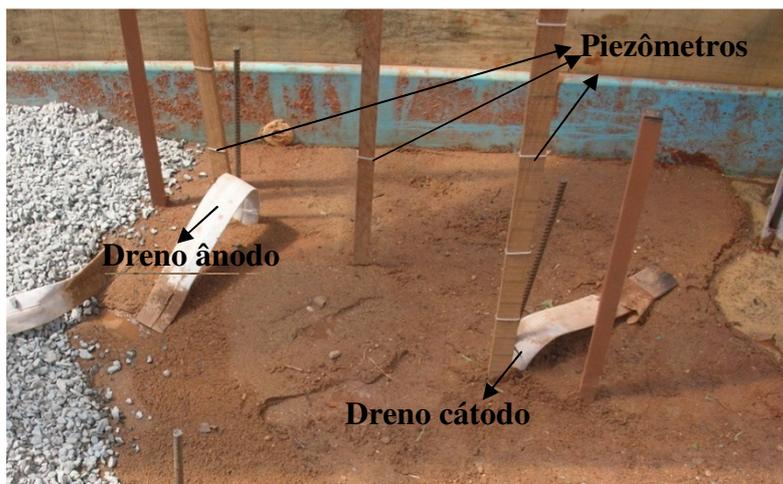


**Figura 6.25** - Piezômetro para medir a poropressão na massa de solo.

---

A instalação procedeu com a cravação dos piezômetros até o fundo do reservatório. Foram instalados 3 piezômetros em cada reservatório e posicionados de forma que estivessem próximos ao eletrodo cátodo, próximo ao eletrodo ânodo e no centro das distâncias entre os eletrodos (Figura 6.26). Esse posicionamento é importante para entender o comportamento da poropressão frente ao método eletro-osmótico e ao processo de adensamento com dreno normal.

O piezômetro foi dimensionado por meio dos cálculos de tensões no solo e comprovado pelo ensaio teste, onde os resultados foram transportados para a situação de maior escala. Foi medido o nível de água nos piezômetros antes de colocar a sobrecarga (medidas iniciais) e logo após a mesma ser depositada sobre a argila mole, tendo assim, por diferença, o acréscimo de poropressão que ocorrera na massa de solo mole. A cada 48 horas eram feitas medidas nos piezômetros para comparação com os acréscimos de poropressão medidos inicialmente. Salienta-se que o tempo de resposta dos piezômetros, no teste de escala intermediária, foi da ordem de 14 minutos.



**Figura 6.26** - Piezômetros instalados antes de colocar as camadas de areia grossa lavada e brita sobre solo mole.

### **6.3.2.5. INSTALAÇÃO PARA OBTENÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO**

A resistência não drenada da argila foi determinada por meio do ensaio de palheta de campo adaptado (Figura 6.27). Esse ensaio consistiu de uma palheta de seção retangular de 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, inserida no solo mole até o centro da camada, e submetida a um torque capaz de cisalhar esse solo por rotação. O ensaio adaptado seguiu a Norma MB-3122 (Ensaio de palheta *in situ*), onde o equipamento de unidade de torque e medição foi o torquímetro, o qual imprimiu uma rotação às hastes de  $(6 \pm 0,6)^\circ/\text{min}$ .

---

As medidas foram realizadas em três posições diferentes em cada um dos reservatórios, próxima ao dreno cátodo, ao dreno ânodo e no centro da distância entre os mesmos. Os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados antes de colocar a sobrecarga nos reservatórios e no final do ensaio eletro-osmótico e do ensaio padrão. A localização e procedimento das medidas são importantes, tanto para conhecer o ganho de resistência obtido com o processo escolhido, quanto para entender o comportamento da resistência em diferentes pontos de cada processo.

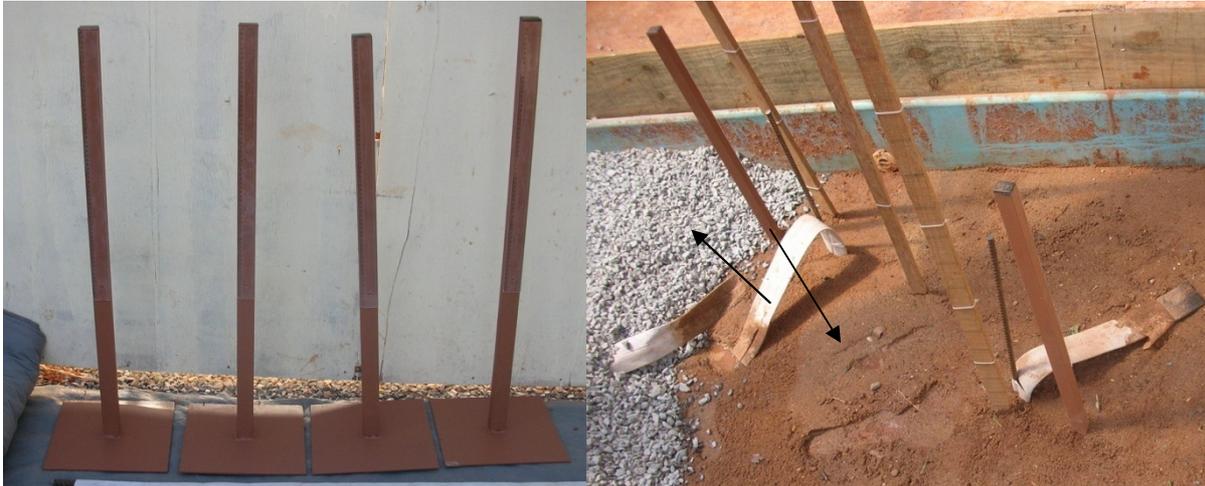


**Figura 6.27** - Equipamento adaptado para o ensaio de palheta.

#### **6.3.2.6. PREPARAÇÃO, INSTALAÇÃO E MEDIÇÃO NAS PLACAS DE RECALQUE**

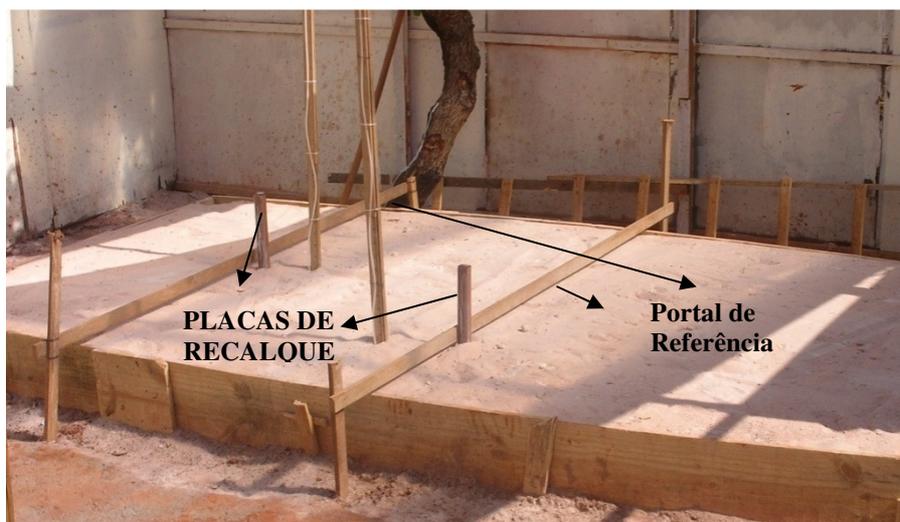
Devido à altura da camada de argila ser relativamente pequena, as medidas de recalque foram realizadas apenas na superfície da mesma. Para tanto, foi posicionada uma chapa metálica com 30 cm de lado fixada a um metalon de 6 x 3 cm no centro com 1 metro de comprimento, onde o conjunto representa uma placa de recalque. No metalon foi colada uma régua de acrílico graduada de 50 cm para acompanhamento do desenvolvimento do recalque durante o ensaio.

Foram colocadas duas placas de recalque em cada reservatório, sendo que uma estava próxima ao dreno cátodo e a outra próxima ao dreno ânodo no reservatório EO e similar localização no reservatório PAD. As placas de recalque foram colocadas na superfície do solo mole, sobre o geotêxtil de separação, e sua haste ultrapassava a superfície da sobrecarga de areia.



**Figura 6.28** - Placas de recalques instaladas antes de colocar as camadas de areia grossa lavada e brita sobre solo mole.

A leitura de recalque foi feita transferindo a cota inicial da ponta da haste para um portal de madeira próximo a placa de recalque, pois esse seria uma referência fixa. A cota inicial foi medida, com a ajuda da régua colada à placa de recalque, onde a parte horizontal do portal de referência estava em uma altura da régua. A cada 48 horas as medidas eram feitas e os valores comparados com as cotas iniciais, de modo que a diferença entre as medidas corresponde aos recalques ocorridos durante o ensaio.



**Figura 6.29** - Placas de recalques instalados antes de colocar as camadas de areia grossa lavada e brita sobre solo mole.

---

### 6.3.2.7. CIRCUITO ELÉTRICO

No ensaio em campo que usou o processo eletro-osmótico, utilizaram-se circuito elétrico fechado e paralelo entre os drenos elétricos. Reforça-se que 2 eletrodos receberam carga negativa tornando-se DCE cátodo e 6 eletrodos receberam carga positiva para serem DCE ânodo. Esses eletrodos foram conectados a uma fonte geradora de energia, com capacidade de diferença de potencial fixado em 24 V e corrente máxima 80A. Esses valores foram baseados nos resultados dos ensaios de laboratório e por meio do ensaio teste, onde seu dimensionamento será explicitado a seguir.

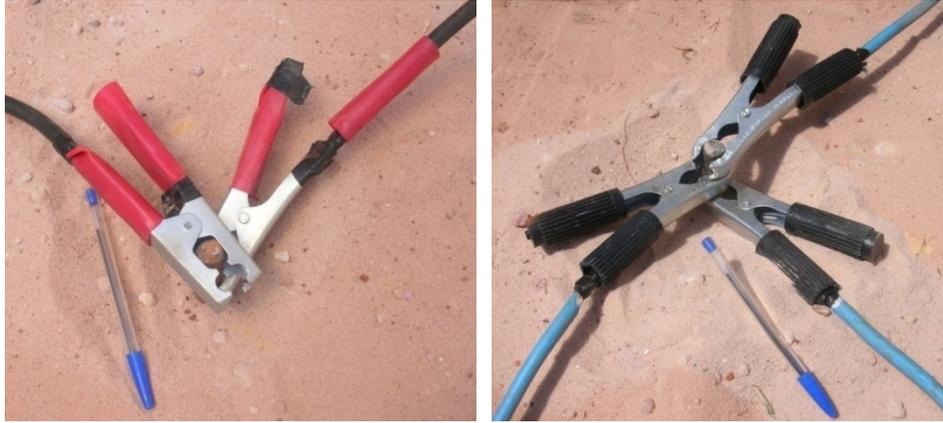
Por ser provável que a corrente máxima na fonte possa chegar a 80 A, utilizou-se fios de cobre que suportassem esse nível de corrente. Assim, fios de 10 mm<sup>2</sup> de área foram usados para conectar os eletrodos entre si e os eletrodos até a fonte. Os mesmos eram interligados por meio de um dispositivo, tamanho grande, chamado comercialmente “garra de jacaré” (Figura 6.30).



**Figura 6.30** - Garra de jacaré utilizada para conectar os eletrodos.

Os fios azuis com garras pretas conectavam os eletrodos até o terminal positivo da fonte e também entre si, os fios pretos e garras vermelhas conectavam o DCE ao terminal negativo e também entre si (Figura 6.31).

Dentro das configurações dos eletrodos comumente utilizados, sempre existe uma área de campo elétrico chamada de não efetiva, pois a eletricidade nessa área não é predominante para o deslocamento da água. Para minimizar a área de campo elétrica não efetiva, reduz-se o espaçamento entre eletrodos de mesma polaridade, o que poderá aumentar o custo do processo.



**Figura 6.31** - Garras de jacaré vermelhas interligando os eletrodos ao pólo negativo da fonte (a) e garras pretas interligando ao pólo positivo (b).

Para os ensaios em campo realizados nesta tese, foi determinada uma configuração retangular que consiste de um eletrodo cátodo com quatro eletrodos ânodos ao redor. Essa configuração utiliza aplicações de campo elétrico bidimensional não linear, o qual alcança o fluxo axi-simétrico (ou radial) em direção ao eletrodo central.

Existe uma equação para o cálculo do número de eletrodos por unidade de área para a configuração quadrada e hexagonal voltados para remediação em Alshwabkeh (2001). Porém, para esta pesquisa não foi possível selecionar uma configuração com o número ótimo de eletrodos por unidade de área devido ao espaço do reservatório.

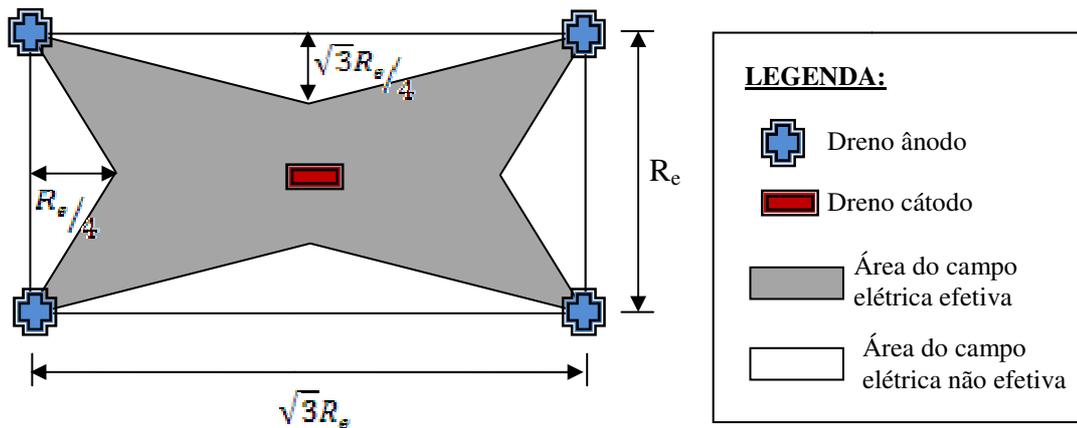
Para essa configuração retangular, a distribuição do campo elétrico mostra que a área não afetada para cada célula tem o formato de um triângulo isósceles com a base sendo a distância entre os eletrodos de mesma polaridade (Figura 6.32). A altura da área desse triângulo é aproximada e depende do tempo processado, espaçamento do eletrodo e alinhamento. Esta altura é assumida como sendo um quarto do comprimento da base para aplicações 2-D (Alshwabkeh, 2001).

Pode-se encontrar a área da célula e da área do campo elétrico não efetiva pelas seguintes equações:

$$\text{Área da Célula} - \sqrt{3}R_e^2 \quad \text{Equação (6.2)}$$

$$\text{Área não efetiva} - 2\left(\frac{3R_e^2}{8}\right) + 2\left(\frac{R_e^2}{8}\right) = R_e^2 \quad \text{Equação (6.3)}$$

Onde,  $R_e$  é o espaçamento do ânodo – cátodo.



**Figura 6.32** - Área não efetiva aproximada para configuração do eletrodo em 2-D.

No ensaio realizado em laboratório, utilizou-se um circuito elétrico básico que, para uma maior simplificação, força-se obedecer a Lei de Ohm, a qual indica que a tensão é diretamente proporcional à corrente, e a constante formada aparece como uma dificuldade à passagem da corrente elétrica. A Equação 6.4 mostra a formulação da Lei de Ohm e a Figura 6.33 ilustra o circuito do ensaio de laboratório.

$$V = R \cdot i$$

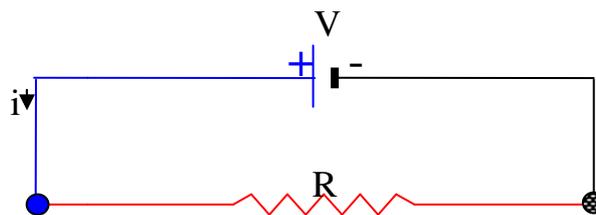
Equação (6.4)

Onde:

V: diferença de potencial elétrico (V);

R: resistência elétrica (ohm);

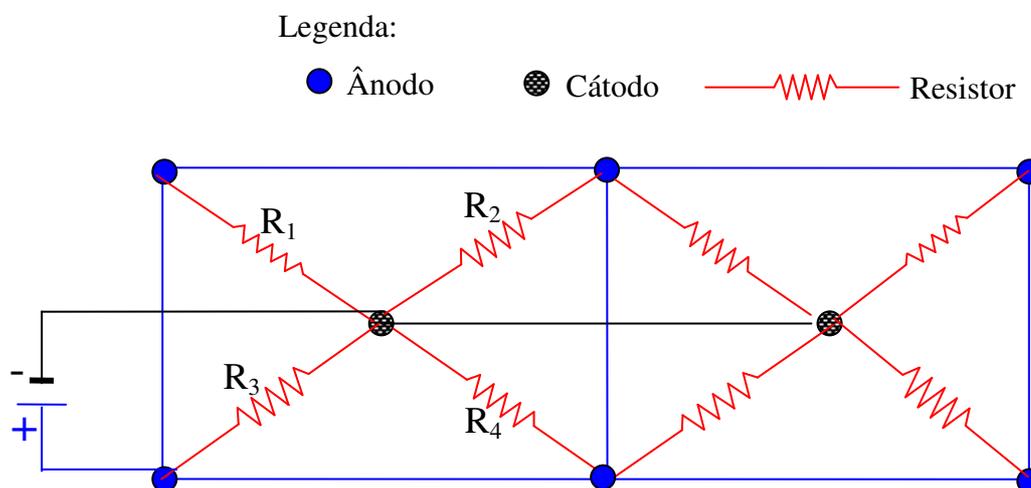
i: corrente elétrica (A).



**Figura 6.33** - Circuito elétrico simples.

Entretanto, a resistência elétrica do material (resistor) não depende da diferença de potencial aplicada ao mesmo nem da corrente que o percorre, e sim, depende basicamente do tipo de material condutor. Nesse ensaio, o material condutor é o solo mole o qual não é um simples resistor, pois nele ocorre, além do efeito térmico, outros efeitos, como o químico, que fazem variar a resistência do material, além do mesmo não ser um material homogêneo.

Destaca-se que a resistência elétrica de um resistor depende principalmente do material que o constitui, mas também de suas dimensões. Dessa forma, as dimensões do material no ensaio em campo são bem maiores do que no ensaio de laboratório, tornando o circuito elétrico em campo mais complexo, por ter maior volume do material. Ainda assim, observa-se que a distância entre os eletrodos em campo são cinco vezes maiores do que a distância dos eletrodos de laboratório, podendo simplificar o circuito complexo transformado em vários circuitos simples de escala multiplicada por cinco (5). Assim, nesse circuito em campo existem vários resistores aproximados aos resistores do circuito simples. Neste caso, todos estão em paralelo porque são submetidos à mesma diferença de potencial elétrico. A representação do circuito do ensaio realizado em campo encontra-se na Figura 6.34.



**Figura 6.34** - Circuito elétrico complexo no ensaio realizado em campo.

Antecipando os resultados obtidos nos ensaios de laboratório, onde abre-se uma exceção para explicação do dimensionamento da fonte de alimentação, observa-se que 0,73A de corrente atravessou a massa de solo com uma diferença de potencial elétrico de 5V para o ensaio realizado com o aço. Assim, para o circuito realizado em campo houve um aumento de escala da ordem de cinco vezes comparado com o ensaio de laboratório, portanto a corrente passaria para 3,65 A, se mantida a proporcionalidade.

Nesse circuito da Figura 6.34, em uma célula, a corrente atravessa o solo até um determinado cátodo por quatro lados diferentes ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  e  $R_4$ ), passando a corrente para, aproximadamente, 15 A em uma única célula. Considerando que a fonte foi dimensionada para 4 células (cotação inicial) resultaria na passagem de corrente para 60 A com uma voltagem de 25 V. Isso é similar ao valor encontrado por Nascimento (2005) que, para uma

---

voltagem de 25 V, necessitaria de uma corrente de 55 A. Por esses motivos, resolveu-se usar um fator de segurança e fabricar a fonte para uma corrente máxima de 80 A, visto que a fonte de alimentação tinha três níveis de voltagem (12, 24 e 36 V).

A Figura 6.35 apresenta a configuração dos drenos condutores, divididas em duas células.



**Figura 6.35** - Configuração dos drenos condutores.

### **6.3.3. SEGUNDO ENSAIO EM CAMPO**

#### **6.3.3.1. PREPARAÇÃO DO SOLO MOLE**

Nesse ensaio foi utilizado o solo MD, onde os índices de consistência estão mostrados na Tabela 5.2 do capítulo anterior. Houve também a preocupação de manter a umidade acima do limite de liquidez ( $W_L$ ), mais precisamente, a umidade foi calculada para 65%.

Na segunda quinzena de fevereiro de 2009, o solo foi homogeneizado obedecendo as mesmas etapas do outro ensaio, em uma caixa quadrada de madeira. Apenas foi modificada a quantidade de água salobra a ser adicionada, devido ao fato de ter começado o período de chuva no Distrito Federal, o que deixou o depósito de solo bastante úmido, com uma umidade natural aproximada de 35%.

Esperou-se passar o período chuvoso por cerca de 20 dias para dar início à homogeneização do solo. No entanto, o ano de 2009 foi atípico em relação à chuva e quando a umidade do solo natural baixou para 30% deu-se início aos procedimentos. Por questão de tempo, não foi possível aguardar a secagem do solo ao ar livre, até porque, após a homogeneização, as chuvas recomeçaram, se estendendo até o mês de abril.

---

Por estar o solo mais úmido, foram colocados a quantidade de solo de cinco carrinhos de mão na caixa de madeira, um carrinho a menos que a homogeneização anterior. Jogava-se água salobra na medida de 3 a 3,5 baldes de 18 L sobre o solo depositado dentro da caixa. Da mesma forma, fazia-se a homogeneização manualmente com enxada e convertia-se com pá e balde para o reservatório. Resolveu-se colocar o solo mole até a cota de 90 cm, 15 cm a mais que o ensaio anterior, para que o nível de água devido ao peso próprio do material estivesse alinhada ao furo de drenagem do reservatório. Isso garantiria uma saída imediata de água para os baldes de recepção.

Precisou-se de aproximadamente  $2,5 \text{ m}^3$  do solo “MD”, 4680 L de água salobra e 78 kg de sal para preencher cada reservatório com o solo mole. A Figura 6.33 mostra, de forma clara, que o solo apresenta consistência mais mole quando comparado com a homogeneização anterior. Nesse caso, também pode-se ver a lâmina d’ água devido ao adensamento provocado pelo peso próprio. Destaca-se que a cota do solo mole ficou posicionada na extremidade inferior do tubo drenante.



**Figura 6.36** - Solo MD homogeneizado com lâmina d’ água na cota do tubo drenante.

---

### 6.3.3.2. INSTALAÇÃO DOS DRENOS VERTICAIS

Os drenos verticais foram instalados da mesma forma, ou seja, com ajuda de dois vergalhões de aço em cada lateral. Após cravação no solo, retiravam-se os dois vergalhões para o caso do reservatório PAD e apenas um para o reservatório EO. A configuração dos drenos resultou na instalação de 8 drenos verticais. Na configuração inicial os dois drenos do centro são os cátodos e os das laterais são os ânodos.



**Figura 6.37** - Instalação dos drenos verticais.

### 6.3.3.3. SOBRECARGA

Com o aumento da altura do solo mole, houve uma pequena mudança na posição e espessura dos materiais. Foram colocados 10 cm de brita e 15cm de areia grossa lavada sobre a manta de separação colocada na argila mole. Para tentar garantir a saturação da argila, colocou-se uma quantidade de água conhecida sobre a camada de brita, até que estivesse totalmente saturada (Figura 6.38).



**Figura 6.38** - Adicionando água para saturar a brita e garantir a saturação do solo mole.

Em seguida foi depositado a areia lavada, o geotêxtil e a sobrecarga de areia rosa conforme esquema da Figura 6.39.

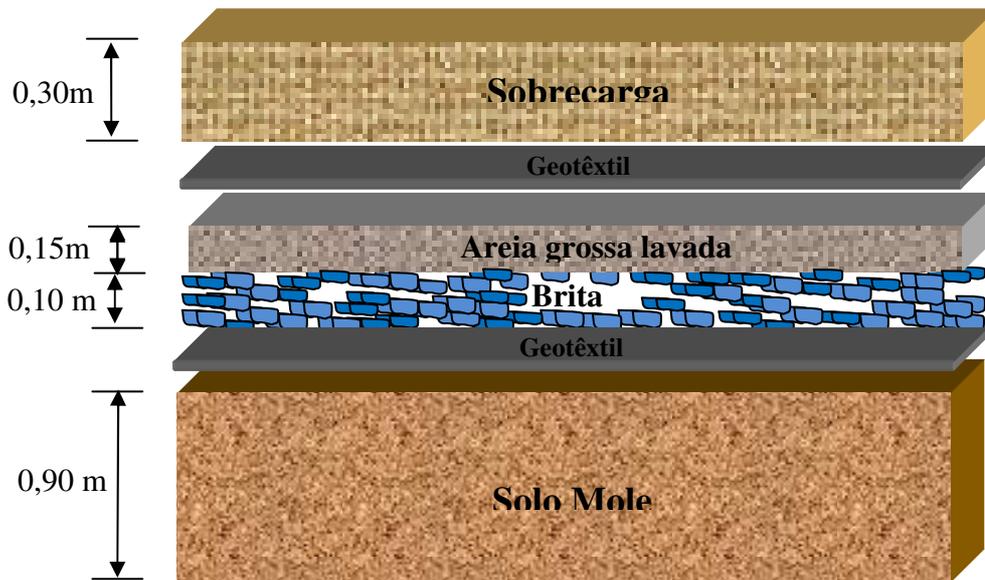


Figura 6.39 - Perfil dos materiais depositados nos reservatório EO e PAD do ensaio 2.

#### 6.3.3.4. PREPARAÇÃO, INSTALAÇÃO E MEDIÇÃO NOS PIEZÔMETROS

Algumas modificações foram realizadas na instrumentação da medição da poropressão, visando a garantir o bom funcionamento do aparato. Foram colocados dois tubos lado a lado na instrumentação, um semi-rígido fosco e outro flexível transparente. A duplicidade dos tubos tinha por objetivo garantir o perfeito funcionamento da instrumentação, pois se houvesse a colmatção de um tubo, teria outro como reserva. Além disso, quando os dois estivessem no mesmo nível pode-se entender que não há interferência de ar no sistema.

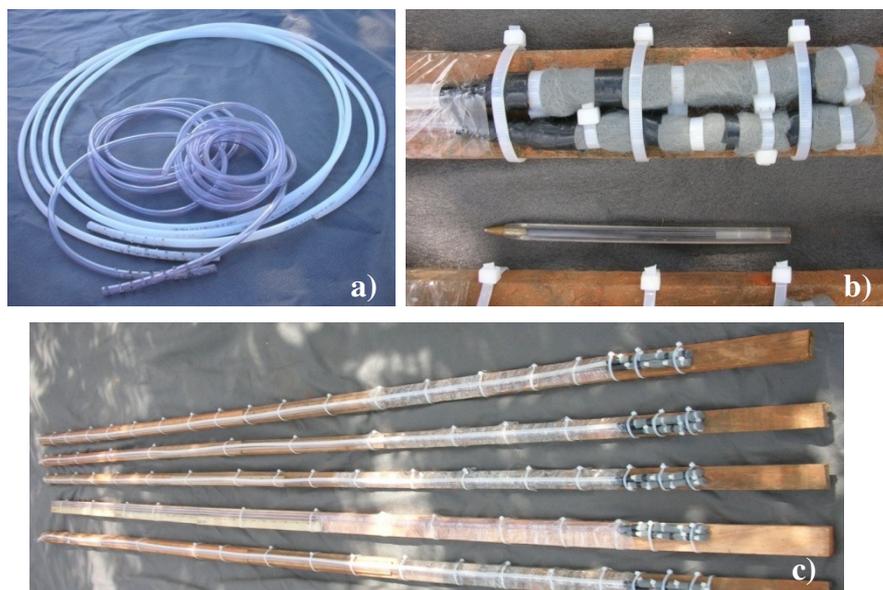


Figura 6.40 - Piezômetro com tubos duplos.

---

Os tubos têm 2,50 m de comprimento e um diâmetro um pouco maior que o anterior, 10 mm internamente, sendo que 12 cm desse tubo foi perfurado com 30 furos em sua extremidade e enrolado com geotêxtil para filtração da água (Figura 6.40a e b). O tubo foi preso à ripa de madeira de 2,0 x 5,0 cm de seção transversal com 3 metros de comprimento (Figura 6.40c). Foram colocadas as extremidades dos tubos a uma distância de 20 cm da ponta da ripa.

A instalação foi realizada da mesma forma que o ensaio anterior, com a cravação dos piezômetros até o fundo do reservatório. Neste caso, havia uma distância de 20 cm do início do tubo e mais 12 cm do tubo perfurado, portanto a leitura da poropressão era feita na cota de 30 cm. Os piezômetros foram posicionados igualmente ao ensaio anterior, ou seja, posicionados de forma que estivessem próximos ao eletrodo cátodo, próximos ao eletrodo ânodo e no centro das distâncias entre os eletrodos.

Antes de colocar a sobrecarga (medidas iniciais), foram realizadas as medidas do nível de água nos piezômetros (Figura 6.41). Após a inserção da sobrecarga mediu-se também o nível de água, tendo por diferença, o acréscimo de poropressão que ocorrera na massa de solo mole. As medidas eram realizadas a cada 24 horas para comparação com o acréscimo de poropressão medidos inicialmente.



**Figura 6.41** - Nível de água no piezômetro após depósito da camada drenante.

---

### 6.3.3.5. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO E PLACAS DE RECALQUE

A resistência ao cisalhamento não drenada do solo foi obtida do mesmo modo do ensaio anterior, medindo-se antes e após a realização do método proposto.

Para a leitura do recalque neste ensaio, foi feita a substituição do portal de madeira pelo portal metálico. Essa substituição foi de forma preventiva pelo fato da madeira usada, no decorrer do tempo, tender a fletir, o que pode alterar o resultado do recalque; e em termos de precisão, pois para acompanhar a leitura do recalque com mais exatidão, colocaram-se extensômetros apoiados às bases magnéticas que, por sua vez, estavam apoiadas nos portais metálicos. A Figura 6.42 mostra os extensômetros e as bases magnéticas imadas aos portais metálicos.



**Figura 6.42** - Extensômetros e bases magnéticas imadas aos portais metálicos.

As placas de recalque foram colocadas próximas ao dreno cátodo e ao dreno ânodo no reservatório EO e próximo aos drenos em posição similar no reservatório PAD. A leitura do recalque foi feita por meio dos extensômetros analógicos em períodos diários.

Também por prevenção, por ser possível uma falha nas bases magnéticas e desse modo interromper a leitura, resolveu-se fazer o acompanhamento do recalque de maneira similar ao outro ensaio. Transferindo-se a cota inicial da ponta da haste para o portal metálico próximo a placa de recalque, por esse ser uma referência fixa. A cota foi medida, com a ajuda de duas réguas, onde uma ficava na horizontal perpendicularmente ao portal e a outra na vertical, da ponta da haste da placa de recalque até o encontro da régua na posição horizontal, formando um ponto de interseção. As medidas eram feitas no mesmo momento da leitura no extensômetro, e os valores eram comparados com as cotas iniciais, de modo que a diferença entre as medidas corresponde aos recalques ocorridos durante o ensaio.

---

Outra situação para leitura de recalque foi por meio de uma mangueira de nível, onde o nível era colocado na extremidade da haste da placa de recalque e transferido para uma referência fixa.

#### **6.3.3.6. CIRCUITO ELÉTRICO**

Salienta-se que não houve nem uma mudança em relação ao tipo de circuito elétrico utilizado. As distâncias entre os eletrodos, o tipo de ligação e a voltagem aplicada foram mantidas. Todavia, neste ensaio de campo foi aplicado o método da eletro-osmose reversa, em que, em 72 horas trocavam-se os pólos na fonte de alimentação, tornando o dreno cátodo em ânodo e o dreno ânodo em cátodo. Esse procedimento era constante por 48 horas, tempo médio para a corrente baixar consideravelmente. Com essa permuta o número de drenos cátodos passou a ser seis (6) e o número de drenos ânodos passou a ser dois (2).

Passadas às 48 horas retornavam-se à posição dos drenos, onde o número de drenos cátodos era dois (2) e o número de drenos ânodos era seis (6). Esse procedimento de reversão foi conservado até o término do ensaio, momento em que uma corrente considerada insignificante atravessava a massa de solo.

#### **6.3.4. RESUMO DO ENSAIO EM CAMPO**

Para compreender, de forma macroscópica, todo o caminho da metodologia proposta para os ensaios em campo, fez-se o seguinte resumo das etapas:

- a. Determinação da umidade do solo natural.
- b. Preparação da água salobra.
- c. Homogeneização do solo com água salobra até superar o limite de liquidez do solo.
- d. Conversão do solo mole para os reservatórios EO e PAD simultaneamente.
- e. Instalação dos drenos condutores elétricos no reservatório EO e dos drenos pré-fabricados no reservatório PAD.
- f. Instalação dos piezômetros e placas de recalque próximos aos drenos cátodo, aos drenos ânodos e no centro da distância entre os mesmos.
- g. Medida da poropressão e da resistência ao cisalhamento não drenada antes da aplicação do método.

- 
- h. Aplicação da camada drenante sobre a camada de solo mole e alinhada aos furos superiores do reservatório.
  - i. Depósito da sobrecarga nos dois reservatórios.
  - j. Medida do acréscimo de poropressão após aplicação da carga.
  - k. Zerar os extensômetros da placa de recalque ou medir a cota inicial.
  - l. Ligar a fonte de alimentação na voltagem de 24 V.
  - m. Fazer a leitura da corrente inicial que transitava pelo solo na fonte de alimentação.
  - n. Abrir os registros contidos nos baldes de recepção da água.
  - o. Acompanhamento do recalque, da perda de poropressão e da quantidade de água drenada no balde de recepção, bem como o desenvolvimento da corrente no reservatório EO.
  - p. No caso do segundo ensaio, fez-se a reversão dos eletrodos após 72 horas e colocou-se na posição normal após 48 horas, de modo intercalado até o término do ensaio.
  - q. Desligar a fonte quando a corrente for considerada pequena para acelerar o deslocamento do solo.
  - r. Fazer as medidas da resistência ao cisalhamento após o término do método eletro-osmótico e normal.

## **7 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Os solos obtidos para a execução, tanto dos ensaios de laboratório, quanto dos ensaios realizados em campo têm características de solo fino da região tropical. Sabe-se que as argilas são sistemas complicados, com variadas condições geológicas de formação, podendo variar na composição mineralógica qualitativa e quantitativamente dentro dos argilo-minerais, como também no grau de substituição isomórfica nos reticulados cristalinos.

Dessa forma, sendo as argilas, na natureza, de dimensões coloidais, diferenças apreciáveis existem nas propriedades físico-químicas, tais como capacidade de troca de cátions, distribuição granulométrica das partículas, área específica, potencial eletrocinético, plasticidade e outras. Contudo, para se ter uma maior confiabilidade e entendimento dos resultados dos ensaios pilotos e eletro-osmóticos, foram executadas análises físicas, químicas e mineralógicas nos solos dos ensaios de pequena escala e escala de campo.

Os ensaios de laboratório foram divididos em duas etapas, sendo que uma é complementar a outra. Na primeira etapa, denominada de etapa A, fez-se uma varredura de ensaios com o solo “JC”, cujo planejamento foi apresentado na Tabela 6.1. Na segunda etapa, etapa B, foi modificado o controle das variáveis concentradas nos ensaios, aplicando-se os melhores parâmetros, em termos de custo-benefício, no solo “EST” com diferentes tipos de materiais como eletrodos. Seu planejamento foi apresentado na Tabela 6.2.

Nos ensaios em campo foram aplicadas as variáveis ótimas encontradas em laboratório, dividindo-as em duas fases isoladas, onde a fase 1 foi utilizado o método eletro-osmótico no modo normal e na fase 2 o modo reverso de polaridade.

### **7.1. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO – ETAPA A**

#### **7.1.1. ANÁLISES FÍSICAS**

Para a identificação do solo coletado a partir das partículas que o constituem, foram feitas duas análises físicas: análise granulométrica e os índices de Atterberg.

As análises granulométricas realizadas nas amostras do solo natural ocorreram de três formas: pela norma da ABNT NBR 7181/84, com defloculante e com apenas água destilada, e também substituindo a água destilada por água salgada, simulação da água do mar (33 g/L) e água salobra (16,5 g/L). Essa modificação foi feita para se analisar a influência do sal sobre o grau de agregação do solo estudado e para ajudar no entendimento de como a agregação poderá influenciar no deslocamento da corrente nos ensaios eletro-osmóticos. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.1.

A Tabela 7.2 apresenta os limites de Atterberg ( $w_p$  e  $w_L$ ) e os índices de plasticidade ( $I_p$ ) e de atividade ( $I_A$ ) do solo realizado por meio das normas da ABNT NBR 7180/84 e NBR 6459/84. Também com o intuito de avaliar a influência do sal no comportamento da plasticidade, realizaram-se os ensaios dos limites de Atterberg de forma modificada, ou seja, substituição de água destilada por água salgada.

#### 7.1.1.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A Tabela 7.1 mostra a distribuição granulométrica da porção fina da amostra do solo proveniente da jazida do Jôquei Clube. A análise granulométrica realizada com defloculante foi denominada de amostra “JC-0”; a análise sem um único tipo de defloculante foi chamada de amostra “JC-1”; a análise diferenciada, utilizando a água disposta no ensaio, por isso chamada de análise granulométrica modificada, com a simulação da água salobra foi executada com a amostra “JC-2” e com a simulação da água do mar, foi feita com a amostra “JC-3”.

**Tabela 7.1** - Análises granulométricas realizadas em amostras de solos naturais.

<b>Análise Granulométrica ABNT NBR 7181/84 Com defloculante</b>					<b>Análise Granulométrica ABNT NBR 7181/84 Sem defloculante</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>JC-0</b>	31,3	10,8	57,6	2,79	<b>JC-1</b>	92,7	3,4	3,6	2,79
<b>Análise Granulométrica Modificado Com Água do Mar</b>					<b>Análise Granulométrica Modificado Com Água Salobra</b>				
<b>Amostra</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Amostra</b>	<b>Areia (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Argila (%)</b>	<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>JC-3</b>	89,6	8,9	1,2	2,68	<b>JC-2</b>	90,5	7,2	1,9	2,73

---

A análise granulométrica com uso de defloculante mostrou que a fração granulométrica argila é relativamente maior que a fração silte. Isso se deve, fundamentalmente, ao grau de intemperismo imposto ao solo, mostrando que a amostra JC do solo extraído foi intemperizada, pois, quanto mais intemperizado se apresentar um solo, menor será a dimensão dos seus minerais de argila e oxi-hidróxidos constituintes (Tardy, 1993). Desse modo, um horizonte de solo mais superficial (maior grau intempérico) apresenta proporcionalmente granulometria mais argilosa quando comparada aos horizontes subsuperficiais (menor grau intempérico) que são mais siltosos, conforme encontrado por Martins (2000) ao utilizar Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) sobre amostras indeformadas (torrões), oriundas de vários perfis de intemperismo da região do DF.

O uso de hexametáfosfato de sódio (defloculante) na análise granulométrica, como era de se esperar, foi de fundamental importância para a desagregação das partículas mais finas, aspecto facilmente identificado na Tabela 7.1.

Comparando os resultados das análises granulométricas sem defloculante na Tabela 7.1, ou seja, utilizando apenas água destilada (amostra JC-1) e água salgada (amostra JC-2 e JC-3), observou-se que a presença de sal teve uma influência no grau de agregação das partículas do solo, mas em pequena intensidade. Uma pequena percentagem de argila agregou-se quando presente à água salobra e uma percentagem um pouco maior agregou-se quando presente a salinidade equivalente da água do mar. Comportamento similar consta em Nascimento e Murrieta (2005).

Essa agregação tende a aumentar o índice de vazios no ensaio e pode afetar a condutividade hidráulica quando for uma associação representativa, ou seja, quando uma grande quantidade de argila, em percentagem, se unir ao silte ou areia. Como a condutividade eletro-osmótica independe do tamanho dos grãos, esta poderá ser influenciada devido a uma maior quantidade de água salgada contida nos vazios do solo por estar saturado, tendo esta uma concentração eletrolítica que facilita a passagem da corrente e conseqüentemente aumenta a condutividade eletro-osmótica.

A agregação também pode influenciar nos ensaios eletro-osmóticos quando as partículas de argila ficam ao redor das partículas de silte e areia, pois aumenta-se a quantidade de carga negativa nos grãos, influenciando a atração da água nesses ensaios.

Outro detalhe observado na tabela é que a massa específica dos grãos diminui à medida que se aumenta a concentração de sal na água, o que é compreensível porque o peso específico da água do mar é  $1,025 \text{ g/cm}^3$  (Fiori e Carmignani, 2001), desse modo, aumentando o peso específico da água diminui a massa específica dos grãos quando considerado o mesmo volume e estrutura do solo.

### 7.1.1.2. ÍNDICES DE ATTERBERG

A Tabela 7.2 apresenta os resultados dos índices de Atterberg e das atividades do solo estudado, de forma normal (amostra JC-1) e modificado (amostra JC-2 e JC-3), ou seja, substituindo água destilada por água salgada.

**Tabela 7.2 - Índices de Atterberg e de atividade.**

<b>Índices de Atterberg Normal</b>				
<b>Amostra</b>	<b>w<sub>L</sub></b> (%)	<b>w<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>A</sub></b>
<b>JC-1</b>	37	30	7	0,12
<b>Índices de Atterberg Modificado (Água Salobra)</b>				
<b>Amostra</b>	<b>w<sub>L</sub></b> (%)	<b>w<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>A</sub></b>
<b>JC-2</b>	37	28	9	4,74
<b>Índices de Atterberg Modificado (Água do Mar)</b>				
<b>Amostra</b>	<b>w<sub>L</sub></b> (%)	<b>w<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>P</sub></b> (%)	<b>I<sub>A</sub></b>
<b>JC-3</b>	36	26	10	8,33

O limite de liquidez ( $w_L$ ) apresentou valor relativamente igual, tanto na metodologia normal quanto na modificada. O limite de plasticidade ( $w_p$ ) diminuiu à medida que a concentração salina da água aumentou, ou seja, o limite de plasticidade é inversamente proporcional à concentração salina da água. Como o índice de plasticidade ( $I_p$ ) de um solo é dado pela diferença entre os limites de liquidez e de plasticidade, pode-se concluir que, no solo estudado, o índice de plasticidade cresce com o aumento da concentração salina do meio.

A plasticidade foi maior no solo homogeneizado somente com água destilada porque tinha uma maior quantidade de argila ativa no estado natural, ou seja, sem defloculante. Sabendo-se, pela análise granulométrica apresentada, que à medida em que aumenta a concentração salina da água ocorre a agregação do solo e, portanto, a diminuição da superfície específica.

---

Assim, pode-se observar na tabela que, ocorreu um acréscimo dos limites de Atterberg em função do aumento da superfície específica no solo.

Outro fator interessante quando se compara o resultado dos ensaios feitos com a metodologia normal com o modificado é que a presença do sal aumentou a faixa de valores em que o solo se apresenta plástico, o índice de plasticidade do solo. A explicação para esse fato é realizada com a ajuda do resultado do ensaio de difratômetro de Raio X (Tabela 7.7), porque este comprova a presença do argilomineral caulinita e dos sesquióxidos, confirmando que o solo estudado é predominantemente intemperizado. A caulinita, com teor de sódio, necessita de um menor teor de água para apresentar plasticidade, isto porque o sódio reduz a força de ligação da água entre as partículas. Diminuindo a força de ligação, diminui a força de cisalhamento necessária para o deslizamento das partículas; conseqüentemente, diminui o limite de plasticidade, conforme indica a tabela de índices de Atterberg e de atividade.

Conforme a classificação dos solos baseados no IP (IAEG, 1979), o solo estudado é classificado como moderadamente plástico visto que os IPs encontrados estão entre a faixa de 7 e 17, faixa determinada na classificação de IAEG (1979).

Fiori e Carmignani (2001) garantem que a matéria orgânica presente no solo eleva o valor do  $W_p$  sem elevar simultaneamente o  $W_L$ , por isso, tais solos apresentam baixos valores para IP. Adiantando os resultados da análise química, identificou-se que a amostra JC-1 (solo natural), continha maior quantidade de matéria orgânica que a amostra JC-2 (solo com água salobra), confirmando a afirmação de Fiori e Carmignani (2001), já que o limite de liquidez continuou aproximadamente o mesmo e o limite de plasticidade diminuiu com a diminuição da quantidade de matéria orgânica (Tabela 7.2). Fiori e Carmignani (2001) também afirmam que as argilas são tanto mais compressíveis quanto maior for o IP, afirmação não constada nos ensaios pilotos realizados.

Os Índices de Atividade ( $I_A$ ) indicam a influência dos finos argilosos no comportamento dos solos. Segundo Skempton (1953), quando se quer ter uma idéia sobre a atividade da fração argila, os índices devem ser comparados com a fração argila presente. A argila presente num solo é considerada normal quando seu índice de atividade se situa entre 0,75 e 1,25. Quando o índice é menor que 0,75, considera-se argila inativa e, quando o índice é maior que 1,25, ela é considerada ativa.

---

O solo plástico pertencente a amostra JC-1 é, em relação ao  $I_A$ , definido como solo ativo (0,12). Ao se fazer o ensaio com água salgada, observou-se que a atividade na amostra JC-2 mais que dobrou e na amostra JC-3 quadruplicou comparados com o primeiro mostrado, tornando-se um solo muito ativo. Dessa forma, parece que o sal aumentou, consideravelmente, a atividade presente na fração argila do solo, passando-se de um solo ativo para um solo muito ativo, podendo considerar que houve uma maior influência nas propriedades químico-coloidais da fração argila nas propriedades geotécnicas. Essa maior atividade em solos com maior concentração eletrolítica poderá ter influenciado a eficiência eletro-osmótica nos ensaios realizados.

### 7.1.2. ANÁLISES QUÍMICAS

As diversas espécies mineralógicas apresentam composições químicas diferentes, quer devido às estruturas cristalinas (silicatos de alumínio hidratados), quer devido às substituições isomórficas (por exemplo,  $Al^{3+}$  substituindo  $Si^{4+}$ ), quer devido aos cátions trocáveis (por exemplo,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ ). Portanto, quimicamente, os argilominerais são compostos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo ainda, geralmente, certo teor de elementos alcalinos e alcalinos-terrosos.

Dessa forma, uma análise química no solo natural (amostra JC-1) foi realizada para os micronutrientes que são elementos importantes na composição dos solos. Seus resultados estão apresentados na Tabela 7.3.

**Tabela 7.3** - Análise química no solo natural quanto aos teores dos micronutrientes.

<b>Amostra</b>	<b>B</b> <i>ppm</i>	<b>Cu</b> <i>ppm</i>	<b>Fe</b> <i>ppm</i>	<b>Mn</b> <i>ppm</i>	<b>Zn</b> <i>ppm</i>	<b>S</b> <i>ppm</i>
<b>JC-1</b>	0,02	4,38	45,7	9,26	8,25	7,1

O conjunto das análises químicas dos solos estudados reflete o intemperismo nas regiões tropicais. De acordo com a tabela, há um maior enriquecimento do ferro disponível, evidenciando o intemperismo sofrido pelo solo. Conforme os critérios adotados no anexo 4, os elementos cobre (Cu) e zinco (Zn) também se destacam por terem alto teor no solo.

Outros tipos de análises químicas foram realizados no solo natural, para uma maior compreensão do comportamento dos argilominerais presentes. São basicamente as duas formas de pH (em água e cloreto de potássio) mais uma análise com a presença de água

salgada, a capacidade de troca catiônica (CTC), cátions trocáveis, teor de matéria orgânica (MO), ponto de carga zero (PCZ) e potencial elétrico de superfície, cujos resultados estão expostos na Tabela 7.4.

**Tabela 7.4** - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis, teor de matéria orgânica (MO) e PCZ.

Amostra	pH KCl	pH H <sub>2</sub> O	$\Delta$ pH	pH Água Salobra	pH Água do Mar	CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	PCZ
JC-1	7,43	7,30	+ 0,13	7,03	6,94	5,6	7,56
Amostra	MO (g/Kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	$\Psi_0$ (mV)
JC-1	15,1	2,9	0,6	0,17	0,05	1,9	15,37

Tanto o pH em H<sub>2</sub>O, quanto em KCl, mostram que o solo analisado é fracamente básico. O pH pode ser considerado alto para os solos comumente analisados no Distrito Federal, provavelmente devido à uma relativa aproximação do depósito de argila às células de lixo e possível contato com chorume. O pH para água salgada poderá ser considerado neutro, tendendo para básico no solo misturado com a simulação da água salobra e ácido na mistura com a simulação da água do mar (Tabela 7.4).

A diferença entre os dois primeiros resultados de pH ( $\Delta$ pH) é a indicação do parâmetro de avaliação do perfil de intemperismo, onde mostra-se positiva para a amostra JC-1. Isso significa que, no solo estudado, ocorre a predominância de óxido hidróxido de ferro e alumínio sobre os minerais de argila. Os óxidos de ferro e alumínio quando hidratados apresentam propriedades cimentantes que contribuem para o processo de formação das concreções lateríticas.

Dos elementos trocáveis, destacaram-se na amostra natural os elementos cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg). Santos (1975) afirma que o efeito do cátion-cálcio (ou magnésio) nas argilas é oposto ao do sódio: uma argila caulínítica ou ilítica, na forma cálcica ou magnesiana, é mais plástica que na forma sódica, isto é, o limite de plasticidade na forma cálcica ou magnesiana é superior ao da forma sódica. Essa tendência também foi observada na Tabela dos Limites de Atterberg e de atividade, onde o limite de plasticidade foi maior na amostra JC-1 (natural) comparado com as amostras JC-2 e JC-3 que continham o sódio inserido por meio da homogeneização com água salobra e água do mar, respectivamente.

Os argilominerais têm capacidade de troca de íons, isto é, têm íons fixados na superfície, entre as camadas e dentro dos canais do retículo cristalino que podem ser trocados por reação

---

química por outros íons em solução aquosa, sem que isso venha a trazer modificação de sua estrutura cristalina. Desse modo, a capacidade de troca iônica é uma propriedade importante dos argilominerais, visto que os íons permutáveis influem poderosamente sobre as suas propriedades físico-químicas.

Segundo os critérios de avaliação recomendados por Catani *et al.* (1955) para a capacidade de troca catiônica (CTC), pode-se considerar que os solos são considerados de baixa CTC quando é menor que 4,62 cmol<sub>c</sub>/kg e de média CTC entre 4,62 a 11,30 cmol<sub>c</sub>/kg. De acordo com a tabela e conforme critérios adotados no anexo 4, o solo estudado é considerado de média capacidade de troca catiônica, este valor pode ser reflexo da mediana quantidade de matéria orgânica presente no solo (15,1 g/Kg), de acordo com o critério do anexo em questão, pois as posições da permuta podem ter sido bloqueadas pela matéria orgânica como também por ferro e alumínio presentes nos solos intemperizados.

O PCZ foi determinado por meio da Equação 2.9 elaborada por Keng e Uehara (1974). Foi encontrado o valor do pH inferior ao PCZ ( $\text{pH} < \text{PCZ}$ ), o que significa que as cargas positivas são as predominantes. Assim, a água com predominância das cargas positivas (cátions) vai em direção ao eletrodo cátodo, que é a forma mais comum no sistema água – solo. Da mesma forma, o potencial elétrico foi calculado pela Equação 2.10, simplificada por Raij e Peech (1972), considerando o ponto de efeito salino nulo (PESN) da equação como sendo o PCZ. Esta consideração foi feita pelo fato do PCZ ser considerado o ponto no qual o balanço entre todas as cargas, inclusive as permanentes, ser zero, enquanto o PESN estaria relacionado somente com as cargas variáveis (Sposito, 1981). O valor do potencial elétrico (15 mV), foi a magnitude necessária para realizar o trabalho do deslocamento de uma carga positiva de seu estado de referência (no fluido, externo à DCD) para um ponto qualquer do campo elétrico (DCD).

Análises químicas foram também realizadas após término do ensaio. Dentre os ensaios do planejamento, fizeram-se as análises químicas após término do ensaio eletro-osmótico - solo homogeneizado com água salobra, com 50 kPa de carga e voltagem de 15V (Ensaio 14). Obteve-se dessa amostra, denominada de amostra JC-4, os elementos dos micronutrientes que são importantes na composição do solo, que estão devidamente apresentados na Tabela 7.5. Obteve-se, também, o pH em água salgada, a capacidade de troca catiônica (CTC), cátions trocáveis e o teor de matéria orgânica (MO), que estão expostos na Tabela 7.6.

**Tabela 7.5** - Análise química no solo quanto aos teores dos micronutrientes – após ensaio EO.

Amostra	B <i>ppm</i>	Cu <i>ppm</i>	Fe <i>ppm</i>	Mn <i>ppm</i>	Zn <i>ppm</i>	S <i>ppm</i>
JC-4	0,02	22,6	14,7	7	19,3	8,4

**Tabela 7.6** - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis e teor de matéria orgânica (MO) – após ensaio EO.

Amostra	pH H <sub>2</sub> O	pH Água Salobra	CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	MO (g/Kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )
JC-4	7,26	7,03	10,5	11	2,6	0,6

Amostra	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )
JC-4	0,17	5,2	1,9

Fazendo-se uma comparação dos resultados das análises das amostras JC-1 (amostra natural, antes do ensaio EO) e JC-4 (após ensaio EO), quanto aos micronutrientes, observa-se que houve um aumento considerável no teor de zinco e, principalmente, de cobre. Esse aumento era previsível devido à presença dos eletrodos de cobre no ensaio eletro-osmótico que foram desgastados com o tempo. No entanto, o elemento ferro passou de altamente disponível para uma baixa disponibilidade, provavelmente, por ser um solo intemperizado, ocorrendo a lixiviação desse elemento no decorrer do ensaio eletro-osmótico.

É importante destacar que os solos têm uma capacidade limitada de adsorver cátions. A capacidade de troca catiônica (CTC) pode ser definida como a quantidade total de cátions trocáveis que um solo pode adsorver, ou melhor, a CTC é dada pela soma das cargas positivas dos cátions adsorvidos a qual é igual à soma das cargas negativas superficiais.

Desse modo, continuando com a comparação das duas amostras, agora com relação aos elementos trocáveis, a amostra JC-4 apresentou um teor de sódio bastante elevado em virtude da homogeneização do solo natural com água salobra. Isso caracteriza que ocorreu a substituição isomórfica no solo, ou seja, o cátion de Na<sup>+</sup>, livre no solo, foi atraído e adsorvido para a superfície das partículas de argila, as quais possuem normalmente carga de superfície negativa.

Também em relação à amostra JC-4, a capacidade de troca catiônica passou a ser classificada como alta por estar acima de 9,0 Cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>. Esse aumento provavelmente ocorreu por causa da queda da quantidade de matéria orgânica classificada como baixa, como também devido à lixiviação do ferro disponível, permitindo uma maior permuta dos cátions presentes. Isso

---

mostra que, se a CTC passou a ser classificada como alta, é porque existe uma grande quantidade de cargas positivas como cátion trocável, como se pode notar na Tabela 7.5, e, conseqüentemente, uma grande quantidade de cargas negativas na superfície das partículas.

Essa melhor capacidade de permuta dos cátions, ou seja, o aumento da capacidade de troca catiônica e grande quantidade de cargas negativas presentes nas partículas, deve ter influenciado diretamente na condução e drenagem da água dos ensaios eletro-osmóticos realizados.

### 7.1.3. ANÁLISES MINERALÓGICAS

Para a determinação da composição mineralógica dos solos, foram feitas análises com difratômetro de Raio-X (DRX) na amostra natural (JC-1), na amostra homogeneizada com água salobra (JC-2) e água do mar (JC-3). Os argilominerais presentes nas amostras encontram-se na Tabela 7.7.

**Tabela 7.7** - Resultados das análises de DRX.

<b>Amostra</b>	<b>Quartzo</b>	<b>Caulinita</b>	<b>Gibbsita</b>	<b>Hematita</b>	<b>Halita</b>
<b>JC-1</b>	X	X	X	X	
<b>JC-2</b>	X	X	X	X	X
<b>JC-3</b>	X	X	X	X	X

Como indica a Tabela 7.7, nos solos tropicais superficiais existe a presença do grupo da caulinita e um teor elevado de óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Esses oxihidróxidos apresentam-se sob a forma de gibbsita ( $Al(OH)_3$ ) e hematita ( $Fe(OH)_3$ ) que, normalmente, recobrem ou fazem ligações entre os argilominerais. No mineral primário é comum a presença do quartzo devido a sua elevada resistência ao intemperismo, pois o quartzo é o mineral primário mais importante e forma, praticamente, a quase totalidade da fração areia dos solos estudados, uma vez que não são encontrados outros minerais típicos desta fração, como feldspatos e carbonatos que, evidentemente, foram solubilizados sob as condições regionais de intemperismo químico.

Por causa da homogeneização do solo com água salgada, as amostras JC-2 e JC-3 apresentam uma porção de halita, que tem entre as camadas estruturais o cátion sódio predominante.

Toda essa composição mineralógica é importante para confirmar a relação existente entre os resultados das análises físicas e químicas e poder melhor interpretar os resultados da análise eletro-osmótica a seguir.

---

#### **7.1.4. ANÁLISES ELETRO-OSMÓTICAS**

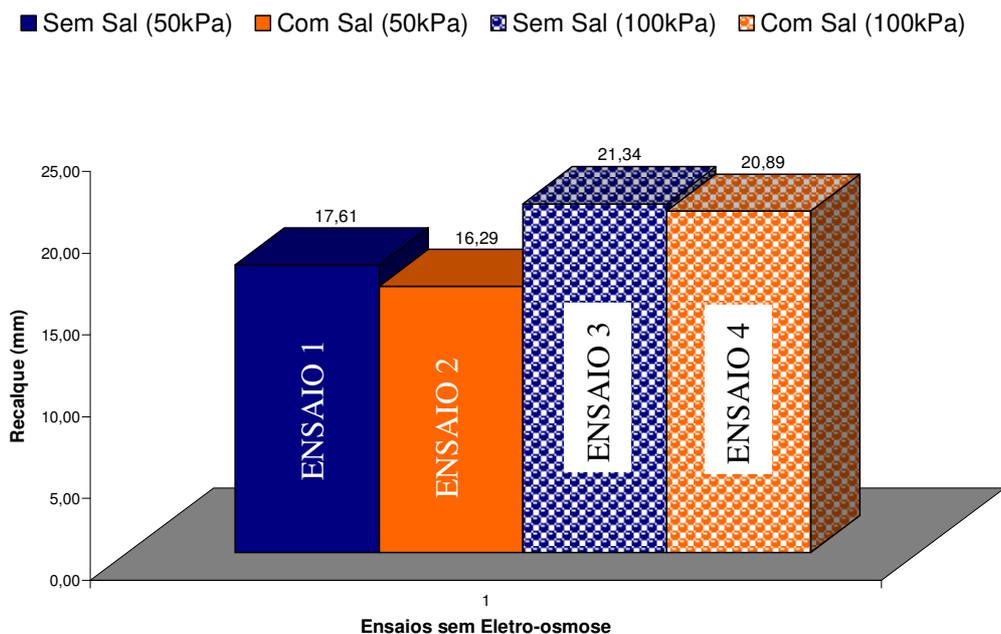
Para o entendimento do fenômeno eletro-osmótico na consolidação de solos tropicais argilosos de consistência mole, foram feitos ensaios em laboratório no modelo físico já descrito. Inicialmente foram realizados ensaios pilotos, os quais não utilizaram os drenos condutores elétricos (DCEs), e sim os drenos verticais pré-fabricados (DVPs), em diferentes meios: solo homogeneizado com água limpa, com água salobra (16,5 g/L) e com água do mar (33 g/L).

Em seguida, realizaram-se ensaios eletro-osmóticos com as mesmas características dos ensaios pilotos e no mesmo meio. Acompanhou-se a evolução dos recalques e mediu-se a resistência ao cisalhamento não drenada do solo, antes e após cada ensaio. Por conseguinte, compararam-se os ensaios pilotos e os ensaios eletro-osmóticos entre si, como também fez-se a comparação entre os dois tipos de ensaios, para se conseguir otimizar as variáveis eletro-osmóticas encontradas.

##### **7.1.4.1. ENSAIOS PILOTOS**

Os ensaios pilotos ou ensaios sem o uso da eletro-osmose foram apresentados na Tabela 6.1 onde foram identificados, conforme suas características, como ensaio 1, 2, 3 e 4. A diferença entre esses ensaios, além da carga aplicada, é que os ensaios 1 e 3 não foram adicionados sal na água de homogeneização e os ensaios 2 e 4 foram adicionados sal na água para se trabalhar com a concentração da água do mar. As amostras preparadas para o corpo da célula tinham em todos os ensaios, no tempo inicial, aproximadamente a mesma umidade, altura e resistência ao cisalhamento.

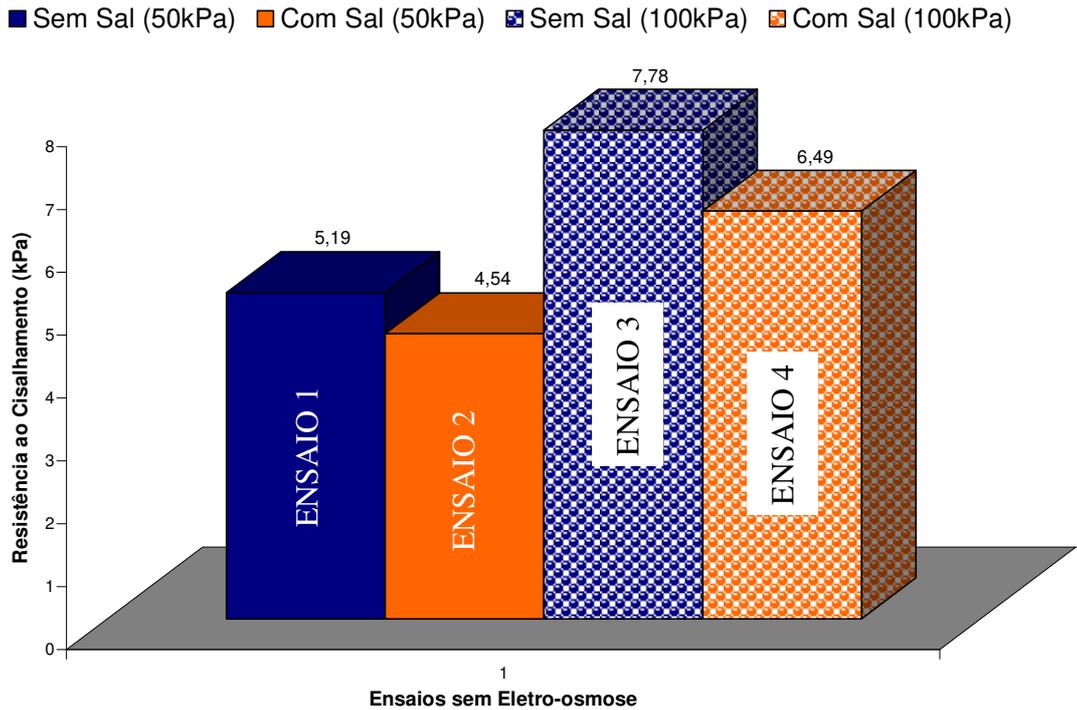
Para se ter uma melhor análise e uma comparação real dos resultados obtidos com os ensaios EO, fizeram-se os gráficos de recalques com a duração de 24 horas, pois existiram alguns ensaios EO que tiveram menos de 24 horas de duração, devido à quebra dos eletrodos decorrente do ataque de corrosão, fato que será melhor explicado mais adiante. Logo, as Figuras 7.1 e 7.2 apresentam os resultados dos recalques com duração de 24 horas de ensaio e da resistência ao cisalhamento do solo no final do ensaio, respectivamente.



**Figura 7.1** - Resultados dos recalques em 24 horas de ensaios pilotos.

Avaliando-se os ensaios pilotos, observou-se que houve um recalque um pouco maior nos solos que não foram homogeneizados com água salgada nas mesmas condições de carga, obtendo-se uma diferença de 1,32 mm nos ensaios de 50 kPa (ensaio 1 e 2) e 0,45 mm nos ensaios de 100 kPa (ensaio 3 e 4). No entanto, esta diferença de recalque é na ordem de milímetro, podendo se considerar desprezível. Logo, esse resultado, se considerado, vai se confrontar com a afirmação feita por Fiori e Carmignani (2001) na etapa da análise física. Esses autores afirmaram que as argilas são tanto mais compressíveis quanto maior for o IP, porém, aqui os IPs foram maiores nos ensaios pilotos com água salgada (ensaio 2 e 4), os quais apresentaram menores recalques.

A mesma tendência pode ser vista na Figura 7.2 nos resultados da resistência ao cisalhamento no final dos ensaios pilotos. Ocorreu uma resistência um pouco maior nos solos que não foram homogeneizados com água salgada, diferença de 0,65 kPa nos ensaios de 50KPa de carga aplicada (ensaio 1 e 2) e 1,21 kPa nos ensaios de 100 KPa (ensaio 3 e 4). Esses valores encontrados não poderão ser desprezados porque são maiores que 10% do total da resistência de cada ensaio. Portanto, essa maior resistência ao cisalhamento nos solos que não foram homogeneizados com água salgada pode ser explicado por meio da influência do sódio como cátion trocável nas argilas caulínicas. Isso, porque o sódio reduz a rigidez da água adsorvida e, portanto, a força de ligação causada pela água rígida entre as partículas. Diminuindo a força de ligação, diminui a força de cisalhamento necessária para o deslizamento das partículas lamelares entre si e diminui o torque necessário para a ruptura do solo.



**Figura 7.2** - Resultados da resistência ao cisalhamento após término dos ensaios pilotos.

#### 7.1.4.2. ENSAIOS ELETRO-OSMÓTICOS

Os ensaios eletro-osmóticos também estão apresentados na Tabela 6.1 e foram classificados como ensaios de 5 a 15, diferenciando-se pela quantidade de carga aplicada, pela diferença de potencial (DDP) e pela concentração de sal no meio. Destaca-se que as amostras preparadas para o corpo da célula tinham aproximadamente a mesma umidade, altura e resistência ao cisalhamento, inicial, em todos os ensaios.

A partir das etapas descritas na metodologia, foram feitas leituras de voltagem e da corrente que atravessava a massa de solo logo após ligar a fonte de alimentação. Salienta-se que a fonte utilizada nos ensaios era regulável e estabilizada, ou seja, determinava-se uma corrente ou uma tensão sempre fixa e essa ajustava-se automaticamente para manter um componente (tensão ou corrente) sempre estável. Dessa forma, fixou-se a tensão (5V, 15V e 25V) e encontrou-se uma corrente da forma estável.

Foram realizadas leituras de condutividade no solo homogeneizados com água pura, água salobra e água do mar para se ter um maior entendimento dos valores de corrente obtidos no tempo inicial do ensaio ( $t = 0$  horas). A Tabela 7.8 mostra os parâmetros eletro-osmóticos encontrados com algumas características fundamentais de cada ensaio.

**Tabela 7.8** - Voltagem aplicada, condutividade e intensidade de corrente que atravessa o solo.

<b>Ensaio</b>	<b>Voltagem (V)</b>	<b>Corrente [t=0](A)</b>	<b>Condutividade (mS/cm)<sub>(T=25°C)</sub></b>	<b>Carga (KPa)</b>	<b>Meio</b>
<i>Ensaio 5</i>	5	0	0,020	50	Água Pura
<i>Ensaio 6</i>	25	0,07 x 10 <sup>-6</sup>	0,020	50	Água Pura
<i>Ensaio 7</i>	5	0,63	13,1	50	Água do Mar
<i>Ensaio 8</i>	15	2,59	13,1	50	Água do Mar
<i>Ensaio 9</i>	25	3,71	13,1	50	Água do Mar
<i>Ensaio 10</i>	5	0,82	13,1	100	Água do Mar
<i>Ensaio 11</i>	15	4,82	13,1	100	Água do Mar
<i>Ensaio 12</i>	25	6,74	13,1	100	Água do Mar
<i>Ensaio 13</i>	5	0,39	7,4	50	Água Salobra
<i>Ensaio 14</i>	15	1,32	7,4	50	Água Salobra
<i>Ensaio 15</i>	25	1,97	7,4	50	Água Salobra

Comparando-se os resultados dos ensaios apresentados, observou-se que no ensaio 5, diferença de potencial de 5V com 50 kPa de carga e homogeneizado com água pura, nenhuma corrente atravessou a massa do solo de um eletrodo ao outro e no ensaio 6, com as mesmas características do ensaio anterior aumentando-se apenas a diferença de potencial para 25 V, houve uma pequena corrente, na escala de microamperes. Foi praticamente nula a passagem de corrente entre os eletrodos nesses ensaios, isso devido à baixíssima condutividade existente nesse meio, da ordem de microsiemens por cm, mostrando uma alta resistência elétrica e, consequentemente, alta resistividade do solo.

O conjunto das análises físicas, químicas e mineralógicas pode também explicar o motivo da corrente dos ensaios 5 e 6 ter valores ínfimos, pois como o solo analisado foi intemperizado, existe óxido e hidróxido de ferro e alumínio e matéria orgânica que devem ter interferido na CTC que foi classificada como mediana e, consequentemente, na quantidade de íons livres presentes na água livre; como também os cátions trocáveis que mais se destacaram nestes ensaios foram o cálcio e o magnésio, que tendem a manter a película adsorvida de água muito rígida, dificultando a troca. Estes não são elementos que aumentam a condutividade elétrica.

Desse modo, os valores de corrente dos ensaios 5 e 6 sugerem que o processo eletro-osmótico praticamente não ocorreu e os resultados do recalque e resistência ao cisalhamento

---

comprovam a afirmação, pois foram muito próximos dos resultados dos ensaios pilotos que não usaram EO.

Para os outros ensaios que foram homogeneizados com água salgada, mediu-se corrente na escala de amperes. Os valores de corrente encontrados no início dos ensaios se devem, principalmente, à condutividade de aproximadamente 77% maior do solo homogeneizado com água do mar em relação ao da água salobra. Assim, as correntes encontradas nos solos homogeneizados com água e sal pode fornecer uma boa eficiência a técnica da eletro-osmose.

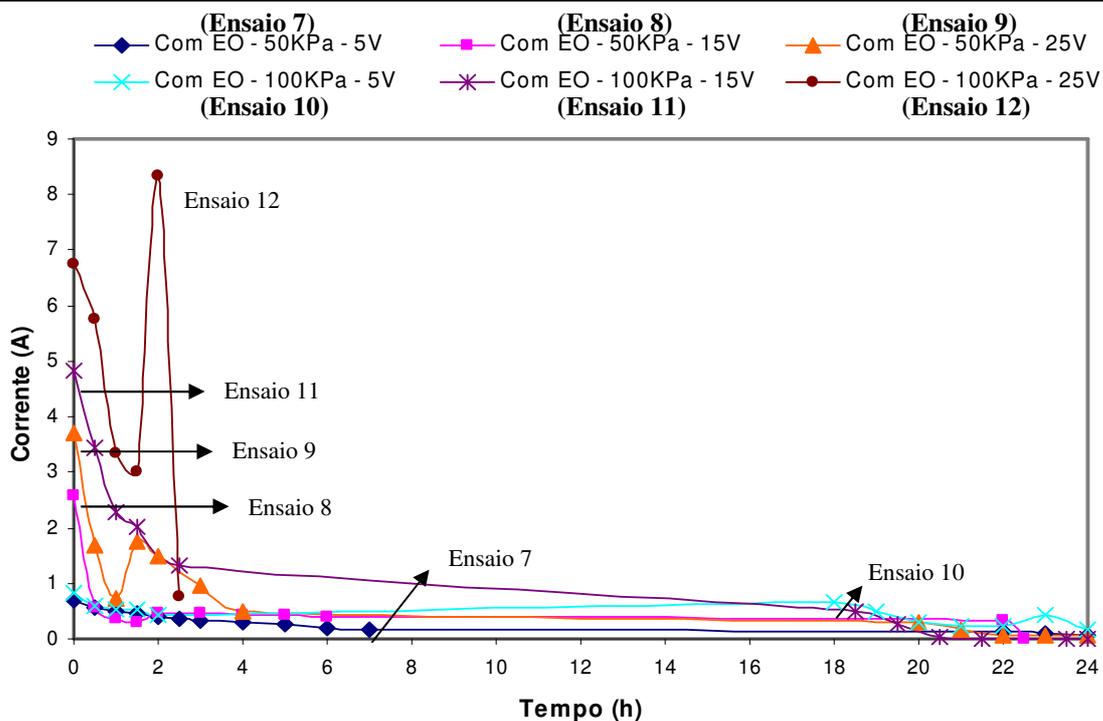
Sabe-se que a economia e eficiência da extração de água por eletro-osmose são governadas pela quantidade de água transferida por carga unitária, que é quantificada pela eficiência eletro-osmótica de transporte de água,  $K_i$ . Este parâmetro  $K_i$  está relacionado à permeabilidade eletro-osmótica e a condutividade elétrica do solo.

Hamed *et al.* (1991) mostram que a permeabilidade eletro-osmótica,  $K_e$ , varia dentro do intervalo  $1 \times 10^{-8}$  a  $1 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s/V; e discutem que os valores mais altos são para solos de grãos finos com baixa atividade e com maiores quantidades de água. Para este solo argiloso, encontrou-se o valor de  $K_e$  por meio da equação 3.3, com os resultados entre  $1,2 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s/V a  $1,0 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s/V. Portanto dentro do intervalo encontrado na literatura.

Observa-se na Tabela 7.8 que a condutividade elétrica ( $\sigma_e$ ) do solo homogeneizado com água do mar é 0,0131 S/cm e com água salobra é 0,0074 S/cm, valores que estão um pouco abaixo dos parâmetros avaliados por Mitchell (1991), o qual afirma que a condutividade geralmente varia no intervalo de 0,02-0,035 S/cm para aplicações de campo utilizando a eletro-osmose.

Com estes dois parâmetros do solo ( $K_e$  e  $\sigma_e$ ), aplica-se a Equação 3.2 e chega-se à conclusão que a eficiência eletro-osmótica ( $K_i$ ) dos solos ensaiados encontra-se entre 0 e 1,2 cm<sup>3</sup>/A/s, intervalo no qual, segundo Acar *et al.* (1994), pode-se aplicar eletro-osmose que o tratamento tenderá a ser eficiente. Encontra-se também pela Equação 3.2, que a eficiência eletro-osmótica do solo homogeneizado com água salobra é maior que com água do mar, ou seja, a eficiência da extração da água por eletro-osmose foi maior no meio com água salobra.

Para ajudar a compreender qual o meio que favoreceu a maior eficiência da EO foram feitos gráficos dos resultados do recalque, da resistência ao cisalhamento não drenada do solo e do desenvolvimento da corrente durante 24 horas dos ensaios. A Figura 7.3 apresenta o desenvolvimento da corrente nos ensaios do solo homogeneizado com água do mar.



**Figura 7.3** - Desenvolvimento da corrente nos ensaios realizados com água do mar.

O gráfico mostra a corrente diminuindo com o tempo de forma não linear em todos os ensaios apresentados. A variação da corrente com o tempo ocorre pela variação da resistência do circuito, já que a DDP aplicada entre os eletrodos é constante.

Avaliando-se o desenvolvimento da corrente em 24 horas de ensaio, pode-se observar que o comportamento da corrente nos ensaios de 5V com 50 KPa e 100 KPa (Ensaio 7 e 10) foram muito parecidos nas 5 primeiras horas, inclusive em termos de valores, divergindo um pouco a partir deste momento com uma queda maior da corrente no ensaio realizado com 50 KPa de carga (Ensaio 7). Observa-se, também, que de todos os ensaios realizados neste meio, os de 5V foram os únicos que mantiveram uma relativa constância dos valores de corrente do início até o fim.

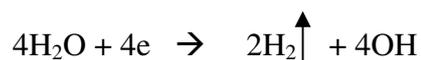
Os ensaios de 15V e 25V com 50 KPa e 100 KPa de carga aplicada (Ensaio 8, 9, 11 e 12) tiveram o comportamento da corrente das primeiras duas horas muito similar, partindo do ponto inicial e caindo de forma mais acentuada. No ensaio de 25V e 100 KPa (Ensaio 12) houve um aumento brusco da corrente com duas horas de ensaio, conseqüentemente, seguindo a lei de Ohm, este aumento baixou a voltagem para aproximadamente 1 V, deixando a fonte totalmente vulnerável devido a estas mudanças bruscas, obrigando a parada deste ensaio com três horas de duração.

---

Um fato interessante nesse gráfico é a quebra do eletrodo com 23 horas de duração no ensaio de 15 V e 50 KPa (Ensaio 8) e com 22 horas de duração no ensaio de 15 V e 100 KPa (Ensaio 11). Pode-se explicar que o eletrodo do ensaio 11 foi um dos primeiros a quebrar devido à corrente se manter sempre elevada comparada aos outros ensaios, levando a aceleração da corrosão. No entanto, o ensaio 8 não apresenta este comportamento e, portanto, ocorreu a quebra provavelmente devido a alguma ponte de sal próxima ao eletrodo.

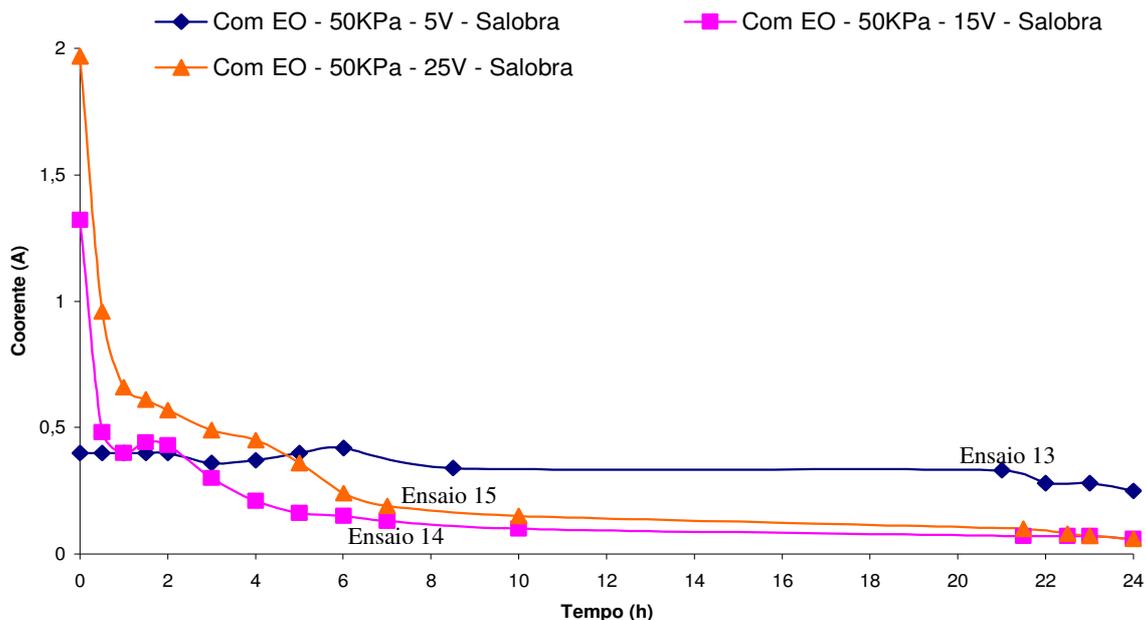
O rompimento dos eletrodos ocorre no GCE ânodo, geralmente por causa da corrosão eletroquímica existente nos ensaios eletro-osmóticos como explicado em Nascimento (2005). Assim, ao acabarem os ensaios, observou-se que os eletrodos quebrados tinham um material esverdeado que aumentava quando próximos do ponto rompido. A explicação da quebra dos eletrodos e surgimento deste resíduo esverdeado é que com a aplicação de tensão, ocorre eletrólise da água gerando bolhas de ar no cátodo formado pela saída do gás hidrogênio. O oxigênio sai na forma de gás no ânodo, oxidando o cobre presente neste meio e formando o hidróxido de cobre ou óxido de cobre hidratado que são substâncias de coloração esverdeada. O mecanismo da corrosão será explicado com maiores detalhes em outro momento mais oportuno, no item 7.2.2.

As reações citadas em Acar *et al.* (1994) mostram o processo de eletrólise da água. A primeira reação ocorre no ânodo e a segunda no cátodo, como apresentado nas reações 3.1 e 3.2.



A velocidade da corrosão eletroquímica depende muito do líquido presente. Neste caso, existe a presença de cloreto de sódio na água, substância extremamente capaz de acelerar a corrosão eletroquímica por meio da eletrólise. No ânodo, íons  $\text{Cl}^-$  são oxidados a  $\text{Cl}_2$  (g), no cátodo, moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  são reduzidas a  $\text{H}_2$  (g) e a íons  $\text{OH}^-$ . Ocorre, desse modo, a reação de decomposição e oxidação do cloreto de sódio.

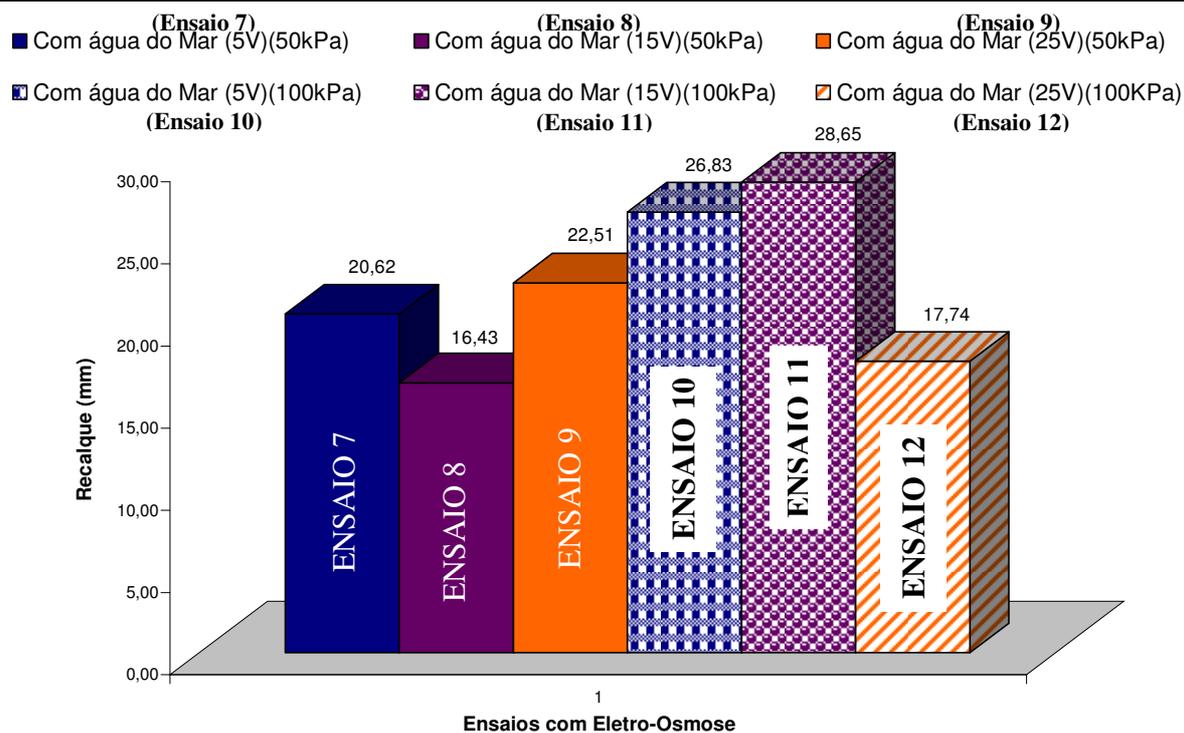
A mesma análise da diminuição da corrente com o tempo pode ser observada nos ensaios dos solos homogeneizados com água salobra (Ensaio 13,14 e 15), conforme mostra a Figura 7.4. Não houve quebra dos eletrodos em 24 horas desse ensaio porque as correntes que passavam pelo solo tinham menor intensidade, demorando mais tempo para ocorrer a eletrólise da água e ataque dos eletrodos, como também a concentração salina era metade da concentração dos outros ensaios.



**Figura 7.4** - Desenvolvimento da corrente nos ensaios realizados com água salobra.

Observa-se, inicialmente, que o ensaio de 5V (Ensaio 13) manteve uma relativa constância dos valores de corrente do início até o fim e que os ensaios de 15V e 25V (Ensaio 14 e 15) foram decrescendo com o tempo, tendo todos o mesmo comportamento dos ensaios realizados com água do mar. É como se no ensaio 13 não ocorresse um aumento considerável da resistência elétrica do solo, ficando todos os parâmetros elétricos (corrente, tensão e resistência) praticamente constantes com o tempo. A constância dos valores do ensaio de 5V está mais definida no ensaio realizado com água salobra do que com água do mar (ver Figura 7.3).

Após analisar os gráficos relacionados ao desenvolvimento da corrente, passa-se para uma etapa sequencial que são as medidas de recalque e resistência não-drenada do solo dos ensaios eletro-osmóticos. As Figuras 7.5 e 7.6 mostram os resultados do recalque e da resistência não-drenada dos solos homogeneizados com água do mar.



**Figura 7.5** - Resultados dos recalques em 24 horas de ensaios eletro-osmóticos com água do mar.

Analisando o gráfico, observa-se que dos ensaios com aplicação de carga de 50 kPa, o que mais recalcou foi o de 25V de diferença de potencial (Ensaio 9). O mesmo destaque, provavelmente, aconteceria nos ensaios com 100 kPa de carga, pois deve-se lembrar que o recalque de 17,74 mm do ensaio 12 foi obtido com apenas 3 horas de duração.

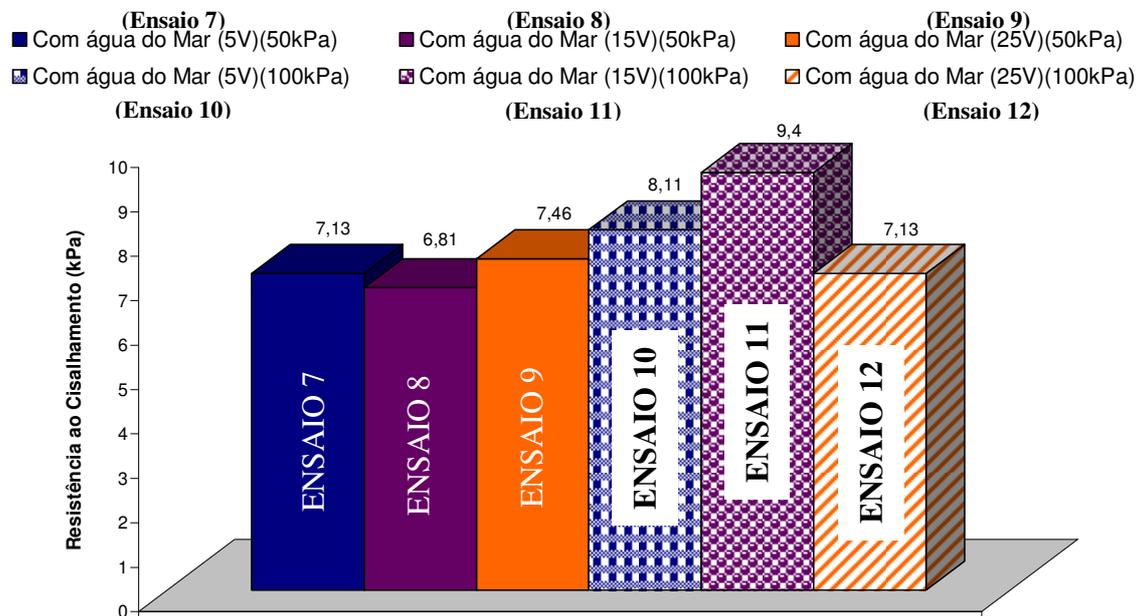
Pode-se explicar o maior recalque dos ensaios de 50 kPa com a ajuda do gráfico de desenvolvimento da corrente (Figura 7.3). Observa-se que a corrente passada de um eletrodo para o outro no ensaio 9 foi maior durante as 4 primeiras horas de ensaio em relação aos outros ensaios de mesma aplicação de carga. O maior valor de corrente deve ter acelerado a condução da água e, conseqüentemente, a expulsão pelo dreno. Trabalhando-se com esse raciocínio nos outros ensaios de mesmo carregamento, o ensaio de 15 V (Ensaio 8) deveria ter um recalque um pouco maior que o ensaio de 5V (Ensaio 7) por a corrente ser, na maior parte do tempo, superior. No entanto, isso não foi possível, provavelmente, devido ao desgaste e quebra do eletrodo.

O mesmo comportamento pode ser aplicado nos ensaios com 100 kPa de carga. No entanto, apesar da quebra do eletrodo no ensaio de 15 V (Ensaio 11), houve um maior recalque nesse ensaio comparado com o ensaio de 5 V (Ensaio 10), devido à corrente de passagem pelo solo do ensaio 11 ser bem maior em mais de 18 horas.

Fazendo-se uma análise da influência do carregamento no recalque dos ensaios eletro-osmóticos com água do mar, escolheram-se os ensaios de 5V (Ensaio 7 e 10), porque estes não tiveram nenhum tipo de problema, como quebra de eletrodo e diminuição brusca da diferença de potencial. Assim, houve um aumento de 30% do recalque nos ensaios de 5 V depois que se dobrou o carregamento de 50 kPa para 100 kPa.

Para se conhecer o ganho de resistência obtido com os ensaios eletro-osmóticos, fez-se a medida de resistência ao cisalhamento do solo antes e após cada ensaio. O valor médio da resistência inicial de todos os ensaios foi de 1,96 kPa, pois os ensaios foram programados para ter a mesma umidade inicial. A Figura 7.6 mostra o valor da resistência ao cisalhamento após cada ensaio eletro-osmótico.

O comportamento do ganho de resistência na Figura 7.6 segue a mesma ordem dos resultados do recalque, tendo, com isso, a mesma justificativa com a ajuda do desenvolvimento da corrente. Um fato interessante é que o ensaio de 25 V e 100 kPa (Ensaio 12), que durou apenas 3 horas, teve a mesma resistência do ensaio de 5 V e 50 kPa (Ensaio 7), que teve uma duração total de 27 horas.



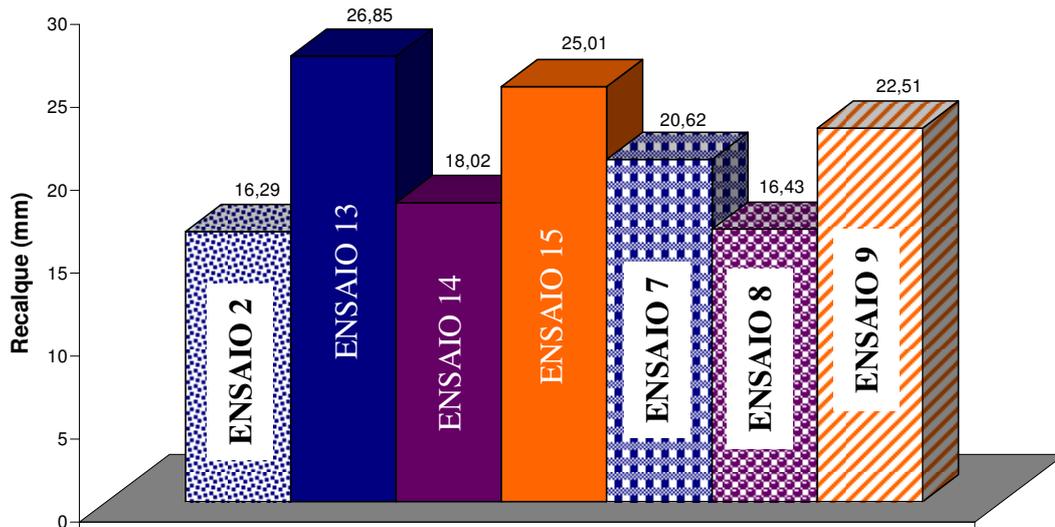
**Figura 7.6** - Resultados da resistência ao cisalhamento do solo dos ensaios eletro-osmóticos.

Fazendo-se a comparação da influência do carregamento na resistência ao cisalhamento, observa-se que a resistência do solo do ensaio de 5 V e 100 kPa (Ensaio 10) é aproximadamente 14% maior que o ensaio de 5 V e 50 kPa (Ensaio 7). Conclui-se que, para o

ensaio de 5 V, quando se dobrou o carregamento houve um aumento do recalque da ordem de 30% e um acréscimo de 14% da resistência ao cisalhamento do solo.

Para entender a influência da concentração eletrolítica nos recalques obtidos e no ganho de resistência ao cisalhamento dos ensaios eletro-osmóticos, colocaram-se os resultados lado a lado como apresentados nas Figuras 7.7 e 7.8, respectivamente.

(Ensaio 2)  Sem EO - Com Sal (50kPa)  Com EO - Salobra (5V)(50kPa) (Ensaio 13)  
 (Ensaio 14)  Com EO - Salobra (15V)(50kPa)  Com EO - Salobra (25V)(50kPa) (Ensaio 15)  
 (Ensaio 7)  Com EO - Com Água do Mar(5V)(50kPa)  Com EO - Com Água do Mar(15V)(50kPa) (Ensaio 8)  
 (Ensaio 9)  Com EO - Com Água do Mar(25V)(50kPa)



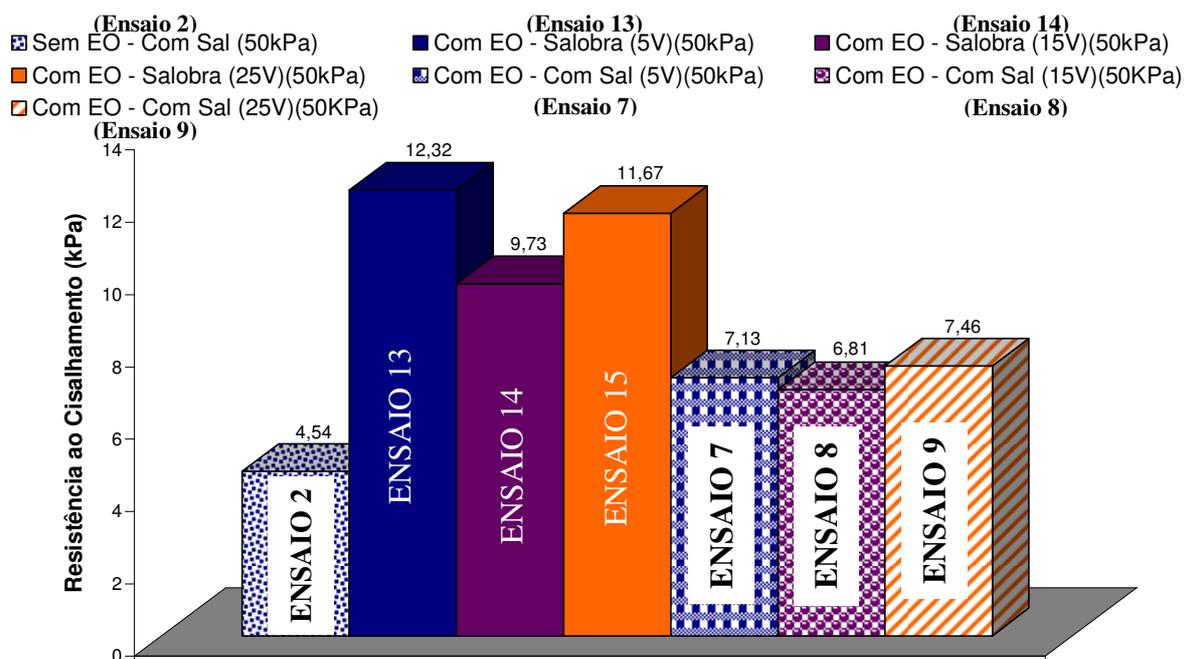
**Figura 7.7** - Resultados dos recalques em 24 horas do ensaio piloto e dos ensaios EO.

A explicação dos recalques obtidos nos ensaios realizados com água salobra baseia-se, também, no desenvolvimento da corrente (Figura 7.4). Observa-se que o maior recalque ocorreu no ensaio de 5 V (Ensaio 13), pois a corrente neste ensaio se manteve praticamente constante e com valor superior durante todo o tempo. O ensaio de 25 V (Ensaio 15) teve um recalque bem maior que o ensaio de 15 V (Ensaio 14), isto porque o desenvolvimento da corrente do ensaio 15 é maior em magnitude do que do ensaio 14.

Fazendo-se uma comparação dos ensaios eletro-osmóticos da Figura 7.7, percebe-se que o ensaio de 5V com solo homogeneizado com água salobra (Ensaio 13) recalcou 30% a mais que o ensaio de mesma voltagem com solo homogeneizado com água do mar (Ensaio 7). Mesma percentagem de aumento de recalque foi obtida quando dobrou a carga aplicada para 100 kPa (Figura 7.5). Assim, para esta voltagem, diminuindo-se pela metade a concentração eletrolítica da água, obteve-se uma corrente mais estável e, na maior parte do tempo, com valor acima do ensaio de comparação. Isso explica o porquê do recalque em percentagem ser igual ao ensaio em mesma condição, mesmo dobrando a carga aplicada.

O ensaio de 15V com água salobra (Ensaio 14) recalçou aproximadamente 10% a mais que o ensaio com água do mar (Ensaio 8) e o ensaio de 25 V com água salobra (Ensaio 15) recalçou aproximadamente 11% mais que o ensaio com água do mar (Ensaio 9). Esses resultados confirmam a conclusão da equação da eficiência eletro-osmótica, mostrando que a eficiência da extração da água por eletro-osmose é maior no meio com água salobra do que no meio com água do mar, pois a corrente no meio com água salobra apresentou mais estabilidade e com maior magnitude.

É importante deixar claro que, ao se avaliarem os resultados do gráfico anterior, houve um grande destaque do ensaio de 5V com água salobra (Ensaio 13). Esse obteve um recalque 65% maior que o ensaio piloto nas mesmas condições. O mesmo comportamento pode ser visualizado na Figura 7.8 da resistência ao cisalhamento dos solos no término do ensaio e em Nascimento e Murrieta (2008).



**Figura 7.8** - Resultados da resistência ao cisalhamento dos solos do ensaio piloto e dos ensaios eletro-osmóticos.

Percebe-se que o ensaio de 5V com solo homogeneizado com água salobra (Ensaio 13) é 73% mais resistente ao cisalhamento que o ensaio de mesma voltagem com solo homogeneizado com água do mar (Ensaio 7). Viu-se, anteriormente que, quando dobrou-se a carga do ensaio de 5V (mudança de 50 kPa para 100 kPa), ocorreu um acréscimo de resistência de 14%, portanto, ao se diminuir a concentração eletrolítica pela metade obteve-se um acréscimo de

---

resistência cinco vezes maior que o acréscimo alcançado quando se dobra a carga aplicada (Figura 7.6). Isso devido a maior uniformização da corrente durante o ensaio.

O ensaio de 15V com água salobra (Ensaio 14) teve uma resistência 43% a mais que o ensaio com água do mar (Ensaio 8) e o ensaio de 25 V com água salobra (Ensaio 15) teve um acréscimo de resistência de 56% comparado ao ensaio com água do mar (Ensaio 9).

A proporção dos resultados da resistência não está em conformidade com o esperado dos recalques expostos. Um fator que deve ter contribuído para estes valores desproporcionais é que muito dos ensaios duraram mais de 24 horas e o recalque colocado nos gráficos foram com 24 horas de ensaio para viabilizar as comparações. No entanto, o comportamento geral é claramente notado, destacando-se novamente o ensaio de 5V com água salobra (Ensaio 13). O “ensaio 13” obteve 170% de acréscimo de resistência em comparação com o ensaio piloto nas mesmas condições.

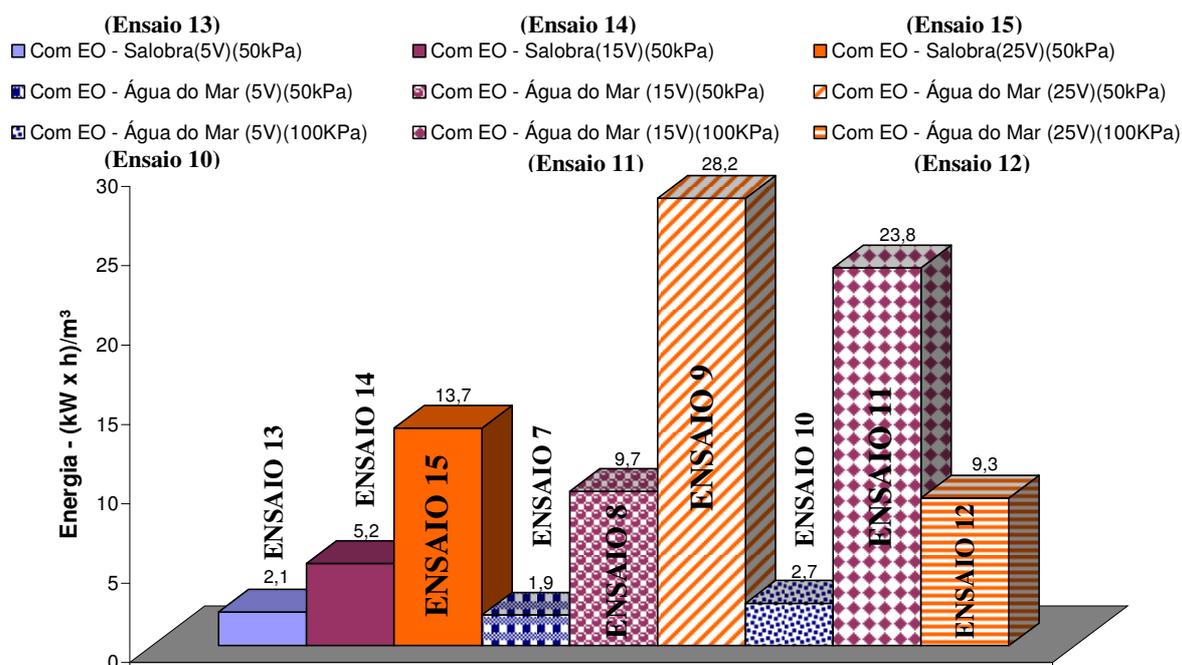
Os gráficos representados anteriormente mostraram quais foram as variáveis que se destacaram para se obter uma boa eficiência da eletro-osmose com o fito de aumentar a consolidação do solo e, conseqüentemente, a resistência não drenada. Contudo, é interessante revelar o custo-benefício dos ensaios eletro-osmóticos com relação à energia elétrica consumida por unidade de volume.

A Tabela 7.9 mostra o trabalho médio realizado em um determinado tempo de ensaio – potência média, a energia elétrica consumida por unidade de volume com esta potência e o custo gerado pela mesma. A Figura 7.9 mostra a energia consumida por unidade de volume em até 24 horas de todos os ensaios eletro-osmóticos.

A potência foi encontrada pelo produto da diferença de potencial entre os eletrodos com a corrente que atravessava o solo; como esta corrente decresceu com o tempo, resolveu-se trabalhar com a potência média do ensaio. A energia elétrica consumida por unidade de volume é o produto da potência média pelo tempo de funcionamento do ensaio dividido pela unidade de volume do solo que foi tratado. Para o cálculo do custo de energia deve-se saber que a tarifa de energia elétrica no Distrito Federal do grupo B3(comercial/industrial), até um consumo de 200 kWh, é de R\$ 0,31 kWh.

**Tabela 7.9 - Potência média, energia consumida e custo dos ensaios.**

Ensaio	Voltagem (V)	Potência média (W)	Energia/Volume (kW.h)/m <sup>3</sup>	Custo/Volume (R\$)/m <sup>3</sup>	Meio
<i>Ensaio 5</i>	5	0	0	0	Água Pura
<i>Ensaio 6</i>	25	0	0	0	Água Pura
<i>Ensaio 7</i>	5	1,64	1,936	0,60	Água do Mar
<i>Ensaio 8</i>	15	8,59	9,724	3,01	Água do Mar
<i>Ensaio 9</i>	25	23,85	28,174	8,73	Água do Mar
<i>Ensaio 10</i>	5	2,27	2,677	0,83	Água do Mar
<i>Ensaio 11</i>	15	21,98	23,791	7,37	Água do Mar
<i>Ensaio 12</i>	25	94,48	9,299	2,88	Água do Mar
<i>Ensaio 13</i>	5	1,80	2,121	0,66	Água Salobra
<i>Ensaio 14</i>	15	4,39	5,185	1,61	Água Salobra
<i>Ensaio 15</i>	25	11,60	13,700	4,25	Água Salobra



**Figura 7.9 - Resultados da energia consumida em todos os ensaios eletro-osmóticos.**

---

Analisando-se a Tabela 7.9 e a Figura 7.9 observa-se que o ensaio de 5V com 50 kPa de carga homogeneizado com água do mar (Ensaio 7) tem o menor consumo de energia por unidade de volume tratado, conseqüentemente, menor custo com energia (R\$ 0,60/m<sup>3</sup>). Entretanto, o ensaio de 5V com 50 kPa de carga e homogeneizado com água salobra (Ensaio 13) tem o melhor custo-benefício porque o consumo de energia por unidade de volume está um pouco maior que o ensaio 7 (R\$ 0,66/m<sup>3</sup>), porém esse recalcou 30% a mais e estava 73% mais resistente ao cisalhamento, deixando-se claro a vantagem em termo de custo benefício.

Em contrapartida, o pior custo-benefício foi do ensaio de 25V com 50kPa de carga e homogeneizado com água do mar (Ensaio 9), uma vez que teve o maior consumo de energia por unidade de volume e, conseqüentemente, maior custo (R\$ 8,73/m<sup>3</sup>) em 24 horas de ensaio. O recalque obtido e o ganho de resistência ao cisalhamento são mais baixos que os ensaios do solo homogeneizado com água salobra com mesma carga (Figura 7.7 e 7.8).

É notado na Figura 7.9 que o consumo de energia por unidade de volume nos ensaios do solo homogeneizado com água salobra de 50 kPa de carga é praticamente metade do consumo de energia do solo homogeneizado com água do mar de mesma carga. Exceção apenas, dos ensaios de 5V que tiveram um consumo de energia muito próximo. Percebe-se, desse modo, que ocorreram vantagens no recalque, na resistência ao cisalhamento e no consumo de energia nos ensaios realizados com menor concentração eletrolítica, visto a maior uniformização dos resultados da corrente nesse meio.

## **7.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM LABORATÓRIO – ETAPA B**

Esta etapa foi planejada a partir dos resultados dos ensaios de otimização. Visto que o ensaio de destaque na etapa A teve como variáveis principais uma diferença de potencial de 5V, 50 kPa de carregamento e homogeneização com água salobra, resolveu-se aplicar na etapa B esses mesmos parâmetros, variando-se apenas, o tipo de eletrodo a ser anexado ao geodreno para formação do dreno condutor elétrico (DCE). Nesta parte, também foi utilizada a técnica da eletro-osmose reversa, em que o eletrodo cátodo passa a ser ânodo e o ânodo passa a ser cátodo em intervalo de tempo predeterminados.

---

Para saber se os solos tropicais apresentam propriedades peculiares que podem influenciar no comportamento dos ensaios eletro-osmóticos, fez-se a caracterização física do solo utilizado nos ensaios (solo EST), onde os resultados da granulometria e dos índices de Atterberg, executados no modo normal, foram apresentados na Tabela 5.1. Não foi realizada a caracterização física no modo modificado, pois os ensaios desta etapa foram executados em uma única concentração salina (16,5 g/L). Assim, o comportamento do sal inserido no meio já foi descrito em itens anteriores.

Foi feita a análise química da amostra do solo EST, antes e após o ensaio eletro-osmótico. Essa análise será apresentada posteriormente para entendimento do processo químico no comportamento dos ensaios EO da etapa B.

### **7.2.1. ANÁLISES ELETRO-OSMÓTICAS**

Foram realizados ensaios pilotos, os quais utilizaram os drenos verticais pré-fabricados (DVPs), e os ensaios eletro-osmóticos, que utilizaram os drenos condutores elétricos (DCE). Os ensaios EO foram realizados com a presença do cobre e aço como materiais condutores do DCE, tanto no modo normal de eletro-osmose, quanto na eletro-osmose reversa. Portanto, para esta etapa de trabalho foram realizados um total de seis ensaios, onde suas características foram apresentadas na Tabela 6.2.

As amostras foram devidamente secas ao ar, mas como os ensaios foram executados entre novembro de 2007 e janeiro de 2008, houve uma diferença na umidade natural do solo. Para tentar uniformizar a umidade em todos os ensaios, volume de água a ser adicionado na massa de solo foi calculado em relação à umidade higroscópica para obtenção de 58% de umidade inicial, ou seja, acima do limite de liquidez do solo EST. Lembra-se que a massa de sal adicionada a água foi calculada para obtenção da água salobra (16,5 g/L). Na prática, a massa de solo mole preparada teve uma variação de umidade entre 55 e 62 % e uma altura praticamente constante em todos os ensaios. A Tabela 7.10 mostra o resumo dos parâmetros fixos e os resultados obtidos nos ensaios desta etapa.

Salienta-se que após o término dos ensaios eram medidas a umidade do solo em um ponto superior, em torno de 5 cm abaixo da tampa acrílica, e em um ponto inferior, no fundo da célula. Como esperado, as umidades na parte superior foram menores que o da parte inferior.

**Tabela 7.10** - Resumo das variáveis e resultados obtidos nos ensaios.

	<b>ENSAIO B1</b>	<b>ENSAIO B2</b>	<b>ENSAIO B3</b>	<b>ENSAIO B4</b>	<b>ENSAIO B5</b>	<b>ENSAIO B6</b>
<b>USO DE ELETRO-OSMOSE</b>	<i>sem eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose-reversa</i>	<i>sem eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose-reversa</i>
<b>TIPO DE ELETRODO</b>	-	<i>cobre</i>	<i>cobre</i>	-	<i>aço</i>	<i>aço</i>
<b>DATA DE INÍCIO DO ENSAIO</b>	<i>30/11/07</i>	<i>07/12/07</i>	<i>22/12/07</i>	<i>07/01/08</i>	<i>12/01/08</i>	<i>20/01/08</i>
<b>MASSA DE SOLO [m] (kg)</b>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>30</i>	<i>31</i>
<b>UMIDADE HIGROSCÓPICA [h] (%)</b>	<i>2,79</i>	<i>2,79</i>	<i>5,77</i>	<i>2,29</i>	<i>1,22</i>	<i>2,50</i>
<b>VOLUME DE ÁGUA ADICIONADO [V<sub>A</sub>] (L)</b>	<i>16,56</i>	<i>16,56</i>	<i>15,90</i>	<i>16,71</i>	<i>17,33</i>	<i>17,82</i>
<b>COMPRIMENTO DA AMOSTRA [L] (m)</b>	<i>0,38</i>	<i>0,38</i>	<i>0,39</i>	<i>0,38</i>	<i>0,39</i>	<i>0,40</i>
<b>ÁREA DA AMOSTRA [A] (m<sup>2</sup>)</b>	<i>0,0616</i>	<i>0,0616</i>	<i>0,0616</i>	<i>0,0616</i>	<i>0,0616</i>	<i>0,0616</i>
<b>UMIDADE PÓS HOMOGENEIZAÇÃO [h<sub>p</sub>] (%)</b>	<i>62,55</i>	<i>58,76</i>	<i>59,56</i>	<i>55,82</i>	<i>54,46</i>	<i>58,52</i>
<b>RECALQUE TOTAL [ρ] (mm)</b>	<i>39,0</i>	<i>47,7</i>	<i>51,3</i>	<i>34,9</i>	<i>55,8</i>	<i>50,2</i>
<b>VOLUME DE ÁGUA DRENADA [V<sub>D</sub>] (mL)</b>	<i>não registrado</i>	<i>2264</i>	<i>2360</i>	<i>1972</i>	<i>2875</i>	<i>2160</i>
<b>RESISTÊNCIA NÃO DRENADA INICIAL [S<sub>U0</sub>] (kPa)</b>	<i>1,62</i>	<i>1,62</i>	<i>1,62</i>	<i>1,62</i>	<i>1,62</i>	<i>1,62</i>
<b>RESISTÊNCIA NÃO DRENADA FINAL [S<sub>U.F</sub>] (kPa)</b>	<i>7,13</i>	<i>8,11</i>	<i>9,73</i>	<i>7,46</i>	<i>11,35</i>	<i>9,08</i>
<b>TEMPO TOTAL DO ENSAIO [T] (h)</b>	<i>70</i>	<i>52,5</i>	<i>94,1</i>	<i>67,5</i>	<i>94</i>	<i>96,3</i>
<b>UMIDADE DA PARTE SUP. PÓS-ENSAIO [h<sub>s</sub>] (%)</b>	<i>45,12</i>	<i>44,93</i>	<i>44,65</i>	<i>44,96</i>	<i>42,51</i>	<i>44,90</i>
<b>UMIDADE DA PARTE INF. PÓS-ENSAIO [h<sub>i</sub>] (%)</b>	<i>48,76</i>	<i>47,62</i>	<i>45,41</i>	<i>48,21</i>	<i>44,40</i>	<i>45,69</i>

---

A primeira avaliação a ser feita é que nesta etapa os ensaios tiveram uma duração de 52,5 a 96 horas e que na etapa anterior variaram de 20 a 45 horas. A duração dos ensaios da etapa B é mais do que o dobro do que os ensaios da etapa A. Atribui-se a diferença de tempo de ensaio ao fato que a amostra da etapa B tinha 30 kg de solo e da etapa A apenas 24 kg, tendo com isso uma maior altura da amostra, conseqüentemente, a taxa de recalque foi prolongada, até porque a amostra da etapa B estava com maior umidade. Isso fez com que o recalque demorasse mais um pouco a se estabilizar.

A Figura 7.10 apresenta o desenvolvimento do recalque ao longo dos ensaios da etapa B. Verifica-se que a forma assintótica é comum em todos os ensaios. Entretanto, por estarem todas as curvas superpostas em um mesmo gráfico, a comparação passa a ser inevitável.

Fazendo-se uma análise geral do tempo total de ensaio, nota-se que os ensaios padrões foram finalizados após 70 horas (ensaio B1) e 67,5 horas (ensaio B4). Uma diferença de 2,5 horas. Tomou-se como referência a finalização dos ensaios quando o recalque estivesse praticamente uniforme, ou melhor, com pouca diferença de valores. Observando-se a Figura 7.10, percebe-se que no ensaio B4 o recalque estava uniforme em aproximadamente 67 horas, pois ao passar uma reta tangente aqueles pontos, encontra-se a mesma na posição quase horizontal. Já no ensaio B1 o recalque se apresenta menos uniforme no final do ensaio, mas ao se avaliar os dois últimos pontos percebe-se que o penúltimo estava com a magnitude de 35 mm e o antepenúltimo com 31 mm, portanto, um recalque de 4 mm em 20 horas. O mesmo raciocínio é colocado no último trecho, em que tem um recalque de 3,5 mm em 20 horas. Desse modo, entendeu-se que o recalque deste ensaio estava praticamente constante com o tempo e, por isso, poderia ser finalizado.

Os ensaios com EO, no modo normal e eletro-osmose reversa, utilizando o aço como eletrodo, foram finalizados, respectivamente, com 94 horas (ensaio B5) e 96,3 horas (ensaio B6). Uma diferença de apenas 2 horas na execução. Para finalização desses ensaios tinha como referência que o recalque estivesse uniforme com o tempo, mas, principalmente, que a corrente estivesse próximo de zero, abaixo de 0,05 A. Pois, com pouca intensidade de corrente o recalque deixaria de ocorrer devido a eletro-osmose e o que passaria a dominar era o recalque devido à sobrecarga. O ensaio B5 atendeu aos dois requisitos, onde percebe-se, por meio do gráfico, que a reta tangente imaginária também está praticamente na posição horizontal, demonstrando a tendência da uniformização do recalque. O gráfico de intensidade de corrente mostrará que em 94 horas de ensaio a corrente estava na ordem de 0,05 A.

---

Também observa-se na Figura 7.10, ensaio B6, executado no modo de eletro-osmose reversa, que, no penúltimo ponto, o recalque começa a estabilizar, mas em seguida, após a permuta dos eletrodos, há uma recuperação da taxa de recalque, o que percebe-se que este poderá ser aumentado por mais algumas horas. O gráfico de intensidade de corrente também mostrará que em instantes antes do término do ensaio a corrente estava em 0,06 A, mas que após a reversão dos eletrodos, no instante de 96 horas, a corrente estava em 0,37 A. Portanto, ainda acima do valor determinado para término do ensaio que foi de 0,05 A. Contudo, esse ensaio foi finalizado nesse instante por estar próximo ao tempo de ensaio de B5, viabilizando uma comparação entre os dois métodos.

Já no ensaio EO, usando o cobre como eletrodo, o tempo total no modo normal foi 52,5 horas e no modo eletro-osmose reversa 94,1 horas. Quase 80% a mais de tempo na execução do ensaio com EO reversa. Essa diferença ocorreu porque comparou-se o tempo do ensaio B2 com os ensaios da otimização que duravam em média 35 horas. Naqueles ensaios houve a quebra dos eletrodos de forma brusca, interrompendo a passagem de corrente. Desse modo, ao perceber que o ensaio estava se alongando em relação aos ensaios da etapa A e que, em um determinado instante a corrente tinha caído de forma rápida, achou-se que o eletrodo tinha se rompido e resolveu-se conferir, o que deve ter acelerado a quebra do mesmo. Percebendo-se o acontecimento, tentou-se retornar o eletrodo ao local de origem, conseguindo reaver a corrente anterior. Em seguida, essa voltou a cair. Por ter provocado a interrupção, resolveu-se finalizar o ensaio em instantes depois.

Daí, o ensaio B2 foi interrompido quando a curva de recalque ainda apresentava um ângulo de tangente em relação à horizontal pouco menor que  $45^\circ$ , isto é, ainda havia taxa de variação temporal de recalque considerável quando foi finalizado o ensaio. Entendeu-se, com isso, que mesmo com a quebra do eletrodo, esse mantinha-se ligado por caminhos preferenciais de corrente, que eram mantidos devido a carga constante atuante. Raciocínio evidenciado, visto que quando retirou-se a carga em um determinado ensaio a corrente foi imediatamente zerada. Esses caminhos podem estender o ensaio por algumas horas. Por esses motivos, o ensaio B3 não foi interrompido manualmente, deixando a corrente ser praticamente zerada, o que demorou por causa da reversão dos eletrodos, fato que será explicado posteriormente.

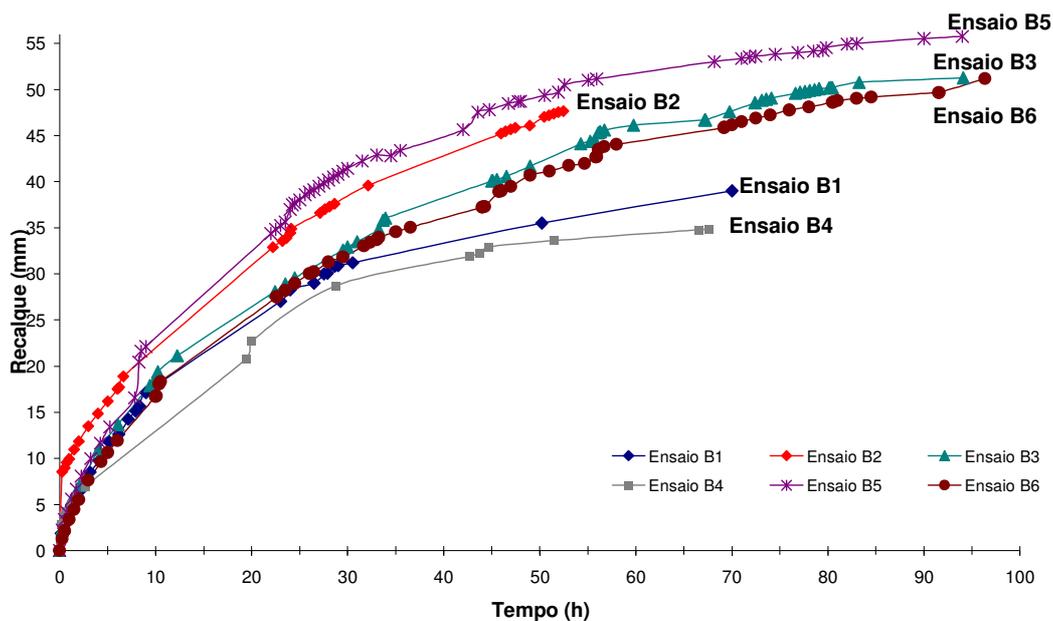


Figura 7.10 - Recalque ao longo do tempo nos ensaios da etapa B.

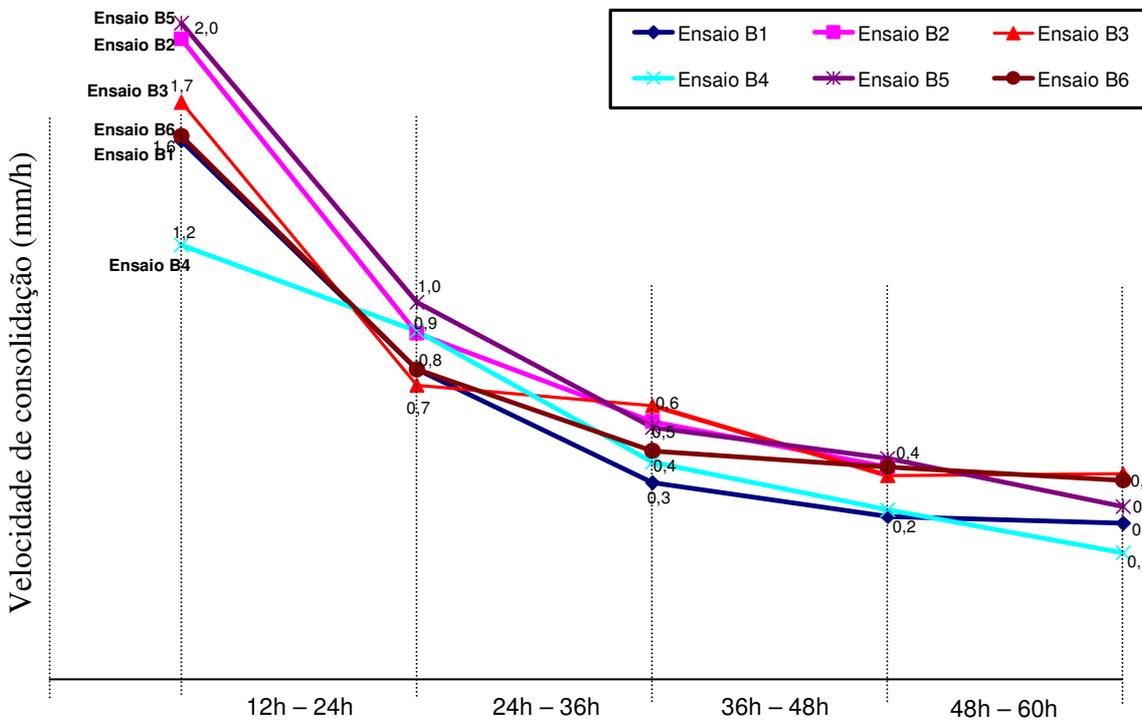
Outro ponto a se destacar ao analisar a Figura 7.10, é que existem três grupos de curvas que se apresentam bem próximas: as curvas B1 e B4 (sem EO), as curvas B2 e B5 (EO normal) e as curvas B6 e B3 (EO reversa). Esses comportamentos muito parecidos corroboram para validar o *ceteris paribus*<sup>(7)</sup> do recalque nos ensaios e ao analisar o conjunto, conclui-se que, nos ensaios com eletro-osmose normal, o solo adensou mais rapidamente que nos ensaios com eletro-osmose reversa que, por sua vez, adensou mais rapidamente que nos ensaios sem eletro-osmose. O grupo da eletro-osmose normal adensou de forma mais rápida desde o início até o final, enquanto os grupos com EO reversa e sem eletro-osmose tiveram uma taxa de recalque muito próxima nas 10 primeiras horas, passando a se separar a partir das 28 horas, momento em que os ensaios de EO reversa aumentaram a taxa e se desmembraram da curva dos ensaios padrões.

A Tabela 7.11 e a Figura 7.11 apresentam uma visualização mais precisa do comportamento da taxa de recalque, ou melhor, do desempenho da velocidade média de consolidação, em intervalos de 12 em 12h, nas primeiras 60 h de ensaio.

<sup>(7)</sup> *ceteris paribus* é uma expressão do *latim* traduzida como “outras coisas sendo iguais”. As outras variáveis que existam na situação são consideradas constantes.

**Tabela 7.11** - Comparativo entre as velocidades médias de consolidação.

		T <sub>1</sub> = 12h	T <sub>2</sub> = 24h	T <sub>3</sub> = 36h	T <sub>4</sub> = 48h	T <sub>5</sub> = 60h
<b>ENSAIO</b>	R <sub>ecalque</sub> acumulado (mm)	19,2	28,3	32,4	35	37,3
<b>B1</b>	V <sub>média</sub> (mm/h)	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>
<b>ENSAIO</b>	R <sub>ecalque</sub> acumulado (mm)	23,7	34,4	41,2	46,0	-
<b>B2</b>	V <sub>média</sub> (mm/h)	<b>2,0</b>	<b>0,9</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	-
<b>ENSAIO</b>	R <sub>ecalque</sub> acumulado (mm)	20,9	29,3	36,8	41,2	45,7
<b>B3</b>	V <sub>média</sub> (mm/h)	<b>1,7</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>
<b>ENSAIO</b>	R <sub>ecalque</sub> acumulado (mm)	14,6	25,4	30,4	33,3	34,3
<b>B4</b>	V <sub>média</sub> (mm/h)	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>
<b>ENSAIO</b>	R <sub>ecalque</sub> acumulado (mm)	24,4	36,5	43	48,2	51,2
<b>B5</b>	V <sub>média</sub> (mm/h)	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,3</b>
<b>ENSAIO</b>	R <sub>ecalque</sub> acumulado (mm)	19,4	28,5	34,0	38,8	43
<b>B6</b>	V <sub>média</sub> (mm/h)	<b>1,6</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>



**Figura 7.11** - Velocidade (mm/h) da consolidação nos ensaios.

---

A partir desse gráfico pode-se observar que os ensaios com eletro-osmose normal (ensaio B2 e B5) têm uma reta da velocidade de consolidação isolada nas 36 horas iniciais do ensaio, se conjugando aos outros grupos a partir deste ponto. Também confirma-se o entendimento de que os outros ensaios tiveram uma velocidade de consolidação similar até em torno de 28 h.

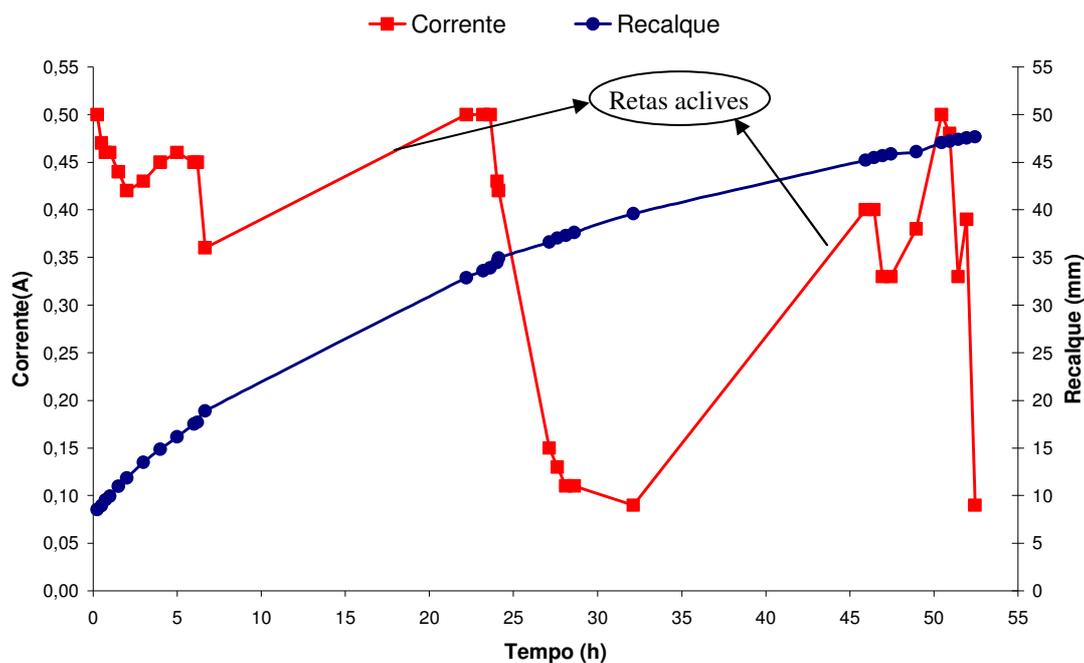
Um ponto interessante na análise desse gráfico, não se conseguindo identificar na Figura 7.10, é que, a partir de 50 horas de ensaio, há uma inversão na ordem da velocidade de consolidação. Observa-se que a velocidade passa a ser maior nos ensaios com o uso de EO reversa (ensaio B3 e B6). Esse fenômeno pode ser justificado pela corrosão eletroquímica mais acentuada no ânodo dos ensaios B2 e B5 que os eletrodos dos ensaios B3 e B6. A corrosão comprometeu a integridade física dos eletrodos, diminuindo sua seção e chegando até a romper o ânodo nos ensaios com eletro-osmose normal. Com isso, o efeito desejado de drenagem induzida e orientada pelo fluxo elétrico diminui à medida que a corrente elétrica também é reduzida. A explicação sobre a corrosão eletroquímica dos eletrodos será retomada em outro momento.

Se continuar com a tendência das retas, pode-se concluir que em longo prazo, se não houvesse desgaste dos eletrodos, os ensaios com eletro-osmose reversa poderiam atingir o recalque total maior do que os ensaios com EO normal. Em menor prazo, com eletrodos susceptíveis a desgastes, a resposta é invertida, como pôde-se ver na Figura 7.11.

A eletro-osmose se fundamenta na passagem de uma corrente elétrica na massa de solo, formando um gradiente elétrico que gera no solo um fluxo eletro-osmótico de um dreno para outro. Sabendo-se do conceito, é de suma importância fazer uma relação do desenvolvimento da corrente com o recalque para entender o quanto a eletro-osmose pode influenciar no fluxo da água. Esta relação será apresentada por meios de gráficos nos ensaios B2, B3, B5 e B6 que foram os ensaios que utilizaram o processo de eletro-osmose.

#### **7.2.1.1. ANÁLISE DO ENSAIO B2**

O ensaio B2 se caracteriza por ter utilizado a eletro-osmose, no modo normal de execução, com o eletrodo de cobre como material condutor. A análise se fundamenta no desenvolvimento do recalque e da corrente induzida ao longo do ensaio. A Figura 7.12 mostra a relação da corrente e recalque.

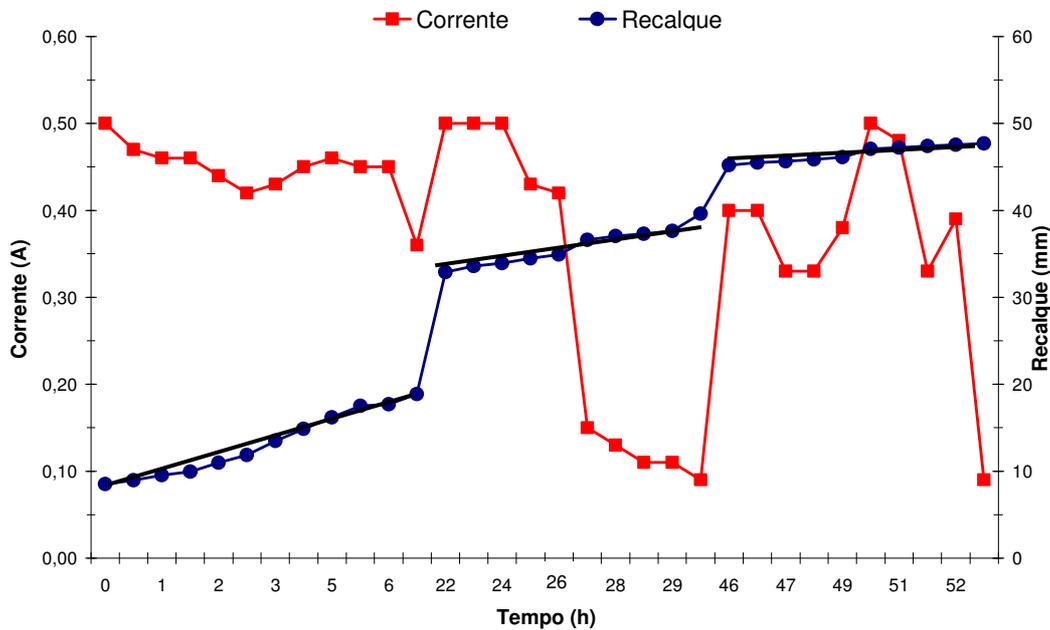


**Figura 7.12** - Relação da corrente e recalque no ensaio B2 - Eletro-osmose no modo normal, eletrodo de cobre.

A corrente teve, em parte, um comportamento similar aos outros ensaios já apresentados, ou seja, a corrente diminui com o tempo de forma não linear. Entretanto, existiu um diferencial que foi o surgimento de duas retas aclyves com um período, entre as duas ocorrências, de aproximadamente 24 horas. Não há uma explicação plausível para o ocorrido, talvez haja a ligação de alguns caminhos preferenciais em tempos e tempos, devido aos íons do metal inseridos no meio em consequência do desgaste do eletrodo ânodo, facilitando, com isso, a passagem da corrente.

Após 48 horas de execução do ensaio, estranhou-se o tempo de duração em relação aos ensaios anteriores, como também a elevação da corrente para o mesmo valor do início do ensaio (0,5 A). Por esses motivos, resolveu-se verificar o eletrodo ânodo e com isso a corrente caiu para 0,02 A, percebendo-se que o eletrodo estava quebrado. Foi colocado o eletrodo no seu local de origem e a corrente retornou para a ordem de 0,48 A, ou seja, voltou ao estado normal. Voltando a cair tempos depois, de forma mais rápida. Isso induziu a finalização do ensaio por volta de 52 horas. Se estivesse esperado mais um pouco para finalizar o ensaio, talvez esta última queda seria um novo período para a reta aclyve, já que estava próximo das 24 horas em relação a reta anterior.

Para melhor compreender a influência da corrente no comportamento do recalque, fez-se o mesmo gráfico anterior em escala de tempo diferente, formando a Figura 7.13. Colocou-se o gráfico no modo de coordenada, tirando com isso os intervalos em que as medidas não foram feitas. Isso foi possível utilizando o tipo de gráfico no formato de linha.

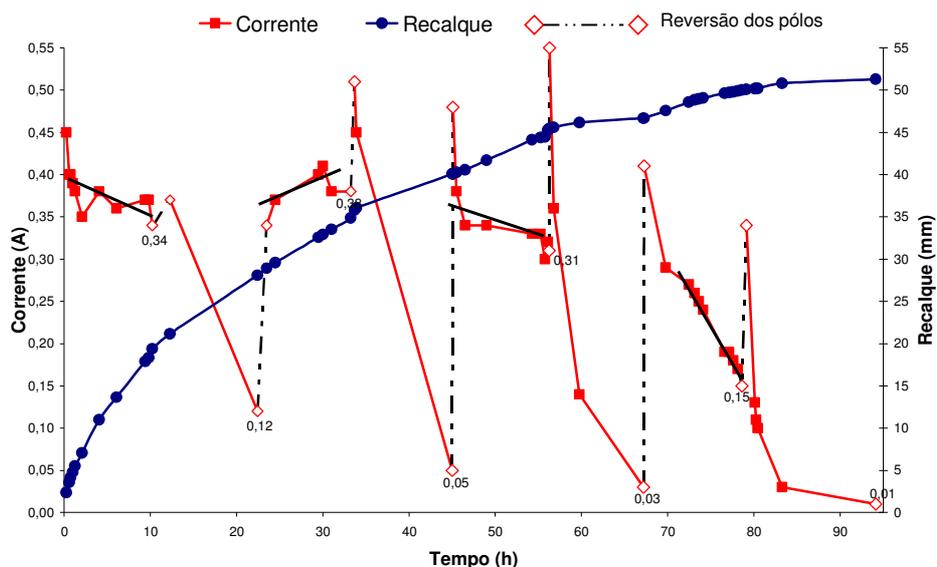


**Figura 7.13** - Relação da corrente e recalque no ensaio B2, tratados em coordenadas.

Pode-se observar que até as 6 horas de duração do ensaio, onde a corrente cai gradativamente, há um aumento no recalque também gradual, mas quando a corrente salta de 0,36 A para 0,50 A (primeira reta aclave) existe um aumento do recalque mais acentuado. Em seguida, quando a corrente volta a cair, reaparece um novo patamar do recalque. A segunda reta aclave da corrente faz com que o recalque salte para um terceiro patamar. Percebe-se que, à medida que a corrente cai de forma brusca (trechos dos patamares), diminui a inclinação da reta do patamar. Esses fatos mostram uma relação direta da corrente com o recalque, evidenciando que a eletro-osmose pode acelerar o processo de consolidação de um solo.

### 7.2.1.2. ANÁLISE DO ENSAIO B3

O ensaio B3 se caracteriza por ter utilizado o modo de eletro-osmose reversa, com o eletrodo de cobre como material condutor. A polaridade era revertida a cada 11 horas de execução. A análise também é baseada no desenvolvimento do recalque e da corrente induzida ao longo do ensaio. A Figura 7.14 mostra a relação da corrente e recalque.



**Figura 7.14** - Relação da corrente e recalque no ensaio B3 - Eletro-osmose reversa, eletrodo de cobre.

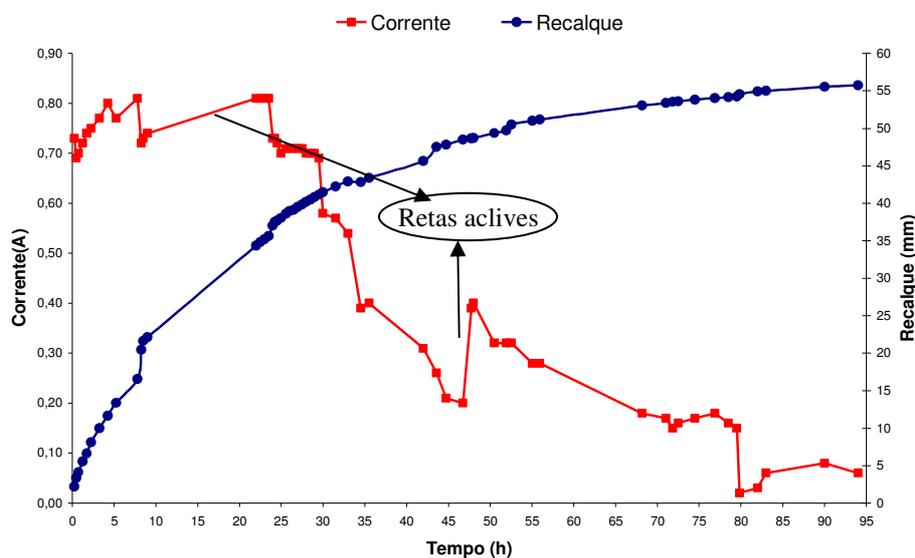
De um modo geral, a corrente continua oscilando, tendendo a cair com o passar do tempo. Um fato interessante, é que o ciclo da corrente é repetitivo até o final do ensaio. Nas primeiras 11 horas de ensaio a corrente cai até 0,34 A, quando a polaridade é invertida, a corrente aumenta, imediatamente, para 0,37 A. No segundo momento, a corrente cai até 0,12 A, após a reversão da polaridade sobe para 0,34 A. Assim, no início do ensaio o dreno com pólo negativo está do lado direito da célula, quando a polaridade é invertida, ou seja, o dreno do lado direito passa a ter pólo positivo, percebe-se que a corrente tem uma queda de forma mais acentuada. Ao retornar ao pólo negativo do lado direito, formato inicial, a corrente começa a ficar mais uniforme, voltando a cair vertiginosamente após a reversão. Esse ciclo pode ser visualizado até o término do ensaio.

Notou-se que, em todo momento dos pólos no formato inicial, tem-se uma corrente mais uniforme, caindo de forma mais suave. A partir do momento que a polaridade é revertida, a corrente cai de forma bem mais rápida. É importante deixar claro que após a reversão da polaridade, no formato diferente do inicial, onde existe uma queda de corrente rápida, há poucos pontos de medida. Isso porque foram realizados no período noturno, geralmente entre as 22 horas e 9 horas da manhã.

Com a polaridade sendo revertida, percebe-se que o recalque apresenta uma curva mais uniforme em comparação ao gráfico anterior, ou seja, sem patamares bem definidos. Isso comprova que o método de eletro-osmose, no modo normal, alcança recalque mais intenso em curto tempo, mas que, a longo prazo, a eletro-osmose reversa, por ter uma curva gradual, pode chegar a recalques superiores.

### 7.2.1.3. ANÁLISE DO ENSAIO B5

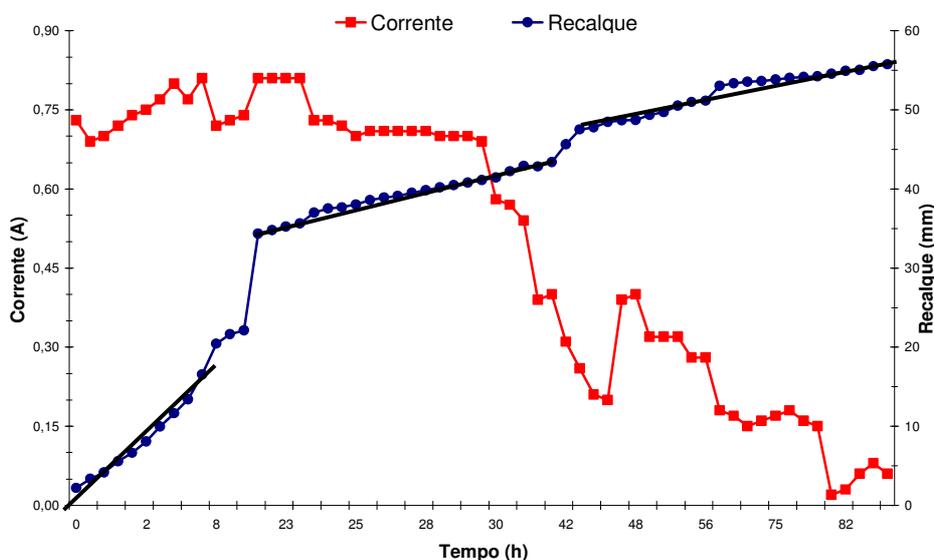
O ensaio B5 também utilizou a eletro-osmose no modo normal em sua execução, mas o material condutor foi substituído pelo aço. A Figura 7.15 apresenta a relação do desenvolvimento da corrente e do recalque com o tempo para esse ensaio.



**Figura 7.15** - Relação da corrente e recalque no ensaio B5- EO no modo normal, eletrodo de aço.

As duas retas ativas encontradas no ensaio B2 são também identificadas na Figura 7.15, no momento de 8 a 22 horas de ensaio e de 46 a 48 horas de execução. Muito provavelmente existe uma terceira reta ativa que é de 80 a 90 horas de execução. Pode ser observado um período entre as ocorrências ativas, em média de 38 horas.

Ao fazer o gráfico em uma escala relativa às coordenadas (Figura 7.16), pode-se observar de forma mais clara a influência da corrente no desenvolvimento do recalque do ensaio.



**Figura 7.16** - Relação da corrente e recalque no ensaio B5, tratados em coordenadas.

---

É verificado que até 8 horas de duração do ensaio, a corrente oscila com tendência de crescimento, o que provoca um aumento do recalque com uma reta mais íngreme. Não obstante, quando a corrente salta de 0,71 A para 0,81 A (primeira reta aclave) causa um aumento do recalque de forma mais acentuada. À medida que a corrente torna a oscilar, mas agora com tendência de decréscimo, passa a existir um novo patamar com inclinação ainda crescente, mas com menor inclinação. A segunda reta aclave da corrente faz com que o recalque salte para o terceiro patamar, salto este de pequena intensidade.

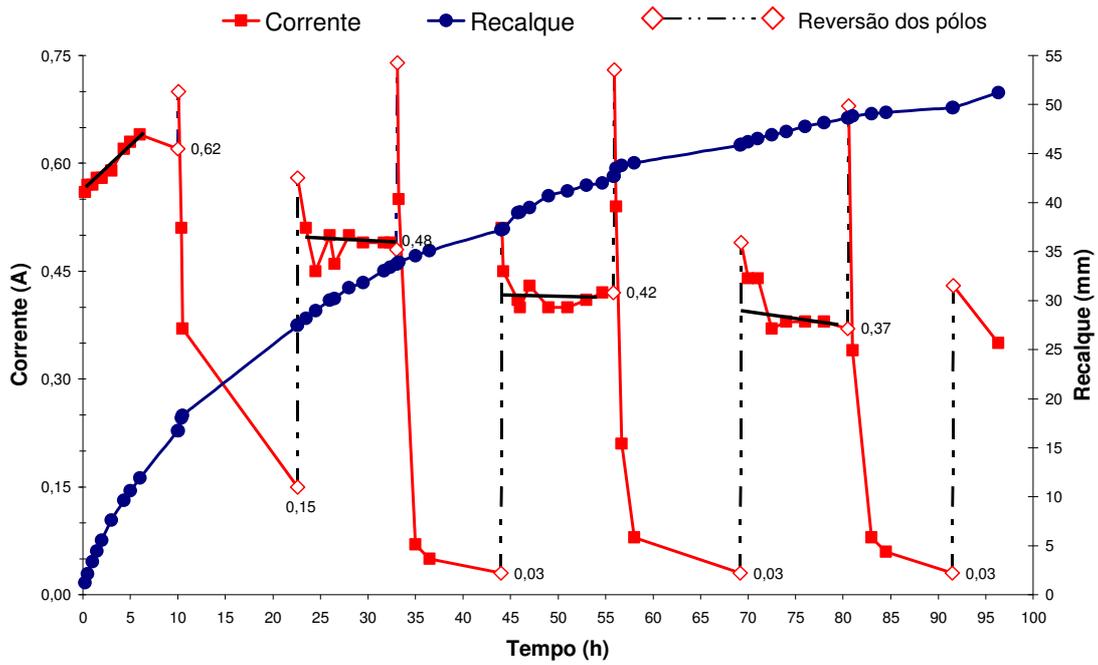
Seguindo o raciocínio do ensaio B2, quando a corrente caiu de forma brusca (trechos dos patamares) diminuiu a inclinação da reta do patamar, entende-se que pelo fato do ensaio B5 ter uma queda de corrente similar para os trechos do segundo e terceiro patamar, leva-se a uma inclinação da reta praticamente igual.

Em face ao exposto, comparando-se o desenvolvimento da corrente e do recalque nos ensaios B2 e B5, os quais utilizaram a eletro-osmose no modo normal, percebe-se que existiu um comportamento semelhante. Confirmando que existe uma relação direta da corrente com o recalque.

#### **7.2.1.4. ANÁLISE DO ENSAIO B6**

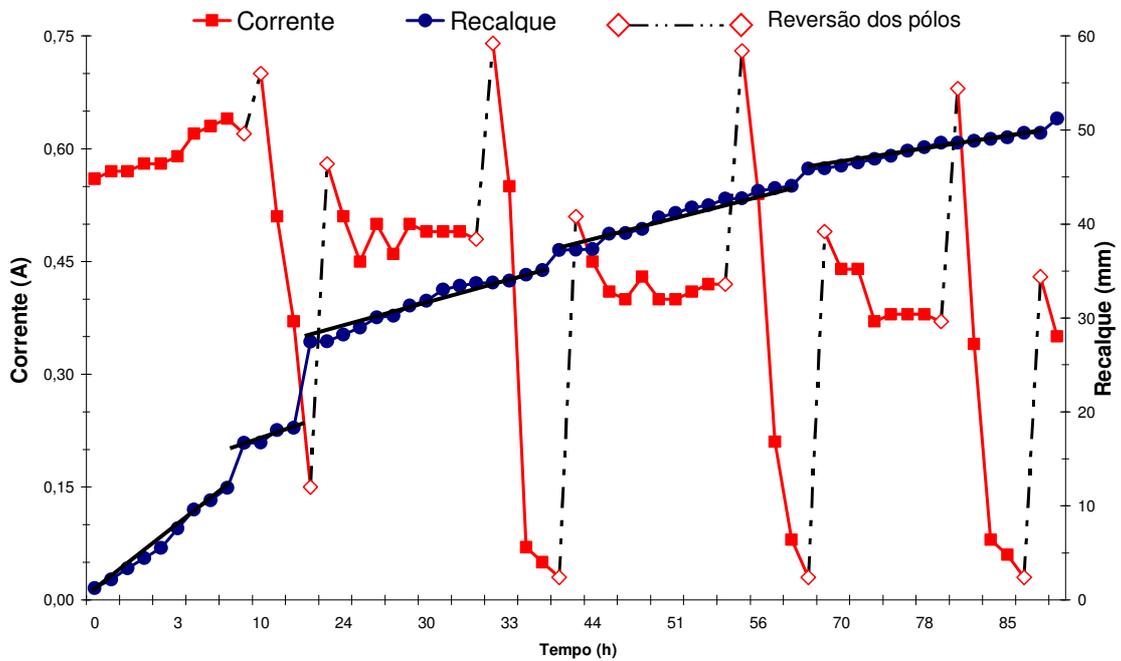
O ensaio B6 se caracteriza por ter utilizado o modo de eletro-osmose reversa, mas com a substituição do material condutor pelo aço. A duração para a reversão da polaridade também foi a cada 11 horas. A Figura 7.17 mostra a relação existente entre a corrente e o recalque para esse último ensaio da etapa B.

O gráfico da Figura 7.17 tem o mesmo formato da figura do ensaio B3, com ciclo repetitivo até o final do ensaio. Nas primeiras 11 horas de ensaio a corrente subiu e se manteve na ordem de 0,64 A, quando a polaridade foi invertida, a corrente aumentou mais um pouco, direcionando para o valor de 0,70 A. No segundo momento, a corrente caiu rapidamente para 0,15 A, após a reversão da polaridade, sobe para 0,58 A. Percebe-se que toda vez que a polaridade volta para a forma inicial, a corrente tende a se aproximar do valor do primeiro momento e, do mesmo modo do ensaio B3, a corrente cai suavemente, como mostra a reta dos pontos. Pode-se, perceber também que, a reta dos pontos da corrente está descendo em degraus.



**Figura 7.17** - Relação da corrente e recalque no ensaio B6 - Eletro-osmose reversa, eletrodo de aço.

Para entender a relação direta da corrente e recalque, trabalhou-se com o gráfico da Figura 7.17, em escala de formato de coordenadas.



**Figura 7.18** - Relação da corrente e recalque no ensaio B6, tratados em coordenadas.

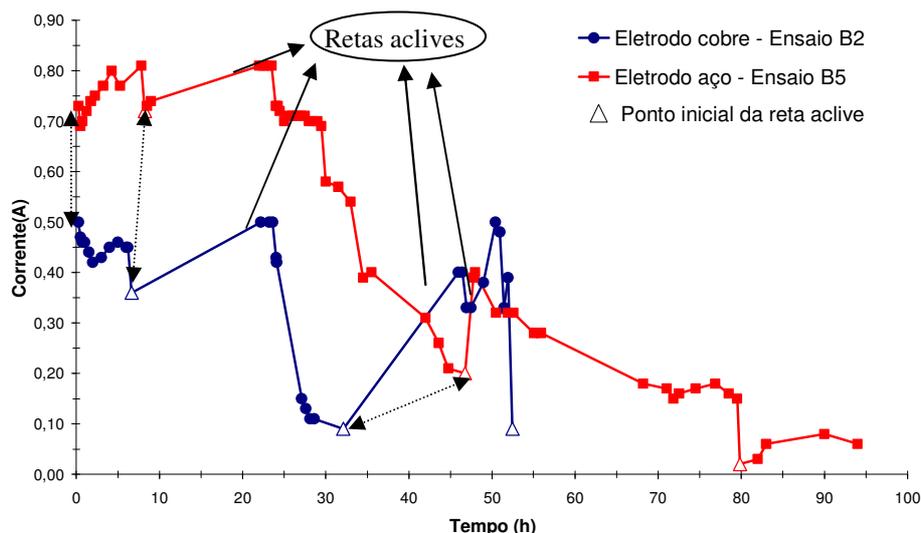
Com o aumento da corrente nas 6 primeiras horas, percebe-se que o recalque aumenta com maior velocidade, e que, quando há a primeira reversão da polaridade ocorre o aumento da corrente que causa o aumento do recalque para um outro patamar. Diminuindo, com isso, a inclinação da reta desse patamar com a queda imediata da corrente no período da polaridade invertida. Por conseguinte, a inclinação da reta dos patamares vai diminuindo com o passar do tempo, visualizando, também, a mudança dos patamares com a reversão da polaridade.

Em face do exposto, percebe-se que a relação da corrente com o recalque foi verdadeira em todos os ensaios, desde a eletro-osmose no modo normal até o modo reverso.

### 7.2.1.5. COMPARAÇÃO ENTRE OS ELETRODOS DE COBRE E AÇO

Após se verificar a relação da corrente com o recalque, é inevitável não fazer uma comparação do desenvolvimento da corrente em função do tipo de eletrodo utilizado como material condutor do dreno. Salienta-se que os eletrodos tinham praticamente a mesma área de seção transversal.

A Figura 7.19 mostra o desenvolvimento da corrente nos ensaios que foram realizados no modo normal de eletro-osmose: ensaios B2 e B5, que utilizaram, respectivamente, cobre e aço como eletrodo.



**Figura 7.19** - Comparação do desenvolvimento da corrente nos ensaios no modo normal de EO, com cobre e aço como eletrodo.

---

Nota-se que os ensaios apresentaram comportamento similar quanto ao desenvolvimento da corrente, inclusive o surgimento de retas aclives, devido a elevação da corrente, durante a execução dos ensaios. No ensaio B2, as retas aclives surgiram em períodos médios de 24 horas, enquanto no ensaio B5 o período médio aumentou para 36 horas. Portanto, a reta aclive do eletrodo cobre tem uma defasagem de meio período em relação às retas do eletrodo aço. Essa defasagem do período mostra que o ensaio com eletrodo de aço poderá durar 50 % mais que o ensaio com eletrodo cobre.

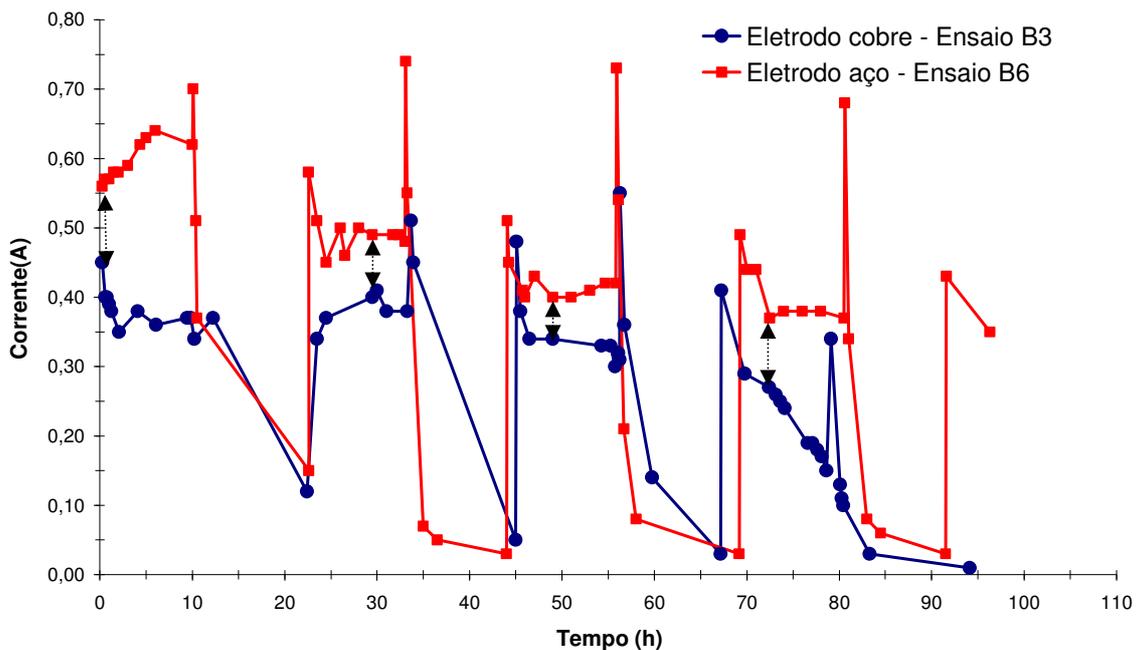
Chama a atenção no gráfico, o fato da corrente no ensaio B2 acabar bem antes que o ensaio B5. A explicação para essa diferença já foi dada no item 7.2.1. Análises eletro-osmóticas.

Outro ponto importante a ser comentado é que a corrente do eletrodo de aço predominou em relação à corrente do eletrodo de cobre, mantendo-se com maior intensidade durante todo o ensaio. Em um primeiro momento, os resultados mostraram que o material aço é mais condutor do que o cobre. Entretanto, um fator que provavelmente influenciou nessa avaliação é que após a cravação do dreno condutor elétrico, aço como eletrodo, percebeu-se que os drenos não se encontravam totalmente em paralelo. Desse modo, imagina-se que a distância entre os drenos da parte inferior estava levemente menor do que o da parte superior. Sabe-se que distâncias menores entre eletrodos resultam em uma maior intensidade da corrente elétrica.

Pode-se observar no gráfico que a corrente no ponto de partida do ensaio com eletrodo aço é aproximadamente 50% maior que o ensaio comparativo. O mesmo acréscimo de corrente pode ser observado em outros pontos das curvas.

Assim sendo, o ensaio B5 por ter uma intensidade de corrente mais elevada e por poder manter essa elevação por um maior período de tempo, faz com que o recalque atinja maiores valores em comparação ao ensaio B2, haja vista o recalque ter relação direta com a corrente.

A mesma comparação pode ser realizada com os ensaios que foram realizados no modo de eletro-osmose reversa (Figura 7.20): ensaios B3 e B6, que utilizaram, respectivamente, cobre e aço como eletrodo.



**Figura 7.20** - Comparação do desenvolvimento da corrente nos ensaios no modo de EO reversa, com cobre e aço como eletrodo.

Pode-se observar que o desenvolvimento da corrente nos dois ensaios são bastante semelhantes e que, mais uma vez se destaca o eletrodo de aço em relação a intensidade da corrente. Para o ensaio B6, verificou-se a verticalidade dos drenos condutores elétricos, tanto que talvez por esse motivo, no ponto de partida do ensaio existiu um acréscimo de corrente exatamente a metade da comparação anterior, em torno de 25% e que, em outros instantes este acréscimo se manteve e até mesmo diminuiu.

Um detalhe que se destaca é o fato que em todos os momentos da reversão dos pólos, no trecho em que não estão na posição inicial, existe uma queda da corrente bem mais abrupta no ensaio realizado com eletrodo de aço. Vê-se que cai de forma rápida, mantém-se constante até o momento da inversão para a polaridade normal, o que gera o formato de um “U”. Já no ensaio realizado com eletrodo de cobre gera-se um formato de “V”, uma vez que a queda ocorre em mais etapas.

Em compensação, nos trechos em que a polaridade é normal, o ensaio do eletrodo de aço, além de apresentar maior intensidade de corrente, mantém-se mais uniforme em relação ao ensaio do eletrodo de cobre.

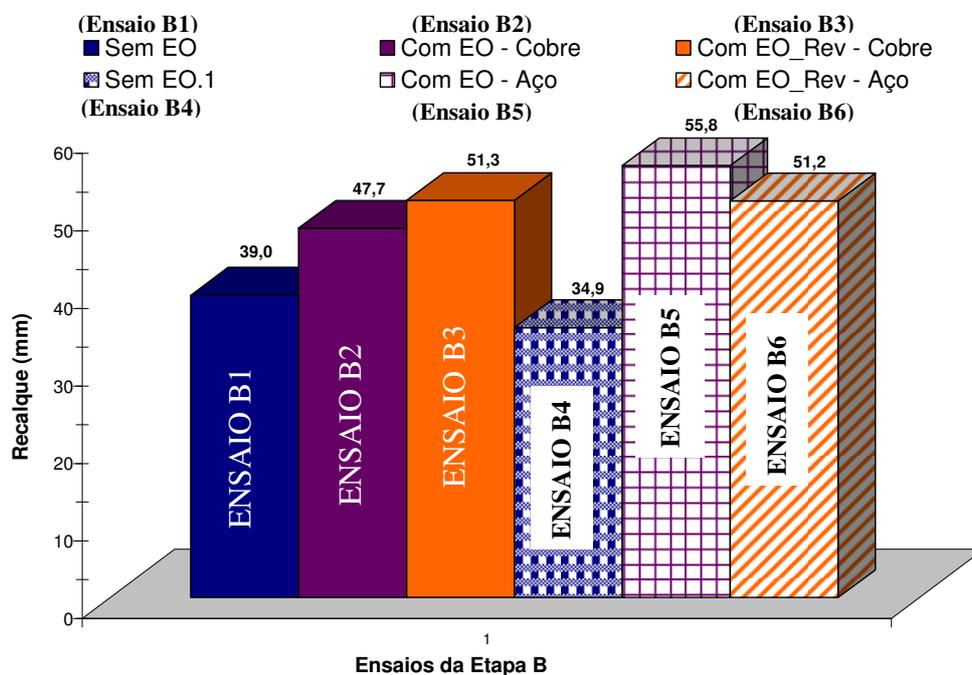
O gráfico também mostrou que, nos dois tipos de ensaios, a corrente sempre caiu para o mesmo ponto, o que representa que o ponto mínimo de corrente são iguais, mas, o ponto máximo, há destaque para os ensaios do eletrodo de aço. Percebe-se, também, tanto na

comparação do gráfico anterior, quanto na atual que nos primeiros instantes de execução a corrente sempre aumenta para o ensaio com eletrodo de aço e que sempre diminui para os de eletrodos de cobre.

Tudo isso explica o porquê dos ensaios com eletrodo de aço poder ter um maior desempenho em relação aos ensaios com eletrodo de cobre, em termos de recalque e resistência ao cisalhamento.

#### 7.2.1.6. ANÁLISE DO RECALQUE TOTAL E RESISTÊNCIA NÃO DRENADA

A Tabela 7.10 apresentou um resumo das variáveis empregadas nos ensaios, bem como alguns resultados de grande importância para a comparação dos métodos de consolidação propostos: método convencional e método eletro-osmótico. Dentre os resultados, há certo destaque para o recalque total e resistência ao cisalhamento não drenada do solo, por proporcionarem melhor visualização do desempenho alcançado pelos métodos estudados. As Figuras 7.21 e 7.22 comparam, respectivamente, o recalque total e a resistência ao cisalhamento de todos os ensaios da etapa B.



**Figura 7.21** - Comparação dos recalques totais dos ensaios da Etapa B.

Nos ensaios sem o uso da eletro-osmose, a amostra foi homogeneizada com água tratada no ensaio B1 e com água salobra no ensaio B4. Fazendo-se uma comparação entre esses ensaios

---

percebe-se que houve uma tendência similar ao encontrado na etapa A, ou seja, o ensaio que foi homogeneizado com água tratada obteve um recalque um pouco maior que o ensaio homogeneizado com água salobra. Além dos motivos já expostos na análise anterior, esta diferença também foi provocada porque o ensaio B1 estava com uma umidade superior ao ensaio B4.

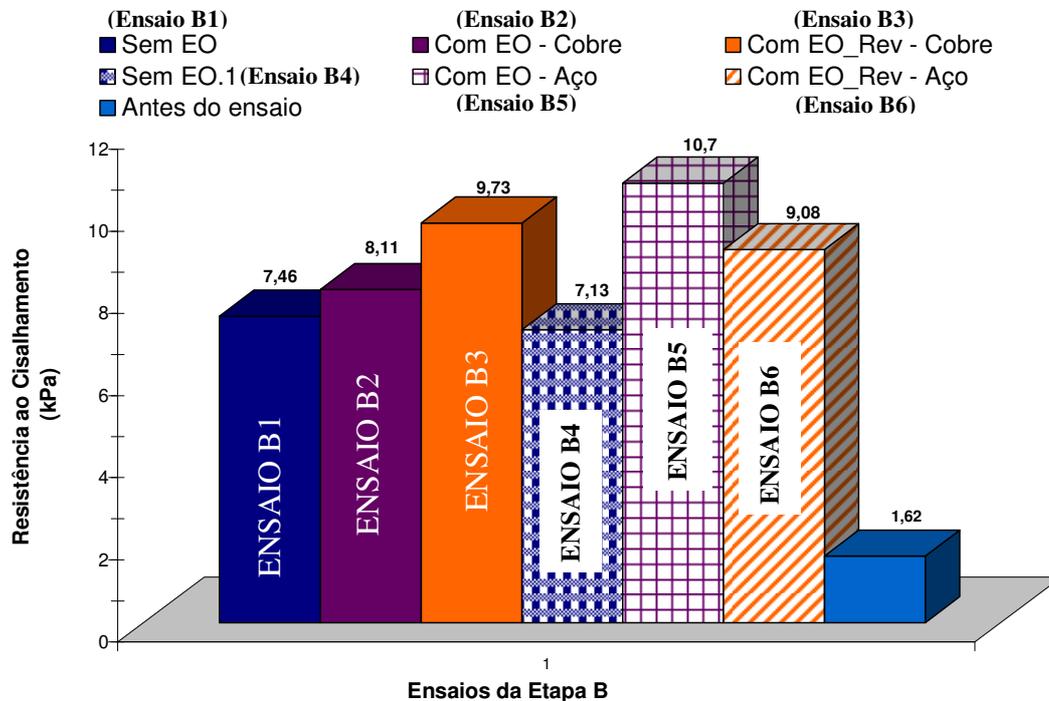
O gráfico mostra de maneira clara que o ensaio de destaque foi executado com eletro-osmose normal com eletrodo de aço (Ensaio B5), o qual recalcou 9% a mais que o executado no modo reverso (Ensaio B6), que por sua vez recalcou 47% a mais que o ensaio padrão sem eletro-osmose (Ensaio B4). Assim, em curto prazo, o ensaio de eletro-osmose normal prevaleceu em relação ao ensaio de EO reversa, como já explicitado na análise dos ensaios da etapa.

O mesmo resultado foi obtido parcialmente nos ensaios realizados com eletrodo de cobre, visto que o ensaio com eletro-osmose normal (Ensaio B2) foi abortado antes do momento, como visualizado na Figura 7.1, que apresentou o recalque ao longo do tempo nos ensaios da etapa B, e explicado no item da análise do ensaio B2. Mas, percebeu-se que o ensaio com eletro-osmose reversa (Ensaio B3) recalcou 32% a mais que o ensaio padrão (Ensaio B1) e 47% a mais que o ensaio padrão homogeneizado com água salobra (Ensaio B4).

Um fato intrigante é que os ensaios executados com eletro-osmose reversa (Ensaio B3 e B6) tiveram valores de recalque iguais, mesmo com a corrente resultante do eletrodo aço (ensaio B6) ser sempre maior do que do eletrodo cobre, conforme mostrado no gráfico de comparação do desenvolvimento da corrente da Figura 7.20. Isso vai contra os resultados obtidos nos outros gráficos, em que a corrente influencia diretamente no desenvolvimento do recalque.

A explicação para o mesmo valor do recalque é que a carga do ensaio B3 deve ter sido um pouco maior que a carga do ensaio B6. Esse comentário é fortalecido, com a ajuda das Figuras 7.11 e 7.20. Pode-se observar na Figura 7.20 que nas 10 primeiras horas de execução a corrente do ensaio B6 tende a subir e do ensaio B3 tende a cair e a Figura 7.11 mostra que o desenvolvimento do recalque neste trecho, para os dois ensaios, são iguais. Para compensar esta diferença, a carga do ensaio de maior corrente (Ensaio B6) deve ter sido um pouco menor que a carga do ensaio de menor corrente (Ensaio B3).

O gráfico da resistência ao cisalhamento não drenada do solo tende a confirmar os resultados anteriores. Ressalta-se que os ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados antes e após o término dos ensaios.



**Figura 7.22** - Comparação da resistência ao cisalhamento dos ensaios da Etapa B.

Podem-se tecer as mesmas comparações para a resistência ao cisalhamento do solo. Em relação aos ensaios padrões, houve um maior recalque no ensaio B1, isso porque mais água deve ter sido drenada do sistema, conseqüentemente, o esperado era ter resistência ao cisalhamento maior, o que foi encontrado.

Novamente o ensaio de destaque foi executado com eletro-osmose normal com eletrodo de aço (Ensaio B5), o qual teve um ganho de resistência 18% a mais que o executado no modo reverso (Ensaio B6), que por sua vez ganhou 27% a mais que o ensaio padrão sem eletro-osmose (Ensaio B4).

Da mesma forma, para os ensaios executados com eletrodo de cobre, o ensaio com eletro-osmose reversa (Ensaio B3) obteve um ganho de resistência de 36% a mais que o ensaio padrão homogeneizado com água salobra (Ensaio B4).

---

Os resultados obtidos leva a inferir que solos consolidados com eletro-osmose no modo normal apresentam resistência superior aos demais ensaiados, ficando em segundo lugar os ensaios com eletro-osmose reversa e por último os ensaios convencionais.

#### **7.2.1.7. PARÂMETROS ELETRO-OSMÓTICOS DOS ENSAIOS**

A Tabela 7.12 apresenta um resumo dos principais parâmetros eletro-osmóticos medidos nos ensaios. São parâmetros medidos diretamente como tensão, corrente elétrica, condutividade elétrica do solo e indiretamente, como por exemplo, coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica, eficiência eletro-osmótica, consumo de energia elétrica e custo.

A corrente elétrica apresentada na tabela se refere à corrente inicial, pois a mesma vai variando ao longo do tempo com a execução dos ensaios. A condutividade elétrica do solo foi medida logo após o término da homogeneização das amostras. O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica foi calculado usando a Equação 3.3, a qual é dependente do volume de água retirada em certo tempo, comprimento da amostra, área da seção transversal da amostra, tempo transcorrido e gradiente de potencial elétrico gerado.

Essa permeabilidade eletro-osmótica ( $K_e$ ) está relacionada com a eficiência eletro-osmótica de transporte de água ( $K_i$ ), que foi calculada utilizando a Equação 3.4. O consumo de energia é controlado pela evolução do gradiente elétrico e o seu custo também é dependente dessa variável.

O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico é um parâmetro que indica a velocidade do fluxo hidráulico sob um gradiente elétrico unitário em uma massa de solo, que é diretamente dependente da umidade e concentração eletrolítica do solo. Nos ensaios analisados, encontrou-se maiores valores do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica nos ensaios B2 e B5, que variaram entre 1,1 a  $1,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s.V}$ . Justamente os ensaios que foram executados no modo de eletro-osmose normal. Os menores valores do coeficiente foram encontrados nos ensaios B3 e B6, variando entre 8,1 e  $8,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s.V}$ . Esses resultados concretizam as conclusões apresentadas anteriormente, em que, em curto prazo, o ensaio B5 e, provavelmente o B3, obtiveram melhores desempenhos no recalque e resistência ao cisalhamento do solo.

**Tabela 7.12** - Resumo dos parâmetros eletro-osmóticos dos ensaios.

	ENSAIO B1	ENSAIO B2	ENSAIO B3	ENSAIO B4	ENSAIO B5	ENSAIO B6
<b>USO DE ELETRO-OSMOSE</b>	<i>sem eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose-reversa</i>	<i>sem eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose-reversa</i>
<b>ELETRODO</b>	-	<i> cobre</i>	<i> cobre</i>	-	<i> aço</i>	<i> aço</i>
<b>TENSÃO [U] (V)</b>	-	5,0	5,0	-	5,0	5,0
<b>CORRENTE ELÉTRICA [i] (A)</b>	-	0,50	0,45	-	0,73	0,56
<b>CONDUTIVIDADE ELÉTRICA [<math>\sigma_e</math>] (mS/cm)</b>	-	6,3	5,7	-	6,5	6,9
<b>COEF. DE PERMEABIL. ELETRO-OSMÓTICA [<math>K_e</math>] (m<sup>2</sup>/V.s)</b>	-	$1,5 \times 10^{-8}$	$8,8 \times 10^{-9}$	-	$1,1 \times 10^{-8}$	$8,1 \times 10^{-9}$
<b>EFICIÊNCIA ELETRO-OSMÓTICA [<math>K_i</math>] (cm<sup>3</sup>/A.s)</b>	-	0,23	0,15	-	0,17	0,12
<b>CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA [<math>P_v</math>] (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	-	4,17	6,10	-	10,03	8,07
<b>CUSTO (R\$/ m<sup>3</sup>)</b>	-	1,30	1,90	-	3,11	2,50
<b>TEMPO TOTAL DO ENSAIO [T] (h)</b>	70	52,5	94,1	67,5	94	96,3

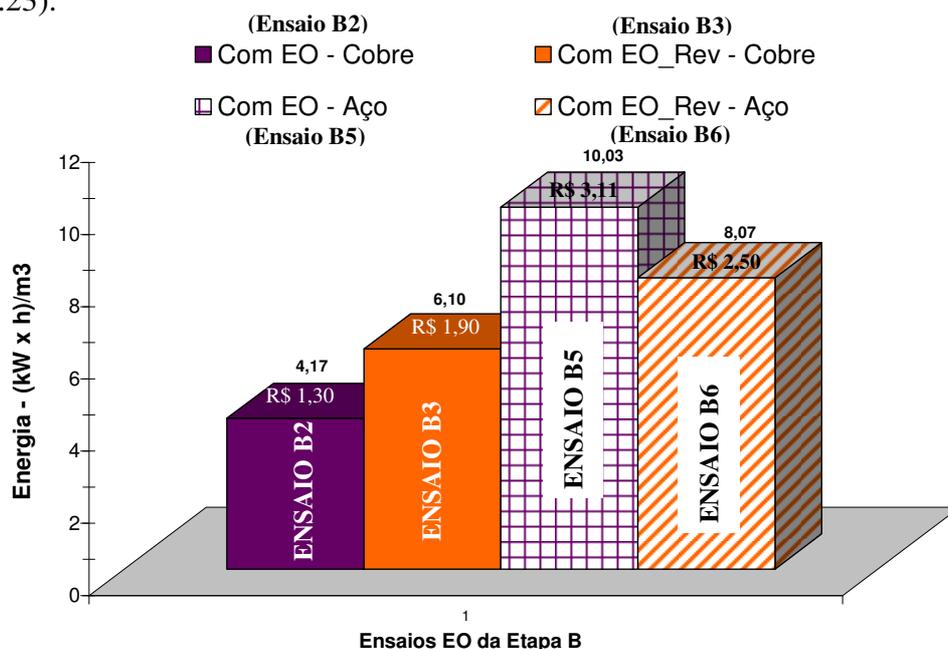
Os valores de  $K_e$  encontrados nesses ensaios estão dentro do intervalo definido por Hamed *et al.* (1991), que determinaram os valores dentro do intervalo  $1 \times 10^{-8}$  a  $1 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s/V para todos os tipos de solo.

Com relação ao parâmetro  $K_i$ , sabe-se que é dependente da condutividade elétrica do meio poroso, que por sua vez, pode mudar com a quantidade de água, capacidade de troca catiônica e o conteúdo eletrolítico livre no solo, como também está relacionado à química dominante durante a eletro-osmose, (Acar *et al.*, 1994 e Gray e Mitchell, 1967).

Os ensaios encontraram eficiência eletro-osmótica variando de 0,12 a 0,23  $\text{cm}^3/\text{A}/\text{s}$ , valores que estão dentro do intervalo sugeridos por Acar *et al.*(1994), entre 0 a 1,2  $\text{cm}^3/\text{A}/\text{s}$ . Os ensaios tiveram a seguinte ordem crescente: B2, B5, B3 e B6. Portanto, pela fórmula de eficiência EO, maiores eficácia tiveram os ensaios B2 e B5, aqueles relativos à execução com eletro-osmose normal, em seguida os ensaios executados com EO reversa (Ensaio B3 e B6).

Se forem observadas as Figuras 7.21 e 7.22, que tratam do recalque e resistência do solo, como também a Tabela 7.12, resumo dos parâmetros EO, percebe-se que a ordem de eficácia obtida está parcialmente correta. Parcialmente, porque por ser a eficiência EO dependente da permeabilidade EO, cujo parâmetro está relacionado, dentre outros, com o tempo de execução, é sabido que o ensaio B2 foi finalizado antes do momento correto. Desse modo, por ter um menor tempo de execução, obteve o grau de melhor eficiência, desvirtuando a real construção de eficiência.

Em relação à energia elétrica consumida em cada ensaio, resolveu-se elaborar um gráfico juntamente com o custo de energia para se ter uma maior noção das grandezas encontradas (Figura 7.23).



**Figura 7.23** - Consumo de energia nos ensaios da Etapa B.

---

Pode-se observar que o ensaio que teve o maior consumo de energia, conseqüentemente maior custo, foi o B5. Esse consumiu 25% a mais que o ensaio B6, que tinha o mesmo material de eletrodo, mas, foi executado com eletro-osmose reversa. Portanto, a longo prazo, tomando-se como referência a tendência dos gráficos de recalque, pode-se concluir que os ensaios com eletro-osmose reversa poderão alcançar recalques consideráveis com um custo de energia 25% menor.

Considerando apenas os ensaios realizados com eletro-osmose reversa (Ensaio B3 e B6), em termos de custo benefício, o ensaio que se destaca é o ensaio B3, por ter consumido 32% a menos de energia e ter atingido praticamente o mesmo recalque e mesma resistência ao cisalhamento. Deve-se ressaltar, que esse ensaio, provavelmente, teve uma carga axial de maior intensidade que o ensaio B6, por isso sua vantagem de consumo de energia.

### 7.2.2. DETALHES FÍSICOS DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram executados obedecendo a um procedimento prévio que resultou em alguns detalhes muito recorrentes nesta etapa. É importante relatar muitos desses detalhes para poder visualizar o comportamento do DCE no processo de consolidação do solo mole. Na Figura 7.24, por exemplo, tem-se uma noção quantitativa do recalque do solo no interior da célula eletro-osmótica.



**Figura 7.24** - Lâmina d'água após término do recalque.

Pode-se observar que a tampa acrílica com a borracha de vedação está inicialmente em uma posição próxima a borda da célula, que foi o referencial do recalque. Em seguida é vista uma lâmina d'água nos instantes finais do ensaio, após o término do recalque. A água está límpida porque o ensaio foi executado sem a presença da eletro-osmose (ensaio piloto).

---

No caso dos ensaios realizados com eletro-osmose, tendo como eletrodo a cordoalha de cobre, após algumas horas do início do ensaio, em torno de 24 horas, começa a água drenada ter uma coloração esverdeada, bem como o surgimento de bolhas de ar do dreno cátodo.



**Figura 7.25** - Bolhas de ar e água esverdeada com a execução do ensaio.

Pode-se explicar as bolhas de ar e a coloração esverdeada da água com os mecanismos dos processos de eletrólise e da corrosão dos eletrodos. Em virtude da presença acentuada de sais no meio, por ter simulado a água salobra, o solo saturado tornou-se um eletrólito por excelência. Sabe-se que a velocidade da corrosão eletroquímica depende muito do líquido presente. Neste caso, existe a presença de cloreto de sódio na água, substância extremamente forte para acelerar a corrosão eletroquímica por meio da eletrólise. No ânodo, íons  $\text{Cl}^-$  são oxidados a  $\text{Cl}_2$  (g), no cátodo, moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$  são reduzidas a  $\text{H}_2$  (g) e a íons  $\text{OH}^-$ , como mostrado no processo da pilha eletrolítica no item 4.3 da revisão bibliográfica.

A Reação 7.1 mostra a decomposição e oxidação do cloreto de sódio.



Com o gás cloro presente no ânodo, o qual contém o eletrodo de cordoalha de cobre, poderá resultar a Reação 7.2.



Esta substância formada (cloreto de cobre) tem coloração verde, o que poderá ser o material encontrado ao redor dos eletrodos e presente na água mostrada anteriormente. Outra possibilidade é que com a eletrólise da água, o oxigênio sai na forma de gás no ânodo, oxidando o cobre presente neste meio e formando o hidróxido de cobre ou óxido de cobre hidratado que também são substâncias de coloração esverdeada (Reação 7.3).

---

### 7.2.2.1. CORROSÃO ELETROQUÍMICA EM LABORATÓRIO

Os produtos de corrosão nos processos eletroquímicos são, em geral, resultantes da formação de compostos insolúveis entre o íon do metal e o íon hidroxila. O produto de corrosão é, portanto, na grande maioria dos casos, hidróxido do metal corroído, ou óxido hidratado do metal. Quando o meio corrosivo contiver outros íons poderá haver a formação de outros componentes insolúveis e o produto de corrosão pode ser constituído de sulfetos, sulfatos, cloretos, dentre outras (ABRACO, 2000).

Na Reação 7.3, o cobre foi perdendo elétrons para a água salina, enquanto se forma na região uma mistura de hidróxido de cobre ou óxidos de cobre hidratado que constitui a corrosão.



Essas reações podem ocorrer isoladamente ou em conjunto, formando o produto esverdeado. Assim, mostra-se que os gases dissolvidos por meio da eletrólise e da redução do cloro podem acelerar os processos corrosivos. A corrosão compromete a integridade física dos eletrodos, diminuindo sua seção e chegando até a romper o ânodo, como pode ser observado na Figura 7.26.



**Figura 7.26** - Cordoalhas de cobre rompidas no dreno ânodo.

Nos ensaios realizados com eletro-osmose, tendo como eletrodo o vergalhão de aço, também ocorreu à corrosão de forma acelerada nos drenos ânodos, como pode ser observado na Figura 7.27. A Figura mostra o DCE ânodo, os drenos cátodo e ânodo abertos e os eletrodos isolados. O eletrodo ânodo praticamente desintegrou na cota de 10 cm para baixo. Tanto que a extremidade ainda inteira se apresenta fixa na garra que liga a fonte.



**Figura 7.27** - Quebra do eletrodo de aço.

A corrosão do aço pode ser definida como a sua deterioração por ação química, mas principalmente, eletroquímica do meio. O aço que funciona como ânodo em uma pilha eletrolítica foi rapidamente oxidado, sofrendo um processo corrosivo bem mais acentuado e rápido do que o verificado em processo espontâneo. Em contrapartida, o aço que funciona como cátodo ficou protegido em virtude da energia externa aplicada, sofrendo pouca corrosão.

Tendo em vista os ensaios realizados, a velocidade de corrosão no eletrodo do dreno ânodo é acelerada devido à combinação de dois tipos de corrosão existentes no sistema: corrosão pelo solo e eletrolítica. A intensidade da corrosão pelo solo depende do teor de umidade, da presença de sais solúveis, temperatura e do pH do próprio solo (Silva, 1981). Já na corrosão eletrolítica ocorreu o processo corrosivo de natureza eletroquímica nos eletrodos, por causa do fluxo de corrente contínua no eletrólito (meio).

Entende-se que a corrosão pelo solo tem pouca intensidade pelo fato dos eletrodos ficarem inseridos na massa de solo mole por um curto tempo, em torno de 80 horas. Portanto, o tipo de corrosão que dominou o sistema é a corrosão eletrolítica. Devido a sua predominância, o eletrodo do dreno ânodo se deteriora quando está imerso no solo e na lâmina d'água extraída, locais onde ocorrem as reações eletrolíticas, ficando-se praticamente intacto acima desta faixa como pôde ser observado na Figura 7.27.

Nos ensaios realizados com o aço como eletrodo do DCE, as bolhas de ar estão também presentes, diferenciando-se do ensaio anterior por o eletrodo e a água drenada passarem de uma coloração levemente esverdeada para avermelhada. A Figura 7.28 mostra o estado turvo que se encontra a água drenada do ensaio.



**Figura 7.28** - Água drenada após a corrosão do eletrodo de aço.

Avaliaram-se os danos causados pela corrosão, baseando-se na aparência do metal corroído, constatada por inspeção visual. Foi evidenciado que o tipo de corrosão gerado nos eletrodos foi o puntiforme ou pite, uma das mais prejudiciais formas de corrosão pois, embora afete somente pequenas partes da superfície metálica, pode causar rápida perda de espessura do material metálico e originar pontos de concentração de tensões com início de fratura.

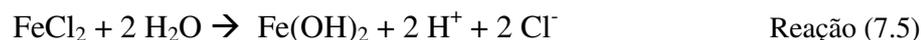
Se estivesse apenas imerso no solo, provavelmente o tipo de corrosão seria o uniforme, mas como o ensaio foi executado de forma similar às pilhas eletroquímicas, os elétrons estavam dispersos no meio, atacando o eletrodo aleatoriamente, tendendo para o tipo de corrosão puntiforme.

A composição química do meio corrosivo ou do material metálico pode influenciar bastante no ataque por pite. Assim, a presença de cloreto no meio corrosivo pode ter acelerado a formação de pites no metal aço ou cobre. No início a formação do pite é lenta, mas uma vez formado há um processo autocatalítico que produz condições para um contínuo crescimento. Como o aço estava em presença de água aerada contendo cloreto, a ação autocatalítica pode ser explicada considerando-se as possíveis reações a seguir.

Salienta-se que o aço é uma liga com vários elementos químicos, dentre esses há predominância do ferro, sendo elemento base. Assim, na área anódica do sistema, ocorre à oxidação de ferro (Reação 7.4).



Há um excesso de carga positiva nesta área, por isso ocorre a migração de íons cloreto para manter a compensação de cargas, com o conseqüente aumento da concentração do sal,  $\text{FeCl}_2$ . Este sal sofre hidrólise, formando ácido clorídrico (HCl) que poderá gerar o hidróxido ferroso (Reação 7.5).



Ou



O aumento da concentração de íons  $\text{H}^+$ , isto é, decréscimo de pH, acelera o processo corrosivo, pois tem-se o ataque do material metálico pelo HCl formado (Reação 7.7).



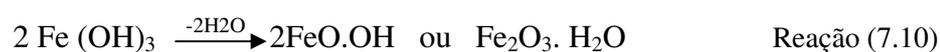
Ou



Outra reação que poderá ocorrer é que o hidróxido ferroso, em presença de excesso de oxigênio, vai ser oxidado a hidróxido férrico, que é muito mais insolúvel, segundo a reação (7.9).



O hidróxido férrico é um precipitado de cores cambiantes do amarelo alaranjado ao castanho avermelhado, cuja fórmula mais apropriada é  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , ou seja, um óxido hidratado que, perdendo água, se transforma na conhecida ferrugem de fórmula  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (n de 1 a 3). Dessa forma, a ferrugem pode ser constituída de três camadas de óxidos de ferro hidratados, em diferentes estados de oxidação: FeO,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , da superfície do ferro para a atmosfera.



As reações apresentadas explicam as colorações observadas na corrosão do ferro ou suas ligas (Figura 7.28), onde se observa que o produto de corrosão, ou ferrugem, quando em contato imediato com o metal tem uma coloração preta devido a formação da magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Em contato com mais oxigênio, apresenta coloração alaranjada ou castanho avermelhada típica do  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ .

A Figura 7.29 mostra as bolhas de gás saindo do eletrodo cátodo, isso devido à eletrólise da água que libera o gás hidrogênio do DCE cátodo, o qual sai com a água drenada.



**Figura 7.29** - Gás hidrogênio liberado no DCE cátodo.

Mais uma vez, ao fazer a comparação entre os ensaios da etapa B, pode-se afirmar que a corrosão eletroquímica ocorreu de forma muito mais acentuada no ânodo dos ensaios B2 e B5, ensaios executados no modo normal de eletro-osmose. Pois, a corrosão eletroquímica é dependente, entre outros fatores, da concentração eletrolítica do meio e da quantidade de íons formados. Como visto nos gráficos de comparação entre os ensaios, os maiores valores de corrente ocorreram nos realizados no modo normal. A Figura 7.30 mostra a situação dos eletrodos de aço, tanto a dos drenos cátodos quanto a dos ânodos, após os ensaios executados no modo normal e EO reversa.



**Figura 7.30** - Estados dos eletrodos após ensaios.

Fazendo-se uma comparação dos eletrodos ânodos dos dois ensaios, pode-se perceber que o eletrodo do ensaio executado no modo EO reversa apresentou um estado de corrosão um pouco menos evoluído, ao mesmo tempo em que o eletrodo cátodo da EO reversa mostra ter pontos de corrosão mais nítidos que o da EO normal, percebendo-se até uma coloração mais escurecida devido à ferrugem. Isso mostra que a inversão da polaridade transferiu um pouco da corrosão de um eletrodo para o outro, podendo dessa forma, prolongar o tempo de ensaio.

---

### 7.2.2.2. RESISTÊNCIA FINAL DO SOLO

Por fim é interessante mostrar por meio da Figura 7.31, o detalhe do ganho de resistência do solo proporcionado pelo método eletrocinético. Isso depois que foi retirada a água drenada e a tampa acrílica.



**Figura 7.31** - Ganho de resistência pelo método eletrocinético. Antes (a) e após (b) o ensaio EO.

### 7.2.3. ANÁLISES QUÍMICAS

A eletrocinese ocorre com o transporte de cargas e ação das partículas carregadas e, devido à aplicação de potencial elétrico, mudanças físico-químicas ocorrem no sistema, os quais são muitas vezes heterogêneos, como o solo saturado. Por saber da complexidade do meio, foram realizadas análises químicas antes e após os ensaios eletro-osmóticos para ajudar a compreender alguns comportamentos resultantes do processo.

As análises químicas do solo geralmente proporcionam subsídios para um adequado manejo do solo e de culturas em geral. Nesta pesquisa, tanto os micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) quanto os macronutrientes (Ca, Mg, K e Na), ajudarão a compreender a movimentação dos íons com a demanda eletrocinética.

A Tabela 7.13 mostra a comparação dos elementos dos micronutrientes contidos na amostra natural, após a execução do ensaio no modo normal de eletro-osmose utilizando o aço como eletrodo (Ensaio B5) e do ensaio no modo eletro-osmose reversa também com o aço como eletrodos (ensaio B6). As amostras foram retiradas de pontos aleatórios do solo da célula eletro-osmótica.

**Tabela 7.13** - Análise química no solo, quanto aos teores dos micronutrientes, realizado antes e após o método EO.

<b>Amostra</b>	<b>B ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Fe ppm</b>	<b>Mn ppm</b>	<b>Zn ppm</b>	<b>S ppm</b>
<b>EST</b>	0,14	3,66	66,5	6,09	0,90	15,8
<b>Ensaio B5</b>	0,46	0,69	41,3	3,99	0,23	6,3
<b>Ensaio B6</b>	0,04	0,56	43,7	3,84	0,14	10,3

As análises confirmaram o intemperismo da amostra EST, pois, dentre os micronutrientes avaliados, percebe-se que há um maior enriquecimento do ferro disponível. Conforme os critérios adotados do anexo 4, quanto aos micronutrientes, outro elemento de destaque, por ter sido considerado de alto valor no solo, foi o cobre (Cu).

Fazendo uma comparação da amostra natural com a amostra dos ensaios eletro-osmóticos, observou-se há queda em todos os micronutrientes, com exceção do elemento boro no ensaio de EO normal. Um destaque maior é para os elementos cobre e ferro, que passam, respectivamente, de uma categoria considerada de alta disponibilidade para baixa e de alta para uma disponibilidade adequada. Da mesma forma que o ensaio da etapa anterior, atribuiu-se essa mudança de categoria devido à lixiviação com a drenagem no decorrer dos ensaios eletro-osmóticos.

Em vista dos resultados apresentados, percebe-se que o método eletro-osmótico reduz a disponibilidade dos elementos dos micronutrientes, o que não interfere na consolidação do solo, mas poderá interferir no uso do solo para agricultura, se o método for usado para este fim.

Outro tipos de análises químicas foram realizados e calculados, basicamente as duas formas de pH (em água e cloreto de potássio), a capacidade de troca catiônica (CTC), cátions trocáveis, teor de matéria orgânica (MO), ponto de carga zero (PCZ) e potencial elétrico de superfície, tanto na amostra natural quanto na amostra após os ensaios EO, cujos resultados estão expostos na Tabela 7.14.

**Tabela 7.14** - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis, teor de matéria orgânica (MO) e PCZ, antes e após os ensaios.

Amostra	pH KCl	pH H <sub>2</sub> O	$\Delta$ pH	PCZ	$\Psi_o$ (mV)	CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )
<b>EST</b>	7,2	6,7	0,5	7,7	59,1	4,08
<b>Ensaio B5</b>	8,9	7,7	1,2	10,1	141,8	3,74
<b>Ensaio B6</b>	5,7	6,0	- 0,3	5,4	- 35,5	4,35
Amostra	MO (g/Kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )
<b>EST</b>	9,1	1,6	0,4	0,15	0,03	1,9
<b>Ensaio B5</b>	15,8	1,2	0,5	0,15	4,9	1,8
<b>Ensaio B6</b>	18,1	0,7	0,6	0,19	4,5	2,7

O resultado do pH em KCl mostra que o solo analisado é fracamente básico e em H<sub>2</sub>O tende a ser fracamente ácido, mas forçando uma aproximação poderá ser considerado como neutro. Lembra-se que, da mesma forma da amostra JC, o pH encontrado não é o habitual resultado encontrado no Distrito Federal, provavelmente por ter sido extraído de depósitos relativamente próximos às células de lixo, podendo ter tido contato com chorume pelo lençol.

Notou-se que, com o ensaio realizado no modo normal de EO (Ensaio B5), o pH passou do estado neutro para um estado básico, tanto em água quanto em KCl. Provavelmente porque a amostra foi retirada de uma área próxima ao eletrodo ânodo, local onde não foi liberado o gás hidrogênio com a eletrólise da água e por esse motivo tende a aumentar o pH do meio. Em contrapartida, no ensaio B6, existiu a eletro-osmose reversa, o que tende a equilibrar o estado do meio. Existe também o fato da amostra ter sido retirada em área mais próxima do eletrodo cátodo, local que libera o hidrogênio para a água, decrescendo o pH.

A relação que pode determinar o parâmetro de avaliação do perfil de intemperismo ( $\Delta$ pH), mostrou-se positiva para o solo EST, indicando a predominância de óxido hidróxido de ferro e alumínio sobre os minerais de argilas. Não considerou essa relação para as amostras pós-ensaio porque existe a variação do meio com as reações eletroquímicas existente no processo.

Dos elementos trocáveis, destacou-se, na amostra natural, apenas o elemento potássio (K), conforme pode ser observado nos critérios adotados do anexo 4. Obviamente, após os ensaios EO há o destaque para o elemento sódio (Na), por ter o solo sido homogeneizado com água salobra.

---

De acordo com os critérios recomendados por Catani *et al.* (1955) e os utilizados no anexo 4, para a capacidade de troca catiônica (CTC), pode-se considerar que o solo EST tem baixa CTC, como também baixa quantidade de matéria orgânica (MO) presente no solo. Portanto, a MO não tem uma influência considerável na CTC devido à pouca quantidade presente.

O valor do potencial elétrico tem maior destaque no ensaio executado com eletro-osmose no modo normal, como se esse método tivesse alcançado maior potência para realizar trabalho no deslocamento de uma carga. Provavelmente, isso ocorreu devido uma maior intensidade de corrente existente neste método.

Considerando os valores de pH e PCZ, percebe-se que pode ter havido reversão do fluxo. No entanto, dúvidas da reversão existem devido ao posicionamento da retirada das amostras para determinação do pH, além do fato do cálculo do PCZ ter sido feito pela equação 2.9, empírica e resumida.

### 7.3. RESULTADO DO ENSAIO TESTE – ESCALA INTERMEDIÁRIA

Resolveu-se aplicar eletro-osmose em um ensaio de escala intermediária com a finalidade de confirmar o dimensionamento da fonte de alimentação e avaliar se o piezômetro confeccionado tem um bom tempo de resposta para o acompanhamento do desenvolvimento da poropressão na massa de solo. Ambos os testes funcionaram como apoio para os ensaios a serem realizados em campo.

Para se verificar a eficiência que o processo pode atingir com os eletrodos estudados em laboratório, resolveu-se utilizar os mesmos diâmetros do vergalhão de aço e da cordoalha de cobre que serão utilizadas nos ensaios de campo. A Tabela 7.15 mostra os resultados da corrente, que atravessa a massa de solo no primeiro instante, induzida pelas tensões disponíveis na fonte de alimentação. Lembra-se que a fonte de alimentação foi dimensionada para três valores de tensões fixa (12, 24 e 36 V) e que os eletrodos tinham 80 cm de distância.

**Tabela 7.15** - Correntes obtidas com diferentes DDP.

DDP (V)	ELETRODO DE AÇO	ELETRODO DE COBRE
	CORRENTE (A)	
12	1,8	1,4
24	4,2	3,1
36	5,6	4,5

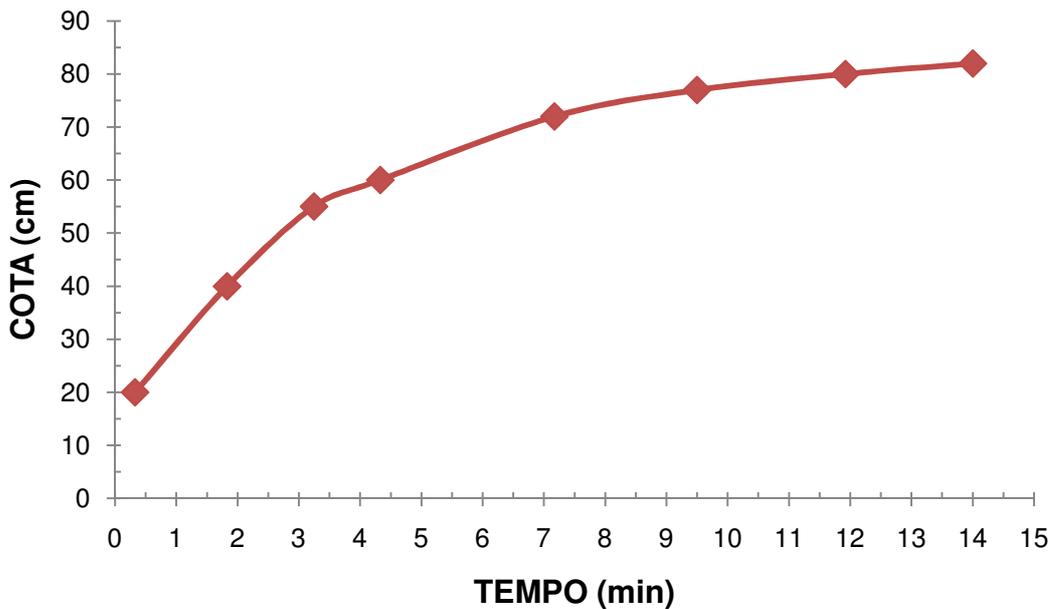
---

Fazendo-se uma comparação entre os eletrodos, percebe-se que os resultados estão coerentes com os encontrados em laboratório, pois o eletrodo de aço obteve corrente maior que o eletrodo de cobre em todas as tensões avaliadas, imaginando-se que o processo de eletro-osmose tenda a ser mais eficaz com esse tipo de material. Assim, conclui-se que apesar do cobre ser mais condutor que o aço, para os ensaios realizados em massa de solo tropical, tem-se maiores valores da corrente com aço. Logo, confirma-se a utilização do eletrodo de aço como material condutor pertencente ao DCE nos próximos ensaios em campo.

Como mostrado na Figura 6.13, neste teste foi utilizado um circuito elétrico básico em que a tensão é diretamente proporcional à corrente. Mesmo circuito elétrico trabalhado nos ensaios da célula eletro-osmótica. Em termos de custo-benefício, nos ensaios da otimização (Etapa A), para a tensão de 5 V obteve-se uma corrente de 0,5 A. Convertendo-se esse resultado para o ensaio de escala intermediária, supondo que o crescimento é proporcional, encontrar-se-ia uma corrente de 2,5 A, portanto, próximo ao valor real encontrado que foi 3,1 A. Do mesmo modo, para o ensaio da Etapa B, no modo da eletro-osmose normal com o aço, obteve-se um valor de corrente de 0,73 A, que quando transformado para a escala intermediária tornar-se-ia 3,65 A. Mais uma vez, próximo ao valor real de 4,2 A. Obviamente o valor real não foi exato ao calculado porque a corrente não aumenta proporcionalmente com a transferência de escala, bem como devido a outras variações existentes na massa de solo.

Ao transferir o valor da corrente encontrada para as duas células de circuito elétrico do ensaio de campo de maior escala, percebe-se que a fonte de alimentação foi dimensionada para atender aos três níveis de tensões. Porém, para os ensaios em campo desta pesquisa, aplicou-se apenas a diferença de potencial elétrico de 24 V, por ter sido o aumento de escala da ordem de 5 vezes em relação ao melhor resultado do ensaio de laboratório.

A Figura 7.32 apresenta o tempo de resposta do piezômetro utilizado no ensaio intermediário, onde a experiência consistiu no acréscimo de tensão efetiva de aproximadamente 3,4 kPa na superfície do solo mole.



**Figura 7.32** - Tempo de resposta do piezômetro utilizado nos ensaios em campo.

O gráfico mostra que a água sobe até a cota máxima de 83 cm em 14 minutos de ensaio. Sabendo-se que o solo mole tem uma altura de 40 cm e a sobrecarga de 20 cm e, considerando seus pesos específicos, respectivamente,  $24 \text{ KN/m}^3$  e  $17 \text{ KN/m}^3$ , calcula-se a tensão efetiva na superfície do solo mole após o depósito da sobrecarga, onde encontra-se um valor próximo ao real (9 kPa).

Portanto, conclui-se que o piezômetro tem um tempo de resposta considerado razoável, podendo atender às necessidades dos ensaios a serem realizados em campo.

#### **7.4. RESULTADOS DOS ENSAIOS EM CAMPO – GRANDE ESCALA**

Resolveu-se aplicar eletro-osmose em ensaios de maior escala com a finalidade de conhecer como esta técnica se comporta para melhoria das propriedades do solo tropical de consistência mole. Foram feitos ensaios simultâneos, utilizando-se a técnica convencional de drenos verticais pré-fabricados com a presença de sobrecarga e em outra situação incorporando-se a eletro-osmose. Para entender o comportamento dessa técnica de forma mais aprofundada, realizaram-se ensaios físicos, químicos e mineralógicos, antes e após cada ensaio experimental.

### 7.4.1. ANÁLISES QUÍMICAS

É de suma importância se conhecer a influência do método eletrocinético no comportamento físico-químico dos materiais envolvidos. Para tanto, foi feita uma análise química no solo natural (amostra BR e MD), após o ensaio eletro-osmótico e o ensaio convencional, baseadas nos oligo-elementos ou elementos traços, ou melhor, nos micronutrientes (Cu, Fe, Mn e Zn) e macronutrientes (Ca, Mg, K e Na) da composição do solo (Tabela 7.16), bem como em parâmetros como pH, CTC, PCZ, dentre outros (Tabela 7.17).

Fizeram-se as análises químicas tanto nos ensaios da primeira fase em campo (ensaio EO), quanto na segunda fase (ensaio EO reversa). Por as análises serem similares, resolveu-se apresentar apenas os resultados químicos dos ensaios EO reversa e convencional por ser constituído de maior complexidade dos dados, justamente por haver a reversão da polaridade. Para ter uma análise mais exata, no ensaio EO extraiu-se a amostra em dois pontos distintos: próximo ao dreno ânodo (ao redor da placa de recalque 1 – PR1) e cátodo (ao redor da placa de recalque 2 – PR2).

**Tabela 7.16** - Análise química no solo, quanto aos teores dos micronutrientes, realizado antes e após o método EO reversa e padrão.

<b>Amostra</b>	<b>B ppm</b>	<b>Cu ppm</b>	<b>Fe ppm</b>	<b>Mn ppm</b>	<b>Zn ppm</b>	<b>S ppm</b>
<b>MD</b>	0,58	0,75	53	0,3	3,18	3,9
<b>Reserv. EO (PR1)</b>	0,58	3,37	2830	33,8	1,1	3,9
<b>Reserv. EO (PR2)</b>	0,27	1,24	150	3,57	0,85	2,6
<b>Reserv. PAD</b>	0,37	0,6	63	0,37	2,18	3,1

**Legenda:** MD – Mestre D'armas / Reserv. EO (PR1) – Reservatório Eletro-osmótico (Placa de Recalque 1) / Reserv. PAD – Reservatório Padrão

Da mesma forma que as outras análises químicas, a interpretação é baseada no anexo 4. Ao se observar a Tabela 7.16, a primeira explanação se refere à mesma ordem de classificação dos micronutrientes presentes no solo natural MD e no solo retirado após o ensaio padrão no reservatório PAD. Exemplo, o cobre estava presente na amostra MD com 0,75 ppm, o que pode ser classificado como baixo, após o ensaio convencional passa a ter 0,60 ppm, não

---

deixando de ter classificação baixa. Apesar de mesma classificação, nota-se que houve uma pequena diminuição no teor do elemento, provavelmente, por causa da drenagem da água, levando consigo pequena parte do micronutriente. O ferro e o manganês têm suas respectivas classificações na amostra natural e após ensaio padrão, tendo uma pequena elevação, provavelmente por esses elementos terem maiores facilidades de cristalização com a diminuição da umidade do meio.

Nas amostras extraídas após os ensaios eletro-osmóticos percebe-se que o maior teor dos elementos está na área próxima ao dreno ânodo (PR1), quando no modo inicial. Dos micronutrientes presentes há o destaque para os elementos cobre, ferro e manganês por serem inicialmente, no solo natural, classificados como alto, alto e muito baixo, respectivamente. Esses valores mostraram, principalmente o elemento ferro, que o solo estava no seu estado inicial, com certo grau de intemperização. Quando submetido ao ensaio que funciona como uma pilha eletroquímica, onde ocorre a corrosão do eletrodo, há liberação dos íons de cobre, ferro e manganês no eletrodo ânodo, por serem elementos da liga do aço. Isso explica o destaque desses elementos, super sobrelevando o ferro por ser o material predominante na liga metálica do vergalhão. O ferro se sobressaiu tanto, por estar sobre o complexo sortido, sob forma reduzida (Fe divalente - óxido de ferro na forma móvel) ou forma de hidróxido.

Outro detalhe a se destacar em relação ao maior teor desses três elementos na área próxima à PR1 é que se constata o fluxo, na maior parte do tempo, no sentido do ânodo para o cátodo, provado pela desintegração do material nesse eletrodo.

Segundo Boyer (1971), um dos fatores que pode afetar a redução do teor de cobre e zinco em solos tropicais é a elevação do valor do pH. Como próximo à PR2 o pH é mais elevado devido a liberação do gás hidrogênio, encontrou-se a diminuição desses elementos. Do mesmo modo, o autor informa que pH baixo causa toxidade mangânica, como também foi identificado na tabela.

Como nos ensaios de laboratório, o solo MD foi analisado quanto ao pH, o PCZ, capacidade de troca catiônica, oxigênio dissolvido, condutividade elétrica, matéria orgânica e cátions trocáveis, antes e após os ensaios, conforme mostra a Figura 7.17.

**Tabela 7.17** - Resultados de pH, CTC, elementos trocáveis, teor de matéria orgânica (MO) e PCZ, antes e após os ensaios.

Amostra	pH KCl	pH H <sub>2</sub> O	ΔpH	PCZ	Ψ <sub>o</sub> (mV)	CTC (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Oxigênio Dissolv. (mV)
<b>MD</b>	5,6	5,6	0	5,6	0	3,48	106
<b>Reserv. EO (PR1)</b>	3,3	3,1	-0,2	3,5	23,6	21,39	251
<b>Reserv. EO (PR2)</b>	10,1	10,7	+0,6	9,5	-70,9	1,95	-153
<b>Reserv. PAD</b>	5,2	5,7	+ 0,5	4,7	-59,1	2,0	114
Amostra	MO (g/Kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )	Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> )
<b>MD</b>	3,8	0,6	0,1	0,06	2,2	2,5	0
<b>Reserv. EO (PR1)</b>	3,8	0,4	0,3	0,11	1,8	20,4	7
<b>Reserv. EO (PR2)</b>	3,1	0,2	0,1	0,04	2,1	1,4	0
<b>Reserv. PAD</b>	4,0	0,4	0,1	0,06	1,4	1,2	0

**Legenda:** MD – Mestre D’armas / Reserv. EO (PR1) – Reservatório Eletro-osmótico (Placa de Recalque 1) / Reserv. PAD – Reservatório Padrão

O pH da amostra MD no estado natural está em conformidade com os valores encontrados no Distrito Federal, geralmente entre a faixa de 5,0 a 6,0. Os resultados dos ensaios demonstraram que, em um mesmo reservatório, no ensaio EO, existem áreas com meio ácido e básico, pois valores extremos de pH foram medidos próximos aos eletrodos: 3.1 no ânodo (ácido) e 10,7 no cátodo (básico). Esses valores comprovam que as reações de eletrólise ocorreram nos eletrodos. Nestas reações, prótons (H<sup>+</sup>) gerados no ânodo foram responsáveis pelo baixo pH, enquanto hidroxilas (OH<sup>-</sup>) geradas no cátodo criaram um meio alcalino, resultando no aumento do pH.

A presença das reações de eletrólise é confirmada quando se analisam os resultados dos ensaios padrões, pois o pH encontra-se próximo aos valores encontrados antes da execução do ensaio, em torno de 5,5. Assim, muitas variáveis encontradas no sistema são profundamente dependentes do pH do meio, por isso a importância de sua identificação.

---

As argilas comumente apresentam-se carregadas eletricamente com cargas negativas por causa tanto das substituições isomórficas quanto da dissociação de grupos funcionais expostos. Tudo indica que houve substituições nas folhas octaédricas e tetraédricas dos argilominerais. Na tetraédrica possivelmente ocorreu a substituição de Silício (Si) por alumínio (Al), resultando em déficit de uma carga positiva, pois foi identificado o aumento da quantidade de alumínio na área próxima ao dreno ânodo. Nas folhas octaédricas um tipo de substituição evidente foi alumínio (Al) pelo magnésio (Mg), também resultando em déficit de uma carga positiva, pois houve aumento do cátion trocável magnésio de baixo (0,1 cmol/dm<sup>3</sup>) para médio (0,3 cmol/dm<sup>3</sup>), conforme classificação do anexo 4. Essas cargas negativas resultantes são denominadas de cargas permanentes e independem da variação do pH.

No que tange à dissociação de grupos funcionais expostos, as mesmas apareceram em suspensão pela ionização dos grupos funcionais das bordas das partículas (argilominerais, óxidos, hidróxidos (Fe e Al) e matéria orgânica). Essas cargas podem ser positivas ou negativas, a depender do pH. As bordas se dão pela ruptura das folhas tetraédricas e octaédricas, que podem ter sido aceleradas pela inserção da eletricidade no ambiente. Se houve ruptura na folha tetraédrica, os átomos de silício (Si) e alumínio (Al) encontram-se com ligações não compensadas. Desse modo, o silício pode ter fixado as hidroxilas (OH<sup>-</sup>) ou prótons (H<sup>+</sup>), formando grupos denominados de silanol (Si-OH<sup>-</sup> ou Si-O-H<sup>+</sup>). Esses grupos devem ter ficado em suspensão na água fazendo com que as partículas de argila adquirissem carga negativa suplementar.

Se a ruptura ocorreu na folha octaédrica, os alumínio (Al) fixaram (OH<sup>-</sup>) e H<sup>+</sup>, e devido ao caráter anfótero, a ionização pode variar com o pH. Onde o pH foi menor do que 9 há ionização da hidroxila, tornando a borda alumínica positiva e se foi maior do que 9 com os prótons liberados, a borda torna-se negativa (AlO<sub>2</sub><sup>-</sup>).

Portanto, o comportamento eletroquímico do argilomineral no ensaio é regido pela substituição isomórfica (cargas permanentes) e pela variação do pH (cargas variáveis). Onde existiram pH normais ao solo e tendendo a ácido, mais precisamente na região do ânodo – PR1, predominou carga negativa sobre toda a superfície do argilomineral, por causa das cargas permanentes, e positiva sobre as bordas por ser diretamente dependente da variação do pH. Quando o pH foi básico, na região do cátodo – PR2, mais exatamente acima de 9, existiu

---

carga elétrica negativa em toda a argila, ou seja, tanto nas bordas quanto na superfície. Esse comportamento eletroquímico é típico de solos tropicais, que são formados por minerais de carga superficial variável. Os solos da região temperada são formados apenas por minerais de carga superficial constante (Castro, 1989).

A carga elétrica negativa em todo o argilomineral, comumente encontrada nos solos tropicais, pode inverter o sentido da água, pois irá atrair maior quantidade de íons positivos presentes na água e os íons negativos existentes no meio serão direcionados para o dreno de pólo oposto (ânodo), carregando com eles a água.

Pode se constatar a existência de cargas negativas ou positivas no solo pelo método simples da variação do pH em água e cloreto de potássio. No reservatório EO, nas áreas próximas aos cátodos a  $\Delta\text{pH}$  tem resultado positivo, indicando a existência de cargas negativas no solo. O mesmo resultado foi encontrado no reservatório PAD. Entretanto, nas áreas próximas ao ânodo, a variação do pH tem resultado negativo, isso devido às transformações existentes pelas reações dominantes. Assim, nessa área há indícios de cargas positivas, provavelmente porque as bordas alumínicas são positivas em consequência da ruptura da folha octaédrica.

Um ponto muito interessante nesses resultados foi que a variação do pH ( $\Delta\text{pH}$ ) antes da execução dos ensaios se encontrava nula, indicando a ausência de cargas, portanto, o ponto de carga zero (PCZ). Esse ponto surge quando o pH da solução está em equilíbrio com o solo, no qual a carga elétrica é nula (igual quantidade de cátions e ânions adsorvidos na superfície). Apenas após a drenagem da água pelos ensaios com eletro-osmose ou pelo método natural foi que houve a variação das cargas, obtendo-se um valor diferente de zero na variação do pH ( $\Delta\text{pH}$ ).

Na região do dreno cátodo, onde o pH se apresentou alto, a solução em contato com a superfície dos oxigênios basais da folha tetraédrica contém excesso de  $\text{OH}^-$ . A superfície exibe então uma capacidade de troca de cátions, pelo pH ter valor acima do PCZ, como visto na Tabela 7.17. Por outro lado, na região do dreno ânodo, onde predomina pH baixo, a solução em contato com a superfície dos oxigênios basais da folha tetraédrica contém excesso de carga positiva. Parte da superfície exibe, então, capacidade de troca aniônica, já que os valores de pH estão abaixo do PCZ.

---

Os resultados do pH e PCZ mostraram que pode ter ocorrido reversão de fluxo eletro-osmótico. No entanto, isso também não foi identificado nesses ensaios de campo. Provavelmente as condições eletroquímicas encontradas no solo, principalmente após a reversão, tenha mascarado algum resultado de pH, dificultando sobremaneira o cálculo do PCZ, que é encontrado por uma equação típica do empirismo(Equação 2.9).

A capacidade de troca catiônica (CTC) é a capacidade que as argilas tem em adsorver, trocar e fixar cátions. Esta capacidade é o caminho natural para a manutenção da neutralidade do solo por meio do sistema da dupla camada elétrica, onde uma partícula com uma camada de cargas negativas é neutralizada por uma camada de íons carregados positivamente. Desse modo, percebe-se que houve um aumento considerável na CTC da região do ânodo, pois o solo no estado natural tinha baixa CTC, classificação inerente às caulinitas, e após o ensaio passou a ter alta CTC. Esta mudança de classificação pode ser explicada por, nesse ponto, existirem os dois tipos de capacidade, tanto de troca catiônica quanto aniônica. Ou seja, a capacidade de trocar cátions foi elevada, pois as forças para ocorrer esse mecanismo estavam muito mais fortes, já que seu espaço foi restringido.

O valor do potencial elétrico, que é a magnitude necessária para realizar o trabalho do deslocamento de uma carga, foi menor na região do ânodo (23,6 mV) por ser o local onde tinha uma alta capacidade de troca catiônica (21,39 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>).

Em se tratando das medidas de oxigênio dissolvido, nota-se que praticamente não houve alteração em sua magnitude quando do término da homogeneização (amostra MD) e no término do ensaio executado de modo padrão (reservatório PAD). Em relação ao ensaio executado no modo EO reversa, houve uma redução do oxigênio próximo a região do cátodo e um grande aumento próximo a região do ânodo. Essa é mais uma constatação de que a região aerada permitiu um processo contínuo e dinâmico de corrosão. A oxidação na área anódica está, assim, invariavelmente associada com o alto teor de oxigênio dissolvido como bem observado por Souza *et al.* (1988).

A matéria orgânica não teve grande influência no pH e PCZ dos ensaios em campo, por ter pequena quantidade no solo MD, segundo a classificação em anexo. Sua variação foi regular durante os ensaios, provavelmente, pela baixa classificação.

## 7.4.2. ANÁLISES MINERALÓGICAS

A caracterização mineralógica dos materiais é importante para compreender as análises químicas do solo, pois aquela dá sustentabilidade às análises químicas. A composição mineralógica, que condiciona as propriedades dos solos, foi identificada através de análise por difratometria de raios-X, já que as maiores partes dos constituintes ocorreram na fração silte e argila. A Figura 7.33 mostra o difratograma de raios-X realizados antes e após o ensaio executado no modo convencional. A Figura 7.34 com EO reversa, inclusive com amostras próximas aos drenos cátodos e ânodos.

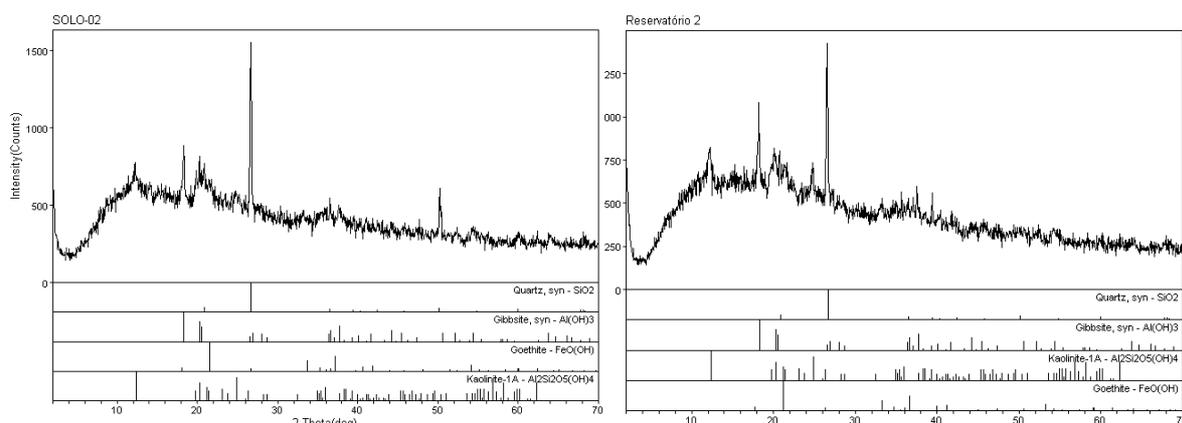


Figura 7.33 - Difratograma de raios-X da amostra MD e do reservatório PAD.

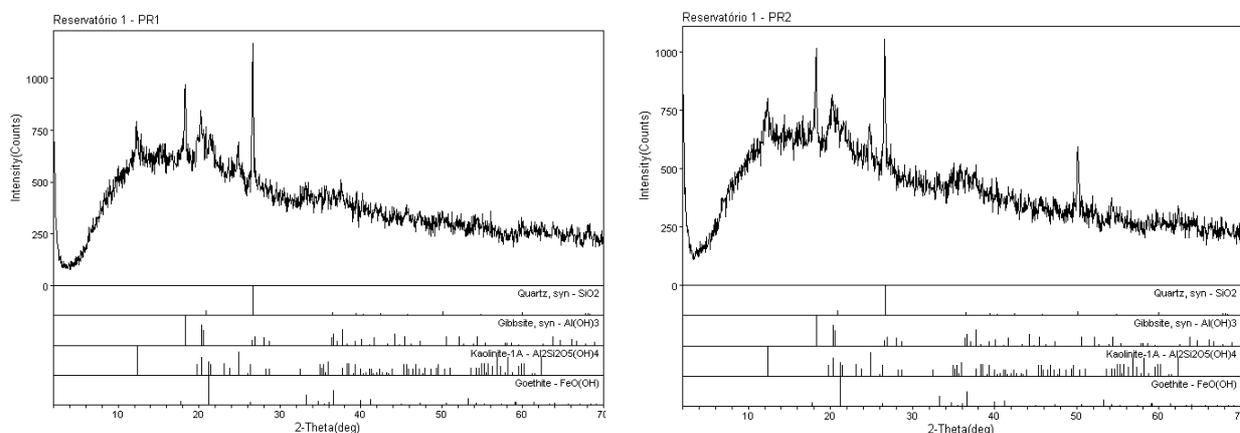


Figura 7.34 - Difratograma de raios-X da amostra do reservatório EO próximo ao dreno ânodo (PR1) e cátodo (PR2).

Os minerais que possuem uma estrutura cristalina bem definida, repetida de forma organizada por dimensões relativamente grandes, podem ser evidenciados por picos bem definidos, estreitos e simétricos, caso do quartzo encontrado. Ao contrário, os minerais com estrutura cristalina mal definida, cujos cristais são menores que a fração argila, formam picos pouco intensos e largos, tais como o argilomineral caulinita e os óxidos e hidróxidos encontrados. A Tabela 7.18 mostra os materiais encontrados no solo “MD” e após os ensaios.

**Tabela 7.18** - Resultados das análises de DRX.

<b>Amostra</b>	<b>Quartzo</b>	<b>Caulinita</b>	<b>Gibbsita</b>	<b>Goethita</b>
<b>MD</b>	X	X	X	X
<b>Reserv. EO(PR1)</b>	X	X	X	X
<b>Reserv. EO(PR2)</b>	X	X	X	X
<b>Reserv. PAD</b>	X	X	X	X

**Legenda:** MD – Mestre D'armas / Reserv. EO (PR1) – Reservatório Eletro-osmótico (Placa de Recalque 1) / Reserv. PAD – Reservatório Padrão

Foram identificados em todos os difratogramas analisados os mesmos materiais constituintes: O quartzo, que é um mineral primário característico da rocha mãe, o argilomineral caulinita, constituída de uma camada tetraédrica e outra octaédrica (1:1), a gibbsita ( $Al(OH)_3$ ) e traços da goethita ( $FeO(OH)$ ) que são os óxidos hidratos presentes em solos tropicais. Os óxidos de ferro e alumínio hidratados apresentam propriedades cimentantes que contribuem para o processo de formação das concreções lateríticas. Portanto, pode-se afirmar que a descrição pedológica desses solos será Horizonte B do Latossolo Vermelho-Amarelo por estar presente somente a goethita em termos de óxidos de ferro.

Por meio dos difratogramas apresentados, como esperado notou-se que não houve mudança na mineralogia do solo em conseqüências dos métodos de consolidação apresentados. Modificações foram encontradas apenas nas análises químicas, uma vez que são dependentes, dentre outros, do tipo de mineralogia.

### **7.4.3. ANÁLISES ELETRO-OSMÓTICAS**

Os ensaios de campo foram realizados em duas fases, sendo que a primeira foi composta por ensaios no modo normal de eletro-ose (Ensaio C1) e simultaneamente no modo padrão (Ensaio C2). De forma similar, a segunda fase foi composta por ensaios no modo de eletro-ose reversa (Ensaio C3) e no modo padrão (Ensaio C4) nas mesmas condições.

A experiência consistiu no acréscimo de tensão efetiva de aproximadamente 15 kPa na superfície do solo mole. Piezômetros foram instalados para medida de acréscimo de poropressão devido à presença da sobrecarga; placas de recalque mediam o deslocamento vertical provocado pelo processo de adensamento da argila saturada e a resistência não drenada da argila foi medida por meio do ensaio de palheta antes e após cada ensaio. A Tabela 7.19 mostra o resumo dos parâmetros fixos e alguns resultados obtidos nos ensaios desta etapa de campo.

**Tabela 7.19** - Resumo das variáveis e resultados obtidos nos ensaios em campo.

	FASE 1		FASE 2	
	ENSAIO C1	ENSAIO C2	ENSAIO C3	ENSAIO C4
USO DE ELETRO-OSMOSE	<i>com eletro-osmose</i>	<i>sem eletro-osmose</i>	<i>com eletro-osmose-reversa</i>	<i>sem eletro-osmose</i>
DATA DE INÍCIO DO ENSAIO	16/10/08	16/10/08	12/03/09	12/03/09
LOCAL	<i>Reserv. EO</i>	<i>Reserv. PAD</i>	<i>Reserv. EO</i>	<i>Reserv. PAD</i>
VOLUME DE SOLO NATURAL[V] (m <sup>3</sup> )	2,6	2,6	2,5	2,5
UMIDADE DO SOLO NATURAL [h] (%)	21,7	21,7	30,1	30,1
VOLUME DE ÁGUA ADICIONADO [V <sub>A</sub> ] (L)	3480	3360	4680	4680
QUANT. DE SAL ADICIONADO [Q] (Kg)	57	55	78	78
COMPRIMENTO DA AMOSTRA [L] (m)	0,75	0,75	0,90	0,90
ÁREA DA AMOSTRA [A] (m <sup>2</sup> )	8,0	8,0	8,0	8,0
UMIDADE PÓS HOMOGENEIZAÇÃO CALC [h <sub>C</sub> ] (%)	57	57	65	65
UMIDADE PÓS HOMOGENEIZAÇÃO [h <sub>p</sub> ] (%)	48,4	44,3	51,3	51,1
RECALQUE TOTAL [ρ] (mm)	9,5	4,5	15	8,9
VOLUME DE ÁGUA DRENADA [V <sub>D</sub> ] (L)	<i>não registrado</i>	<i>não registrado</i>	25,4	19,2
RESISTÊNCIA NÃO DRENADA INICIAL [S <sub>U0</sub> ] (kPa)	9,7	11,7	6,5	5,8
RESISTÊNCIA NÃO DRENADA FINAL [S <sub>U,F</sub> ] (kPa)	24,0	20,8	16,2	11,0
TEMPO TOTAL DO ENSAIO [T] (dias)	48	48	48	48
UMIDADE PÓS ENSAIO [h <sub>M</sub> ] (%)	29,7	35,2	41,8	46,2

---

Destaca-se que os ensaios da primeira fase foram executados no mês de outubro, com umidade relativa do ar muito baixa, menor que 25%, o que deixou o solo “BR” com a umidade natural em torno de 21,7%. Na segunda fase, a homogeneização foi com o solo “MD”, iniciada em fevereiro, mas devido a chuvas torrenciais, constantes e inesperadas, foi paralisada até o mês de março. Não sendo possível deixar o solo secar por um maior período, foi necessário a sua homogeneização com uma umidade natural de 30,1%.

Como pode-se observar na Tabela 7.19, a umidade natural do solo da segunda fase de ensaios foi praticamente 10% a mais que o da primeira fase. O volume de água a ser adicionado na massa de solo foi calculado em relação à umidade natural para obtenção de 15% de umidade acima do limite de liquidez. Mesmo assim, o volume de água a ser adicionado foi ainda maior na segunda fase, além da relação com a umidade natural, também pelo fato da altura da amostra dessa fase ter sido mais alta. É importante deixar claro que a umidade de água a ser adicionada na primeira fase foi maior no reservatório EO porque o servente estava colocando, por um período, um balde a mais no momento da homogeneização.

Percebe-se que o resultado da umidade após a homogeneização do solo é menor do que da umidade calculada, provavelmente devido a fatores como baixa umidade relativa e aspectos da interação solo-água, fatos que deixaram os valores de umidade bem próximos aos limites de liquidez dos respectivos solos.

O volume de água drenada não foi acomodado de forma adequada na primeira fase, pois houve problemas de vazamento identificados pela diminuição do volume de água contido nos baldes de recepção. Assim não será registrado. O problema foi corrigido para a segunda fase, obtendo-se um volume de água no balde de recepção 32% a mais no ensaio com eletro-osmose reversa comparado com o ensaio padrão.

Todavia, o volume de água retirada da massa de solo mole é bem maior do que o recepcionado no balde, o que é percebido comparando-se os resultados da umidade pós homogeneização com pós ensaio. Fazendo os cálculos da água drenada por meio dessa relação, para o ensaio C3, percebe-se que há uma diferença de umidade de 9,5% que equivale a perda de água de 350 L. Mas dessa perda, apenas 25 litros foi recepcionado no balde. Da diferença da água da redução de volume e água recepcionada, o equivalente a 0,325 m<sup>3</sup>, provavelmente, uma parte foi evaporada e também absorvida pela areia seca da sobrecarga por consequência do processo de adensamento e a outra parte foi o volume de água

hidrolisado como resultado das reações de eletrólise já apresentados na revisão bibliográfica, onde:



Desse modo a quantidade do gás hidrogênio e oxigênio produzidos é igual a  $0,216\text{m}^3$  e  $0,108\text{m}^3$ , respectivamente.

Os comparativos dos recalques e resistências ao cisalhamento não drenada obtidas nos ensaios serão disponibilizados em forma de gráfico a seguir.

#### 7.4.3.1. ANÁLISE DO ENSAIO C1

A análise é baseada no desenvolvimento do recalque e da corrente induzida ao longo do ensaio executado com eletro-osmose no modo normal. A Figura 7.35 mostra a relação da corrente com o recalque apresentado pela placa de recalque próximo ao dreno ânodo (PR-1) e próximo ao dreno cátodo (PR-2).

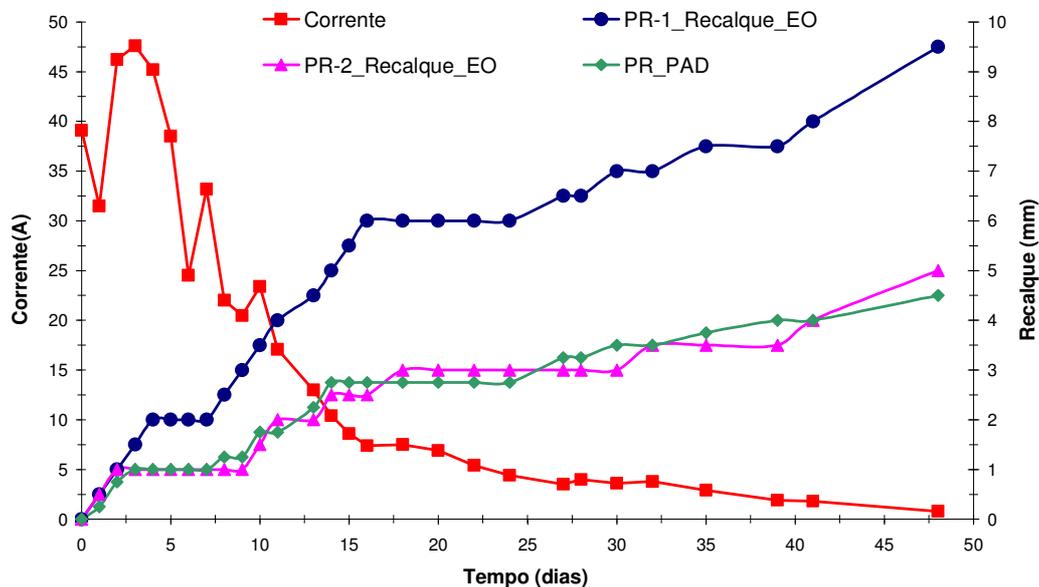


Figura 7.35 - Relação da corrente e recalque no ensaio C1 – solo BR, EO normal.

Assim como nos ensaios de laboratório, percebe-se que a corrente decresce com o tempo. Identificaram-se três retas acíves nos 10 primeiros dias do ensaio, com períodos de 5 dias. Pode-se observar que as mesmas diminuem de comprimento à medida que surgem, o que mostra que a tendência da corrente é realmente decrescer.

Observando o gráfico, pode-se concluir que a corrente induziu o fluxo de água do ânodo para o cátodo, pois o recalque apresentado pela placa (PR-2) próximo ao dreno cátodo tem comportamento e valores similares ao recalque do reservatório PAD. Enquanto a reta do recalque da PR-1 se apresenta totalmente em destaque, por ter menos quantidade de água próximo ao dreno ânodo devido à sua condução.

Nota-se que a corrente tem uma relação direta com o recalque da PR-1, pois junto com a primeira reta a cive da corrente ocorre o crescimento do recalque que se estabiliza com a queda da corrente. Novamente, com a soma das duas retas a cives seguintes, resulta em um aumento do recalque mais acentuado. A partir de 15 dias de ensaio, a corrente fica mais estável fazendo com que o recalque se desenvolva gradativamente.

Com relação às medidas da poropressão neste ensaio, não foi possível fazer o acompanhamento de seu desenvolvimento devido à soma de vários fatores, tais como: a quantidade de geotêxteis ao redor do tubo dificultando a passagem da água, a entrada de solo por falha na fixação do geotêxtil, presença de bolhas de ar, entre outros.

#### 7.4.3.2. ANÁLISE DO ENSAIO C3

O ensaio C3 se caracteriza por ter utilizado o modo de EO reversa, onde a polaridade era mantida igual ao modo inicial por 3 dias e no modo inverso por 2 dias, o que foi denominado de reversão 3 x 2. A Figura 7.36 mostra a relação da corrente com o recalque apresentados pela placa de recalque próximo ao dreno ânodo (PR-1) e ao dreno cátodo (PR-2).

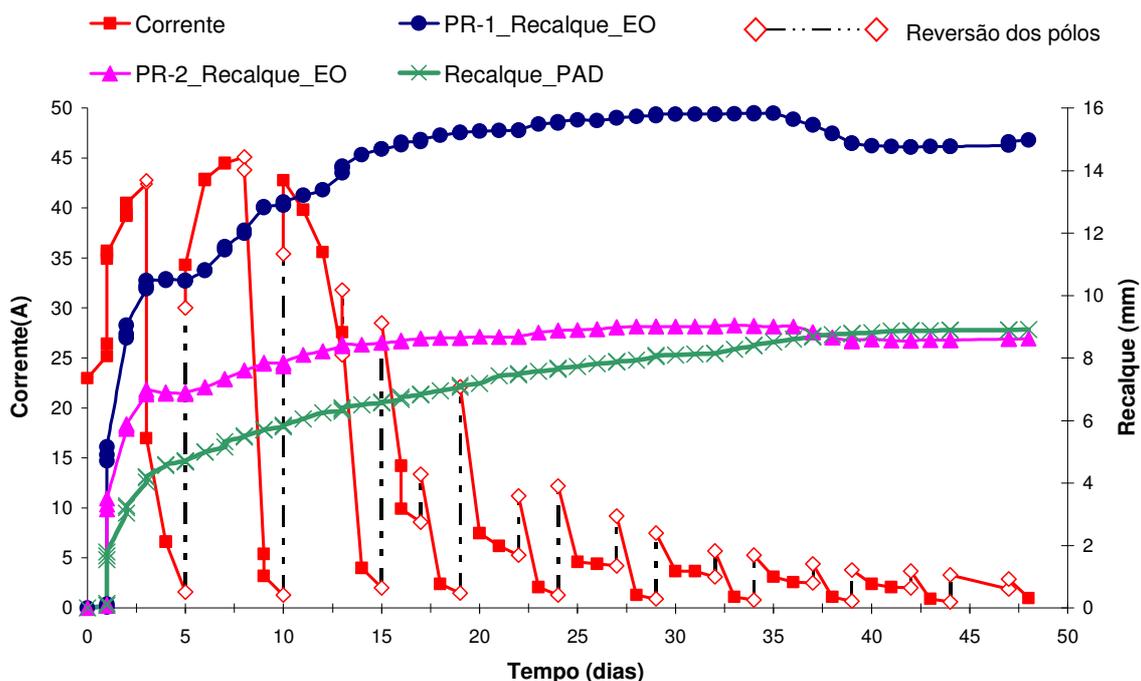


Figura 7.36 - Relação da corrente e recalque no ensaio da eletro-osmose reversa (Ensaio C3).

---

O ensaio teve comportamento semelhante ao encontrado em laboratório, pois a corrente oscilou de acordo com um ciclo do início até o final do ensaio, tendendo a cair com o passar do tempo. Percebe-se esse ciclo, em que nos três primeiros dias de polaridade normal a corrente tende a subir de modo acelerado, quando a polaridade é invertida, ao final dos dois dias de execução a corrente cai de forma brusca para 1,6 A. Voltando a subir quando a polaridade retorna para o formato inicial. Ao visualizar o gráfico, nota-se que, ao final do período, a polaridade está invertida (após 2 dias), a corrente desce para seu valor mínimo e que no período em que a polaridade está no modo normal, a corrente tende a se estabilizar com o tempo.

Provavelmente esta queda brusca ocorre por ter-se iniciado o processo de corrosão do eletrodo ânodo, deixando o eletrodo cátodo intacto, como acontece na pilha eletroquímica. O eletrodo cátodo, até então intacto, atrai os íons positivos presentes no meio de forma continuada. Quando da reversão, o eletrodo cátodo com início de degradação não atraiu os íons positivos de forma igualitária, o que diminuiu sobremaneira a corrente do meio.

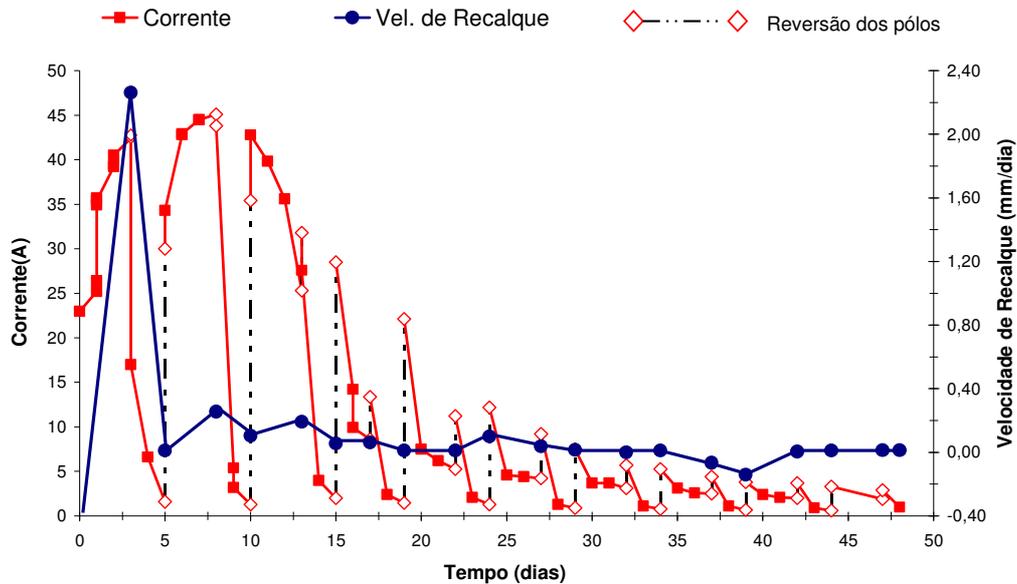
Foi justamente por esse motivo que se resolveu utilizar a reversão 3 x 2, já que com a polaridade invertida, a corrente caiu de forma bem mais rápida, chegando ao seu mínimo, podendo afetar diretamente a eficiência do processo de eletro-osmose.

Também neste ensaio, no modo de EO reversa, percebe-se que a corrente é o parâmetro norteador do método, pois o recalque apresentado pela placa (PR-2), próximo ao dreno cátodo, tem comportamento similar ao recalque do reservatório PAD. Enquanto a curva do recalque da PR-1 se apresenta totalmente em destaque. Esse afastamento das medidas de recalques da PR-1 acontece, provavelmente porque, quando a polaridade está no modo inicial, tem-se maiores valores de corrente, mais estáveis, bem como maior duração da reversão 3 x 2. Desse modo, a água é induzida por maior período, do dreno ânodo para o cátodo, conseqüentemente, tem-se uma menor quantidade de água próximo ao dreno ânodo. Em resumo, o gráfico mostra claramente que, até o 13º dia, os maiores recalques ocorreram quando a polaridade estava no modo normal.

Um detalhe interessante é que, a partir dos 35 dias de execução do ensaio, ocorreu uma diminuição do recalque, como se o solo estivesse empurrando a placa de recalque para cima. A estabilização do recalque é conseguida justamente quando a corrente tenta se manter constante e com valor que não provoca significativo fluxo de água. A ascensão da superfície

também foi encontrada por Nascimento (2005), Lo *et al.* (1991b) e Casagrande (1952) citado por Lo *et al.* (1991b).

Para entender o grau de influência que a corrente tem no desenvolvimento do recalque, resolveu-se elaborar o gráfico da velocidade de recalque em função da corrente existente no sistema (Figura 7.37).



Pode-se observar que a maior velocidade de recalque ocorreu até o terceiro dia de execução do ensaio, antes da primeira reversão. Isso se deve, possivelmente, a dois motivos principais: a corrente mais que dobrou em um curto intervalo de tempo e a arrumação das partículas do solo argiloso imposta pelo peso da sobrecarga por ter acabado de ser instalada.

É notória a visualização da queda da velocidade de recalque nos intervalos em que a polaridade foi revertida. Existe uma queda maior após a primeira reversão (3°-5° dias) por causa da inclinação brusca da corrente, somado ao fato das partículas de solos já estarem em posição de equilíbrio. Nos outros intervalos a queda é suavizada por estar mais relacionada à corrente. Situação inversa ocorre quando a polaridade se encontra no modo normal (inicial), a velocidade de recalque aumenta por a corrente estar mais estabilizada e com maior valor em grande parte do trecho. Em face do exposto, fica claro que no método eletrocínético, a corrente rege o comportamento da consolidação do solo.

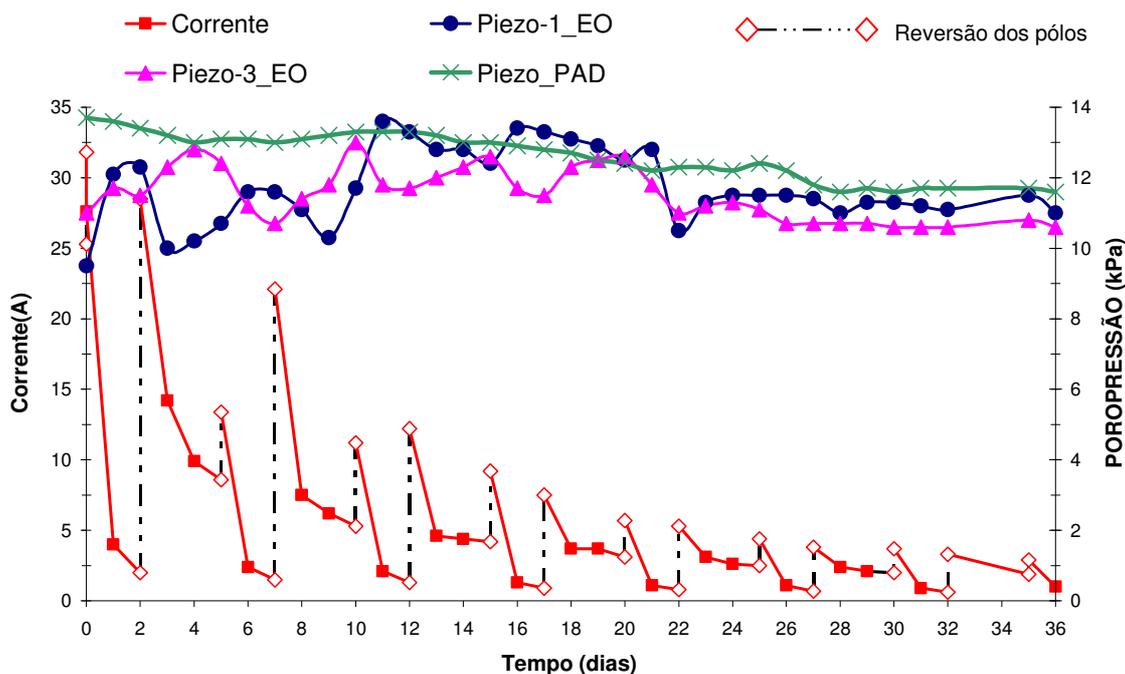
---

Para medir o acréscimo de poropressão existente no ensaio, foram instalados três piezômetros distribuídos em locais estratégicos, ou seja, o piezômetro 1 próximo a um DCE ânodo, o piezômetro 2 situou-se entre dois DCEs de cargas diferentes e o piezômetro 3 próximo a um DCE cátodo, como foi mostrado na Figura 6.37. Esta estratégia foi para observar o comportamento da poropressão no reservatório experimental com EO.

Salienta-se que houve problemas com os piezômetros também nesta fase do ensaio, apesar de que não foi nenhuma das dificuldades descritas no ensaio anterior. Ainda assim, a água no interior dos tubos apresentou-se bem límpida e com mesmo nível nos dois tubos que se encontravam lado a lado nas ripas, indicando a não existência de bolhas de ar na parte interna, como foi observado na Figura 6.41. Contudo, ao se colocar a sobrecarga no sistema pôde-se observar que o nível de água do piezômetro (acrécimo de poropressão) não se encontrava próximo ao local estimado. Além do mais, o nível estava descendo de forma muito rápida. Ao se fazer algumas análises, concluiu-se que, provavelmente, no momento da instalação dos piezômetros, por a ripa ter um grande comprimento, não foi possível descê-la totalmente na vertical por ter sido impedida pela cobertura de lona do barracão. Desse modo, ficou um pouco inclinada e, depois de cravada, era colocada na posição vertical. Esse procedimento fez com que a água tivesse um caminho preferencial, de maneira que era conduzida pela lateral do piezômetro em vez da parte interna do piezômetro. Assim, a medida indicada no piezômetro não era o acréscimo de poropressão real naquele ponto e sim, um acréscimo de poropressão com perdas significativas.

Enquanto isso, o nível de água se encontrava abaixo da cota da superfície da sobrecarga, o que dificultou ainda mais sua medida. Após alguns dias do início do ensaio, mais precisamente 12 dias, foi notado que o nível de água de um dos piezômetros se encontrava um pouco acima da cota da superfície da sobrecarga. Dessa forma, houve um aumento do acréscimo da poropressão com o tempo, o que pode ocorrer no processo eletrocinético.

A partir desse momento começou-se a acompanhar o desenvolvimento desse acréscimo de poropressão desconhecido, percebendo-se que à medida que se revertia à polaridade dos eletrodos, havia uma elevação ou diminuição da posição do nível de água do piezômetro. Foi feita uma adaptação do procedimento de leitura, colocando uma haste de madeira suficientemente fina dentro do tubo do piezômetro. A Figura 7.38 apresenta o desenvolvimento da poropressão, tanto do piezômetro próximo ao dreno ânodo (Piezo-1), ao dreno cátodo (Piezo-3) quanto no reservatório PAD.



**Figura 7.38** - Desenvolvimento da poropressão no reservatório EO e PAD.

Ressalta-se que, como houve desvio da água por caminhos preferenciais nas laterais dos piezômetros, não se pode afirmar que os acréscimos de poropressão encontrados são todos proporcionais entre si. Dessa maneira, fez-se a medida da poropressão no ponto inferior dos reservatórios após colocar a sobrecarga. Destaca-se que as medidas foram realizadas apenas 12 dias após o início do ensaio, por motivos já esclarecidos. Mesmo com os problemas encontrados, pode-se entender por meio do gráfico, o comportamento da poropressão no processo de eletro-osmose reversa.

Observando esse gráfico, é claramente perceptível que a corrente realmente governa o sentido do fluxo da água. Pois, quando a polaridade é revertida, há um aumento de poropressão em um dos piezômetros e, simultaneamente, diminuição no outro. Tomando-se como exemplo o trecho do 7º ao 10º dia de ensaio, percebe-se que a polaridade passa para o modo inicial (7º dia), ou seja, o DCE na posição 1 é positivo (ânodo) e na posição 2 é negativo (cátodo). Com isso, a poropressão medida no piezômetro 3, que está próximo do dreno cátodo, começa a aumentar e no piezômetro 1, próxima ao ânodo, começa a diminuir, indicando que a água está sendo conduzida do ânodo para o cátodo, da posição 1→2.

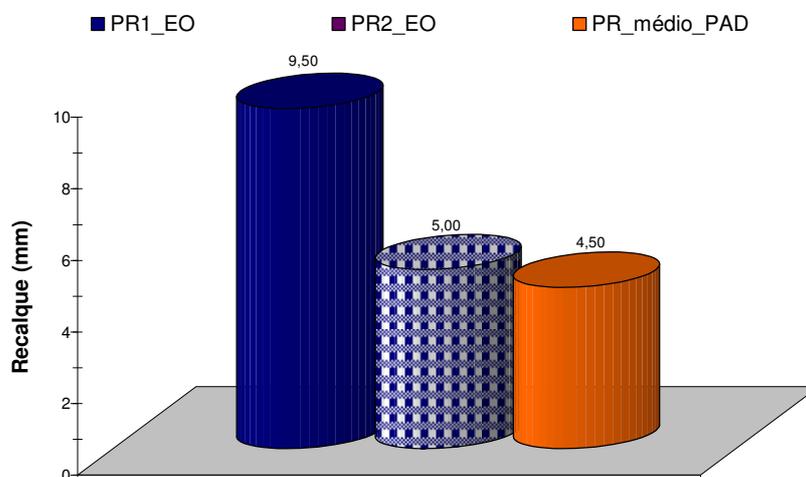
Do mesmo modo, quando a polaridade é invertida (10º dia), o DCE na posição 1 passa a ser cátodo e na posição 2 passa a ser ânodo, fazendo com que a poropressão do piezômetro 1 comece a aumentar e do piezômetro 3 a diminuir. Indicando agora o sentido do fluxo da posição 2→1.

Pode-se perceber, também no gráfico que, por causa da reversão da polaridade, e consequentemente, do fluxo de água, existe a formação de aros até o 28º dia. A partir deste ponto, por a corrente ser considerada baixa, em comparação aos valores iniciais, a poropressão tem uma pequena variação até o final, o que indica que, quando a corrente estava abaixo de 2,5 A, não houve força para reversão do fluxo. Assim a distância entre as medidas de poropressão foram se estreitando com o tempo.

Em contrapartida, a poropressão do piezômetro do ensaio realizado sem eletro-osmose foi decrescendo gradativamente com o tempo, sendo que ao final apresentou poropressão maior que o do reservatório com EO. Isso pode ser uma comprovação de que o método eletrocinético reduz mais rapidamente a poropressão existente na massa de solo mole, acelerando o seu processo de consolidação.

#### 7.4.3.3. ANÁLISE DO RECALQUE TOTAL E RESISTÊNCIA NÃO DRENADA

O recalque total alcançado e o ganho de resistência ao cisalhamento são parâmetros de fundamental importância que dão condições de comparação entre os resultados dos ensaios eletrocinéticos com os ensaios padrões. Para tanto, foram feitos gráficos do recalque e resistência ao cisalhamento dos ensaios executados com EO normal e padrão - Fase 1 (Figuras 7.39 e 7.40) e executados com eletro-osmose reversa e padrão - Fase 2 (Figuras 7.41 e 7.42). Destaca-se que os gráficos foram construídos isoladamente, porque os ensaios de cada fase foram executados em diferentes condições de umidade, volume de solo natural e comprimento da amostra de solo mole, como mostrado na Tabela 7.19. Por esse motivo não é recomendável fazer a comparação direta entre os mesmos e sim de forma relativa, como será analisado posteriormente.

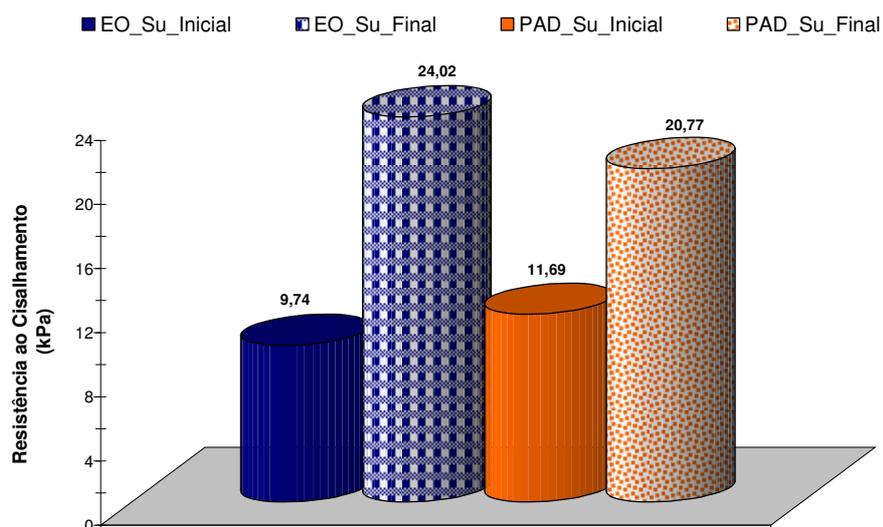


**Figura 7.39** - Comparação dos recalques totais dos ensaios da fase 1 – Solo BR, EO normal.

As placas PR-1 e PR-2 estavam próximas do DCE ânodo e cátodo, respectivamente. No reservatório PAD o resultado do recalque foi a média entre as duas placas. Assim, para o processo que utilizou o método convencional (dreno + sobrecarga) houve um deslocamento de 4,5 mm, que equivale a 0,6% de recalque da massa de argila mole em 48 dias de ensaio. Para o processo que utilizou a eletricidade, houve um deslocamento de uma das placas de 9,5 mm, aproximadamente 1,27 % no mesmo intervalo de tempo.

Pode-se observar pelo gráfico que o recalque apresentado pela PR-1 foi 90% a mais que a PR-2, que, por sua vez, teve um aumento de 11% em relação ao reservatório PAD. Portanto, a camada de argila que utilizou o processo de eletro-osmose recalcou, em uma determinada área, 111 % a mais em comparação à camada de solo que utilizou o processo convencional. Dentro dessa contextualização, o processo convencional necessitaria de aproximadamente 102 dias para conseguir acelerar a consolidação na mesma taxa que o método eletro-osmótico conseguiu em 48 dias.

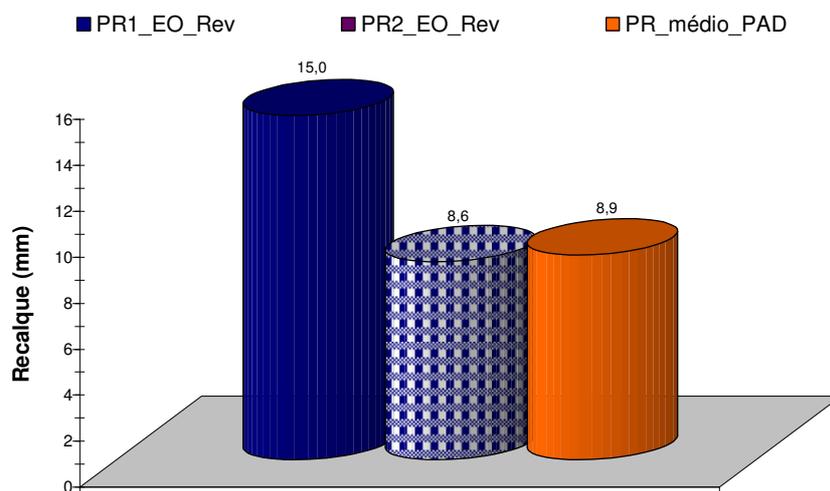
Esses resultados confirmam que no modo de eletro-osmose normal o recalque apresenta um pequeno desnível quando próximo aos drenos devido ao fato da água ter seguido o caminho do ânodo para o cátodo, e conseqüentemente, há maior perda de água nos ânodos e, por isso, maior consolidação nessas áreas. Tanto que, por ter tido essa movimentação forçada da água, a área do dreno cátodo tende a conseguir um recalque bem próximo dos alcançados pelas áreas dos drenos convencionais.



**Figura 7.40** - Comparação da resistência ao cisalhamento dos ensaios da fase 1.

Com relação ao ganho de resistência ao cisalhamento na massa de solo mole, pode-se perceber que o processo de eletro-osmose no modo normal melhora a resistência em praticamente 150% e que o modo padrão de consolidação melhora em torno de 80%. Logo, os resultados mostraram que a resistência pode ser melhorada pelo método eletrocínético, mas, é importante lembrar que uma contribuição para o surgimento dessa margem entre os ensaios é que a massa do reservatório EO apresentava-se um pouco mais úmida que a massa do reservatório PAD no momento da homogeneização. Por mais que tenha ocorrido esse pequeno desvio de umidade, intuitivamente e visivelmente percebe-se que a diferença da resistência entre os dois ensaios é bastante considerável.

Em se tratando dos ensaios executados com a reversão dos pólos, fez-se o mesmo tipo de comparação, diferenciando-se apenas o gráfico da resistência ao cisalhamento, pois essa foi medida em áreas próximas aos drenos cátodos e ânodos.



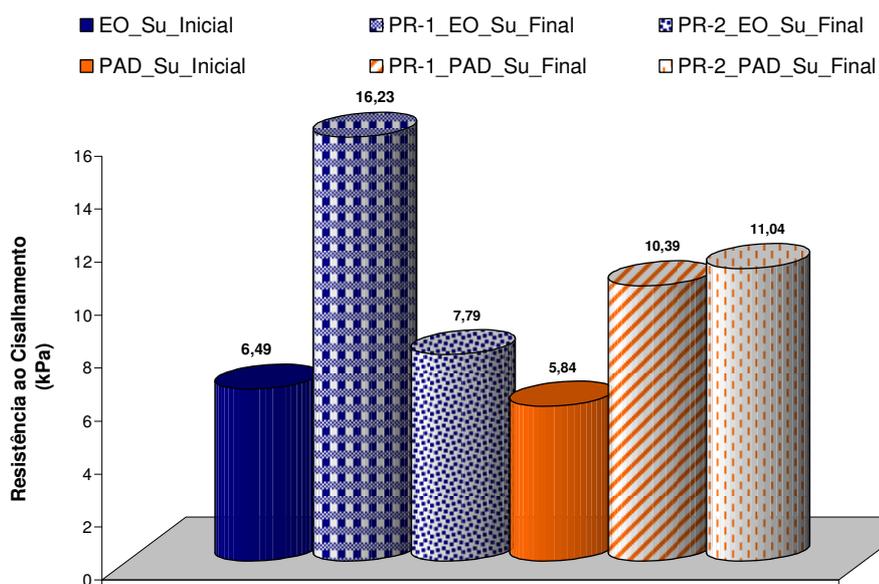
**Figura 7.41** - Comparação dos recalques totais dos ensaios da fase 2.

O processo que utilizou o método convencional atingiu um recalque médio de 8,9 mm, que equivale a 0,99% de deslocamento da massa de argila mole em 48 dias de ensaio. Para o processo eletrocínético, houve um deslocamento de uma das placas de 15 mm, aproximadamente 1,67 % no mesmo intervalo de tempo. Percebe-se que houve um aumento do recalque na mesma tendência nos ensaios EO reversa e padrões ao serem relacionados aos ensaios EO e padrões da fase anterior.

Do mesmo modo, a PR-1, que antes da primeira reversão estava próxima ao dreno ânodo, recalcou 75% a mais que a placa situada próxima ao dreno cátodo no mesmo intervalo, sendo

que essa atingiu um recalque 3,5% menor que o ensaio que não usou a eletricidade. Portanto, o solo do método eletrocinético recalcou 68,5% mais que o método padrão.

Fazendo-se a relação dos gráficos de recalque da Figura 7.41 e 7.39, pode-se perceber que o ensaio executado com eletro-osmose no modo normal atingiu maiores recalques que os ensaios no modo reverso, quando relativo aos recalques dos seus ensaios padrões, mais precisamente, 42,5% a mais de recalque total no mesmo intervalo de tempo, mesmo esse último tendo maior umidade e comprimento da amostra.



**Figura 7.42** - Comparação da resistência ao cisalhamento dos ensaios da fase 2.

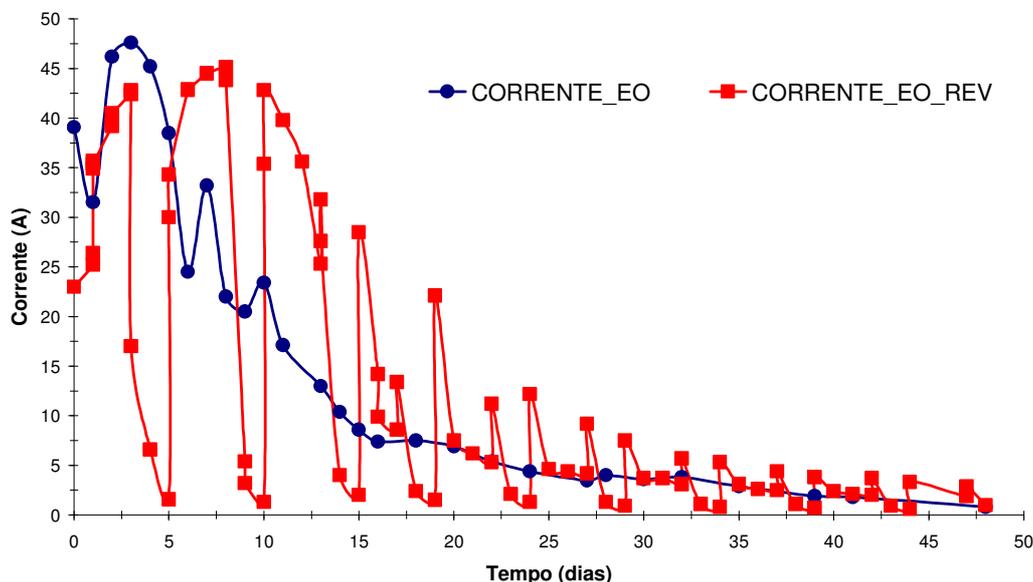
Ao se avaliar os resultados desse ensaio, percebe-se que o valor da resistência apresenta-se mais baixa do que o da primeira fase. A diferença ocorreu porque a umidade inicial dos ensaios da primeira fase foi menor e por isso encontraram-se maiores valores de resistência ao cisalhamento, como pode ser visto na tabela de resumo das variáveis e resultados.

A região próxima à PR-1 apresentou melhores resultados de resistência, tendo um ganho da ordem de 150%. Na região próxima a PR-2 houve um ganho de resistência em torno de 20%. Como já demonstrado anteriormente, essa diferença ocorreu porque a água estava sendo conduzida por eletricidade do ânodo para o cátodo na maior parte do tempo do ensaio. Como os valores de resistência das regiões próximas às placas de recalque são muito aproximados no ensaio convencional, resolveu-se fazer a média, chegando-se a conclusão que no ensaio padrão houve um ganho de resistência de 83,5%. Assim, o uso da eletricidade no ensaio disponibilizou um ganho de resistência de 66,5% no mesmo período de tempo e nas mesmas condições de contorno.

---

Ao se fazer a comparação entre os ensaios das duas fases, conclui-se que o ganho de resistência utilizando o método eletrocinético com polaridade constante foi igual ao do método com polaridade reversa. Para se ter uma idéia da confiabilidade desses resultados, verificou-se que o ganho de resistência dos ensaios padrões nas duas fases foi de 80% e 83,5%, respectivamente, conseguindo-se, portanto, uma repetição dos valores da resistência.

Para tentar compreender porque o ensaio executado no modo normal de eletro-osmose recalcou 42,5% a mais e teve o mesmo ganho de resistência do ensaio executado com polaridade reversa, resolveu-se comparar e analisar o comportamento da variável que influencia diretamente nos processos: a corrente elétrica (Figura 7.43).



**Figura 7.43** - Comparação entre a corrente desenvolvida nos ensaios “EO” e “EO reversa”.

Pode ser verificado, por meio do gráfico da comparação entre as correntes, que o ensaio executado com eletro-osmose no modo normal tem valores mais elevados de corrente quando comparado com o valor médio imaginário da corrente no ensaio do modo reverso, principalmente nos 15 primeiros dias de execução. A partir desse período, a corrente do ensaio da fase 1 começa a se igualar com a média da corrente do ensaio da fase dois. Essa diferença pode ser explicada com os valores da condutividade elétrica do solo (Tabela 7.20), pois a condutividade da massa de solo do ensaio com EO reversa tinha menor intensidade que o do ensaio no modo normal. Logo, conclui-se que o fator determinante pelo qual se obteve o recalque mais acentuado no ensaio do modo normal de EO foi que nos 15 primeiros dias de execução conseguiram-se valores de corrente mais elevados na maior parte do tempo.

---

Os ensaios em campo apresentaram resultados, em termos de eficácia dos métodos, similares aos de laboratório, pois da mesma forma, os solos consolidados com eletro-osmose no modo normal alcançaram recalques superiores, ficando em segundo lugar os ensaios com eletro-osmose reversa e por último os ensaios convencionais. A mesma tendência foi encontrada por White *et al.* (2008) no tratamento de esgoto, em que o tratamento no modo normal de EO apresentou maiores deslocamentos verticais, como também maiores valores de corrente e temperatura em comparação ao modo reverso e o padrão.

#### **7.4.3.4. PARÂMETROS ELETRO-OSMÓTICOS DOS ENSAIOS EM CAMPO**

Para a compreensão mais clara da evolução dos resultados dos ensaios realizados em campo, é apresentada a Tabela 7.20 com os principais parâmetros eletro-osmóticos encontrados diretamente por meio de equipamentos específicos ou calculados.

Volta-se a lembrar que a diferença de potencial imposta no sistema foi de 24 V resultando em valores diferentes de corrente no início do ensaio. A diferença da corrente entre os ensaios ocorreu, justamente, devido à diferença da condutividade elétrica do solo, como pode ser visualizado na Tabela 7.20.

Os coeficientes de permeabilidade eletro-osmótica encontrados nos ensaios de campo foram da ordem de  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s.V}$ , tanto no ensaio com EO no modo normal, quanto no modo inverso. Esses valores apesar de terem sido menores que os dos ensaios realizados em laboratório, possivelmente em virtude da carga de laboratório ter tido maior intensidade, ainda se encontram nos intervalos definidos por Hamed *et al.* (1991) e Velten (2008). As eficiências eletro-osmótica quando calculadas foram praticamente iguais por essa ser em função da permeabilidade eletro-osmótica.

**Tabela 7.20** - Resumo dos parâmetros eletro-osmóticos dos ensaios em campo.

	ENSAIO C1	ENSAIO C2	ENSAIO C3	ENSAIO C4
<b>USO DE ELETRO- OSMOSE</b>	<i>com</i> <i>eletro- osmose</i>	<i>sem</i> <i>eletro- osmose</i>	<i>com eletro</i> <i>osmose- reversa</i>	<i>sem</i> <i>eletro- osmose</i>
<b>TENSÃO [U] (V)</b>	24	-	24	-
<b>CORRENTE ELÉTRICA [i] (A)</b>	39,1	-	23,4	-
<b>CONDUTIVIDADE ELÉTRICA [<math>\sigma_e</math>] (mS/cm)</b>	7,5	-	5,8	-
<b>COEF. DE PERMEABIL. ELETRO-OSMÓTICA [<math>K_e</math>] (m<sup>2</sup>/V.s)</b>	$5,1 \times 10^{-10}$	-	$3,9 \times 10^{-10}$	-
<b>EFICIÊNCIA ELETRO- OSMÓTICA [<math>K_i</math>] (cm<sup>3</sup>/A.s)</b>	0,01	-	0,01	-
<b>CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA [<math>P_u</math>] (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	78,12	-	58,75	-
<b>CUSTO (R\$/ m<sup>3</sup>)</b>	24,22	-	18,21	-
<b>TEMPO TOTAL DO ENSAIO [T] (dias)</b>	48	48	48	48

Na prática, o ensaio que conseguiu ter maior eficiência foi EO no modo normal por ter apresentado um recalque 42,5% a mais e contendo a mesma resistência. Esse resultado confirma o apresentado em laboratório. A coerência quanto à eficiência é notória, já que o ensaio no modo normal apresentou maiores valores de corrente, o que implica em mais movimento de íons e, assim, mais moléculas de água sendo arrastadas ao dreno em certo intervalo de tempo.

---

O consumo de energia, conseqüentemente, o custo, foram diferentes para os dois ensaios de referência. O ensaio com eletro-osmose no modo normal consumiu 33% a mais que o ensaio executado no modo reverso, no mesmo intervalo de tempo. Um pouco acima do resultado encontrado nos ensaios de laboratório, onde o ensaio B5 (EO normal – aço) consumiu 25% mais de energia que o ensaio B6 (EO reversa – aço). A mesma tendência foi encontrada em outros trabalhos de pesquisa, tais como Jones *et al.* (2002), os quais obtiveram um consumo de energia 45% menor quando utilizado a EO reversa, porém menor benefício foi alcançado ao escolher este método. Esses autores relataram que a eletro-osmose reversa produziu condições de resistência ao cisalhamento mais uniforme.

Ao contrário da experiência de Jones *et al.* (2002), no ensaio de reversão realizado em campo não foi possível identificar a uniformização da resistência ao cisalhamento, já que a resistência da área próxima ao cátodo foi similar à do ensaio padrão, sendo que da região próxima ao dreno oposto (ânodo) esse parâmetro teve um aumento substancial. Daí, neste trabalho, a eletro-osmose reversa não deixou a resistência uniforme entre os drenos, pelo fato do método EO no modo normal ter oferecido maiores correntes na maior parte do tempo, pois, quando a polaridade foi revertida, a corrente teve um decréscimo rápido e espontâneo.

Acredita-se que a uniformização desses dados apenas é possível se a reversão da polaridade ocorrer em um menor espaço de tempo, antes da queda abrupta da corrente no modo reverso.

Dentro desse contexto, entendeu-se que, em termos de custo benefício, o método da eletro-osmose reversa teve a vantagem de apresentar o mesmo ganho de resistência ao cisalhamento, consumindo 33% de energia a menos, muito embora, tenha recalcado 42,5% a menos da massa de solo mole.

#### **7.4.4. DETALHES FÍSICOS DA EXECUÇÃO DOS ENSAIOS EM CAMPO**

Da mesma forma que o ensaio de laboratório, existe um determinado mecanismo de execução que foi obedecido nos ensaios em campo que resultaram em alguns detalhes físicos. Esses detalhes fazem parte do cotidiano do método EO, por isso sua importância em serem divulgados, podendo até ajudar a compreender o comportamento do método nos ensaios de maior escala.

Após ligar a fonte e abrir o registro do balde de recepção, notou-se que água sai praticamente límpida nos dois ensaios e depois passa a ficar mais turva. Com 4 dias de ensaio, a água recebida do reservatório EO já apresenta uma coloração amarelada, enquanto do reservatório PAD continua com uma turbidez de cor esbranquiçada. Notou-se, ainda, que a vazão de drenagem da água do reservatório que utilizou a eletricidade foi maior do que o ensaio sem a energia. A Figura 7.44 mostra a diferença de coloração da água drenada dos reservatórios, bem como a diferença de quantidade de água nos seus respectivos baldes de recepção, no início do ensaio.

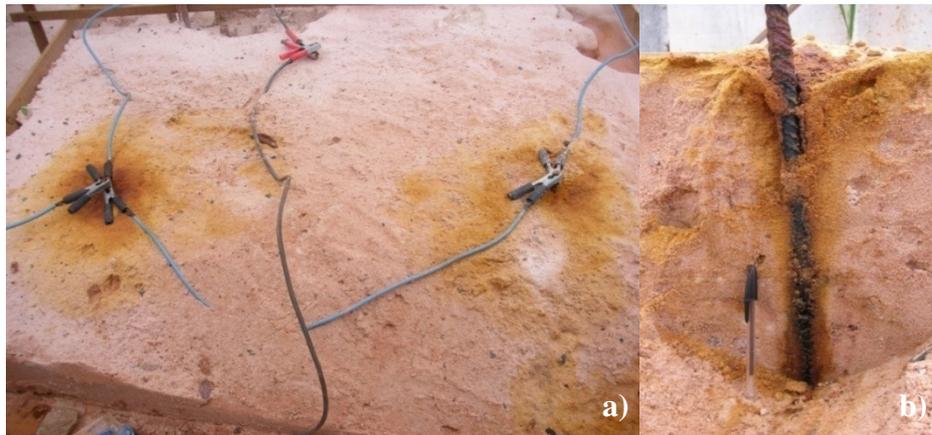


**Figura 7.44** - Água drenada dos reservatórios EO (a) e PAD (b).

É evidente que essa diferença de coloração da água drenada ocorreu por causa do processo de corrosão eletroquímica que se iniciou no sistema, havendo o ataque corrosivo no aço nos eletrodos ânodos. No quinto dia de ensaio, resolveu-se fazer uma escavação ao redor do eletrodo ânodo para confirmação das suspeitas de corrosão, onde foi notado que na região da sobrecarga de areia próxima a esse eletrodo estava surgindo um extrato amarelado, portanto, também fonte da corrosão existente no meio (ver Figura 7.44c).

Com o passar do tempo, surgiu o extrato amarelado em todos os eletrodos ânodos, sendo que no final do ensaio os mesmos apresentavam-se praticamente todos deteriorados. Como pode ser visto na Figura 7.45a, a região ao redor do eletrodo cátodo não apresenta tal coloração, indicando que o processo de corrosão eletroquímico ocorre no ânodo como já explicado nos detalhes físicos dos ensaios de laboratório. Ao observar o perfil do eletrodo, percebe-se que o

mesmo está inteiro na parte superior, em torno de 25 cm. A partir deste ponto, está tão deteriorado que apenas são identificados restos do material aço.



**Figura 7.45** - a) Vista superior dos drenos ânodos (ligados pelo fio azul) e cátodo (ligado pelo fio preto) – b) perfil da parte superior do eletrodo de aço.

A água drenada do reservatório EO estava, no final do ensaio, com um aspecto total de ferrugem (Figura 7.46) e odor característico, enquanto a água do reservatório PAD se encontrava com o mesmo aspecto.



**Figura 7.46** - Parte da água drenada do reservatório EO no final do ensaio.

#### **7.4.4.1. CORROSÃO ELETROQUÍMICA EM CAMPO**

Conforme se discutiu no item de corrosão eletroquímica em laboratório, a corrosão do aço pode se dar através de uma reação direta do meio corrosivo com o metal, ou por intermédio de um fenômeno eletroquímico. Sabe-se, no entanto, que, para os ensaios realizados tanto em laboratório quanto em campo, o segundo mecanismo é extremamente relevante. Com a corrosão eletroquímica ocorre, concomitantemente à deterioração, o transporte de eletricidade através de um eletrólito, isto é, as reações anódicas e catódicas.

---

Em campo, a corrosão também comprometeu a integridade física dos eletrodos, diminuindo sobremaneira, a seção transversal do aço, chegando ao extremo do rompimento. A Figura 7.46 mostra o estado dos eletrodos quando os drenos foram abertos.

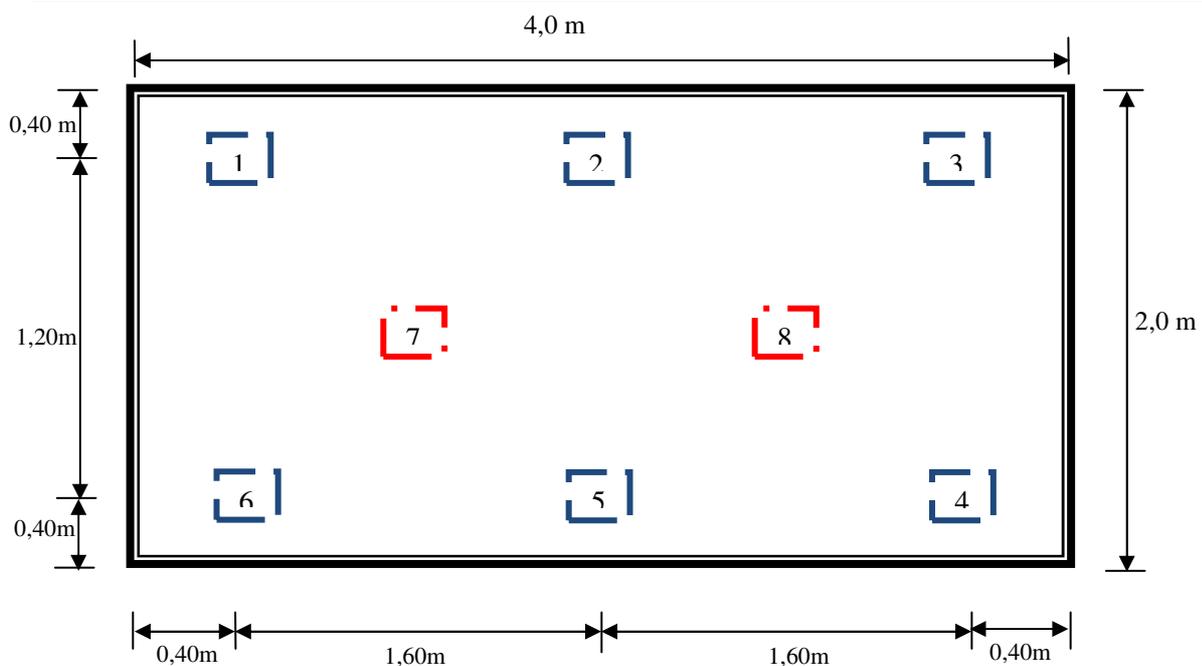


**Figura 7.47** - Eletrodos deteriorados.

Os eletrodos apresentados na Figura 7.47 foram retirados ao término do ensaio de eletrosmose reversa. Pode-se perceber que os dois eletrodos da parte inferior da figura apresentam-se, em alguns trechos, totalmente deteriorados e em outros com pontos críticos de ataque corrosivo. O eletrodo superior se encontra com um menor grau de corrosão porque estava, na maior parte do tempo, no dreno cátodo, aquele que sofre a reação de oxidação. Mas, com a reversão passa a ter a reação de redução, por isso a existência de partes escuras evidenciando o trecho de corrosão, formação da magnetita.

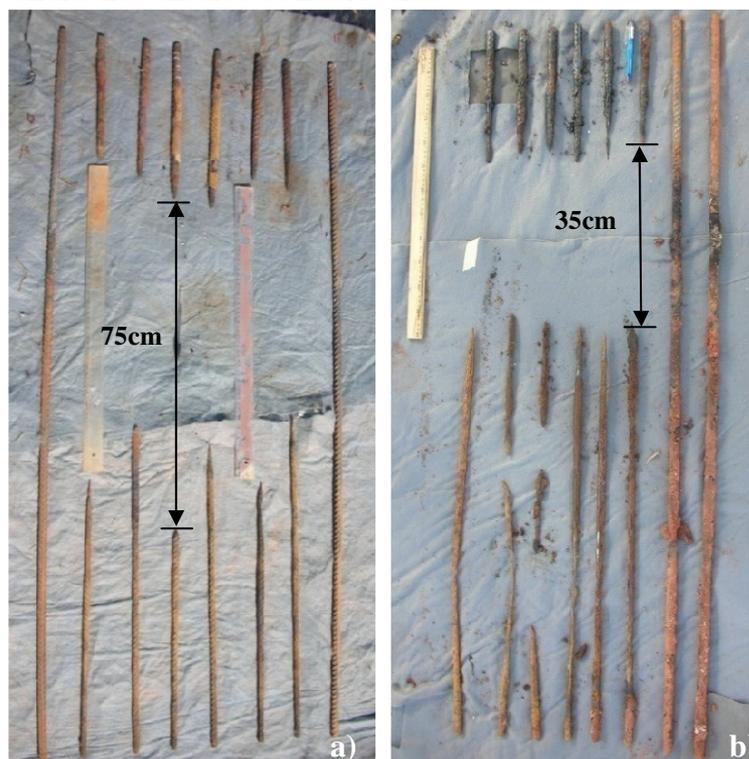
Percebe-se, também, que próximo às partes escuras, o geotêxtil do geodreno está rasgado. Entende-se que nesse ponto havia uma linha do fluxo elétrica constante, aumentando a temperatura do elemento condutor e, por isso, causou a queima do material geotêxtil. Pode ter tido o agravante, de quando o mesmo está na posição de cátodo, existe a liberação do oxigênio favorecendo a combustão no sistema quando esse dreno passa a ser ânodo, pois tem reação de redução. Salienta-se que esta queima do geotêxtil não foi identificada na situação inversa, talvez pelo fato da liberação do oxigênio ter ocorrido em menor intensidade devido os eletrodos já estarem em um estado avançado de corrosão. Um fato que fortalece a explicação anterior é que também não houve a queima do material nos drenos do ensaio com a polaridade no modo normal, já que não existiu a reversão das reações eletroquímicas.

Para uma melhor compreensão do discorrer deste item, mostra-se a localização dos eletrodos instalados no reservatório EO por meio da Figura 7.48.



**Figura 7.48** - Endereço dos eletrodos no reservatório EO – PLANTA BAIXA.

Os eletrodos 7 e 8 estão localizados nos drenos cátodos quando no modo normal de polaridade e o restante está nos drenos ânodos. A Figura 7.49 mostra o estado final de todos os eletrodos, tanto nos ensaios com eletro-osmose no modo normal (Figura 7.49a) quanto no modo reverso (Figura 7.49b), visando comparar o grau de corrosão em cada ensaio EO. Os eletrodos que não foram desintegrados, apresentando apenas início de corrosão, são os do centro da célula (eletrodos 7 e 8). A Figura 7.49b mostra os eletrodos na ordem crescente da esquerda para a direita nos ensaios de EO reversa.



**Figura 7.49** - Situação dos eletrodos no final dos ensaios EO (a) e EO reversa (b).

---

A inspeção visual mostra os danos causados pela corrosão, tendo o mesmo tipo de corrosão dos ensaios de laboratório: pite, por ter causado rápida perda de espessura do material metálico e ter fraturamento ao longo do eletrodo. Os mecanismos das reações até a formação da ferrugem de fórmula  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  (n de 1 a 3) foram apresentados no item 7.2.2.1 (corrosão eletroquímica em laboratório).

A figura mostra claramente que os eletrodos foram desintegrados mais intensamente nos ensaios da primeira fase, ou seja, existe um espaço maior ao longo dos eletrodos, causado pela corrosão, no ensaio que foi executado no modo normal de EO. O maior espaço com corrosão integral estava em torno de 75 cm, enquanto que no ensaio do modo reverso, o trecho foi de 35cm. Assim, quando a polaridade é invertida, os eletrodos tendem a ser mais interino ao longo de seu comprimento, apesar desses apresentarem menor espessura na parte inferior.

Pode-se ver que nos eletrodos 7 e 8 já tinha sido iniciado o processo de corrosão no mesmo trecho, não se desenvolvendo por causa do menor tempo como ânodo na reversão 3 X 2 e, também, por os eletrodos opostos já estarem em um estado avançado de corrosão, fazendo com que a corrente decrescesse rapidamente nesse tipo de polaridade. Em suma, a velocidade de corrosão é aumentada com a maior intensidade da corrente no meio.

Outra forte evidência de que a corrosão eletroquímica ocorre no sistema é que, quando da medida da poropressão, em que uma madeira de pequena espessura era colocada dentro do piezômetro, essa ficava com cor escura quando colocado no piezômetro próximo ao eletrodo ânodo e de cor natural quando próximo ao eletrodo cátodo, como mostrado na Figura 7.50. Portanto, a corrosão era tão dominante nos eletrodos do dreno ânodo que havia a reação no artefato de madeira para medida da poropressão.



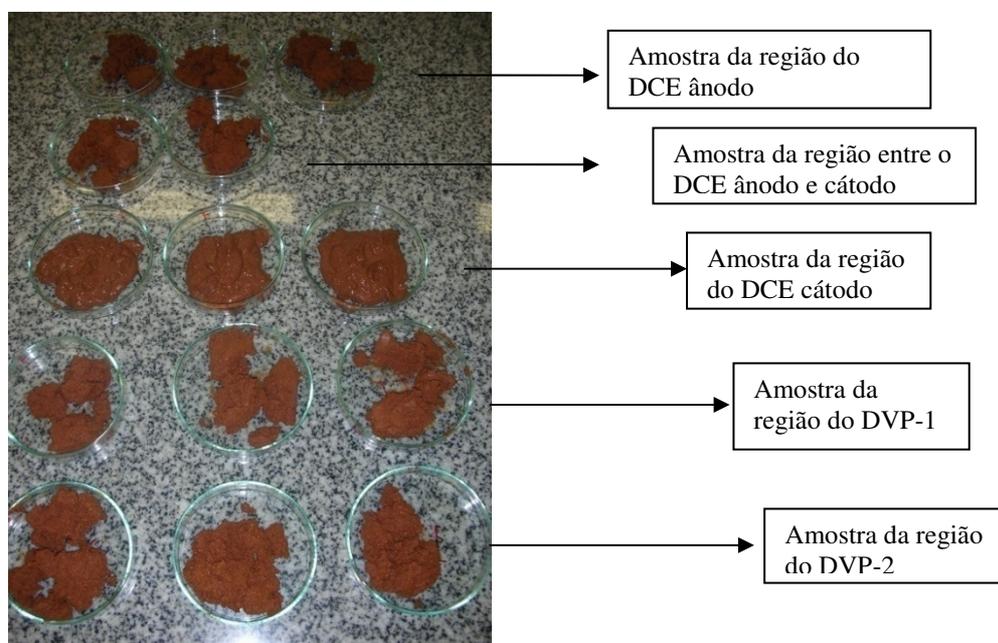
**Figura 7.50** - Pedaco do artefato de madeira para medir a poropressão.

---

#### 7.4.4.2. RESISTÊNCIA FINAL DO SOLO

Foram feitas com o ensaio de palheta as medidas da resistência não drenada do solo antes e após cada ensaio, para se conhecer o ganho de resistência que cada processo oferece.

Como visto na Tabela 7.29, o ensaio executado com eletro-osmose no modo reverso alcançou maior resistência próximo ao dreno ânodo, quando no formato normal, e uma resistência menor próximo ao dreno cátodo, na mesma situação. Após o término do ensaio de resistência ao cisalhamento retirou-se uma amostra do solo no ponto de medida, o que pôde ser constatado, mesmo visualmente, que a área com menor resistência está mais úmida, conforme mostrado na Figura 7.51.



**Figura 7.51** - Amostra de solo próximo aos DCE e DVP.

É visível que as amostras próximas aos DVP têm umidades similares e que, as amostras da região próximas ao DCE cátodo se destacam em termos de se apresentarem bem mais úmidas. Tanto que se encontrou água no momento da extração da amostra. No dreno oposto, a amostra foi coletada sem quantidade apreciável de água, pois a água estava, na maior parte do tempo, indo no sentido do dreno cátodo, quando no formato normal.

---

Com a aceleração da consolidação nos ensaios, houve uma melhoria da resistência ao cisalhamento no solo, tanto que no ensaio da primeira fase a umidade final foi de 29,7% e da segunda fase de 46,2%. A diferença entre as umidades já foi explicada em outras situações do corpo do texto, lembrando-se apenas que foram feitas as análises relativas aos ensaios padrões das respectivas fases. A Figura 7.52 mostra a consistência do solo depois do término dos ensaios com EO normal (7.52a) e EO reversa (7.52b).



**Figura 7.52** - Consistência do solo após os ensaios EO normal (a) e EO reversa (b).

**8 – CONCLUSÕES**

A eletro-osmose vem se difundindo de forma crescente em vários centros de pesquisa de todo o mundo, com diferentes finalidades e aplicações diversas. No Brasil é comum a sua utilização acoplada à técnica de biorremediação de solo, mas nos últimos tempos, foram desenvolvidos alguns trabalhos na área de consolidação de solo mole. Os fenômenos de transporte eletrocinéticos em solos com características das regiões temperadas foram bem estudados, sendo de fundamental importância também conhecer o desempenho da técnica em solos tropicais, por esses apresentarem um comportamento físico e químico diferenciados em consequência da intensa intemperização. Isso foi possível ao se avaliar a eficiência de um produto inovador - dreno condutor elétrico – na consolidação de solos tropicais com consistência mole da região do Distrito Federal.

Os ensaios foram realizados em três tipos de escalas diferentes: escala reduzida, intermediária e escala piloto em campo. O estudo apresentou considerações relevantes para implementações práticas da tecnologia e verificou as limitações do método que podem afetar a eficiência do processo de consolidação do solo, como corrosão de eletrodos e queda da intensidade de corrente.

Os parâmetros eletro-osmóticos (voltagem e corrente) foram avaliados em três situações de concentrações eletrolíticas: em solos com baixa concentração eletrolítica (0 g/L), com alta concentração eletrolítica (33 g/L) e com concentração eletrolítica intermediária (16,5 g/L). Ao se fazer a otimização das variáveis predominantes no sistema em ensaios de laboratório (pequena escala), a utilização do método mostrou-se ser pouco eficiente na consolidação do solo com baixa concentração eletrolítica, passando a ser um pouco mais eficiente em regiões com alta concentração, e atingindo maior eficiência em solos com concentração intermediária. Esta última concentração salina é comum em regiões de mangue e em algumas partes do nordeste brasileiro, onde predomina lençol freático com considerável teor de sal. Portanto, recomenda-se essa técnica para consolidação de solo, principalmente, nessas regiões do país ou em locais que tenham as características de mangue.

---

Esse resultado foi confirmado pela equação de eficiência da extração da água por eletro-osmose. A ordem de eficiência pode ser explicada por essa ter uma relação direta com a corrente elétrica existente no meio. Sabendo-se que quanto maior a concentração eletrolítica maior a corrente, tem-se a impressão que o resultado foi equivocado. No entanto, em meios com maior concentração de íons, existe um maior ataque nos eletrodos metálicos por corrosão eletroquímica, diminuindo sobremaneira a corrente no meio. Assim, a corrente manteve-se mais constante em regiões com concentração intermediárias, fazendo-se com que uma maior quantidade de água fosse extraída do meio, acelerando a consolidação de forma mais continuada.

Os resultados em laboratório também indicaram que, além de fatores externos como carga aplicada e diferença de potencial influenciarem na eficiência eletro-osmótica para consolidação do solo, outros fatores internos, que refletem nas propriedades químicas e físicas dos materiais, como concentração eletrolítica, CTC, tipo de cátion trocável, quantidade de matéria orgânica e mineralogia também influenciam direta e indiretamente na consolidação. A partir desse ponto, tem-se uma discordância com a afirmação empregada por muitos autores de que a condutividade eletro-osmótica independe do tamanho dos grãos, pois, foi observado que o sal influencia no processo de agregação do solo, assim, a agregação tende a aumentar o índice de vazios, aumentando a quantidade de água rica em íons contida nos vazios do solo por estar saturado, facilitando a passagem da corrente e conseqüentemente aumentando a condutividade eletro-osmótica.

O desempenho do dreno condutor elétrico utilizado nesta pesquisa foi comprometido parcialmente, pois foi utilizada a primeira versão dos geossintéticos condutores elétricos, onde é inserido um eletrodo dentro do geossintético específico. Com isso, foi comprovada a maior limitação dessa versão no processo: corrosão eletroquímica nos eletrodos metálicos. A eletrólise da água produziu condições ácidas no ânodo que contribuíram para a rápida corrosão dos eletrodos desse dreno. Em um relativo período curto de tempo, a corrosão reduziu o contato elétrico com o solo e a eficiência elétrica foi, então, reduzida.

Os resultados em laboratório comprovaram que o eletrodo de aço, por ter densidade mais alta, apresentou maior resistência à corrosão que o cobre, podendo ter em seu ensaio uma duração de 50% a mais que o ensaio com eletrodo de cobre. O eletrodo de aço também manteve a corrente uniforme por um maior período, inclusive apresentou maior intensidade durante todo

---

o ensaio. Como a corrente é a variável que rege o grau de adensamento e a resistência ao cisalhamento em ensaios EO, é evidente que os maiores recalques e as melhores resistências ocorreram quando o eletrodo de aço era usado. Em vista do exposto, o eletrodo de aço mostrou-se ser mais eficaz para a versão escolhida, por isso sua indicação para os ensaios de campo.

Fazendo-se a comparação entre os métodos eletro-osmóticos, modo normal e reverso, os resultados de laboratório levaram a inferir que os solos consolidados com eletro-osmose no modo normal apresentam maiores valores de coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica, e com isso, melhores desempenhos no recalque e resistência ao cisalhamento do solo, ficando em segundo lugar os ensaios com eletro-osmose reversa e por último os ensaios convencionais. A equação de eficiência EO também comprovou a ordem desses resultados.

Apesar dos eletrodos do ensaio executado no modo EO reversa terem apresentado um estado de corrosão um pouco menos evoluído, podendo dessa forma, prolongar o tempo do ensaio, percebeu-se que com a reversão dos pólos há uma queda brusca da corrente para seu valor mínimo, fazendo com que a corrente no modo normal de polaridade se mantenha mais uniforme e de maior intensidade. Isso justifica o motivo da maior eficiência no modo normal de eletro-osmose.

Também há discordância com alguns autores de que a eletro-osmose reversa iguala as propriedades do solo, obtendo resistência ao cisalhamento uniforme. Pelo menos com a primeira versão dos drenos condutores existiu o ataque corrosivo no dreno ânodo quando no modo normal de polaridade. Por consequência, quando a polaridade foi revertida, a corrente decresceu de forma vertiginosa, atingindo menores valores na maior parte do tempo, afetando o processo eletrocinético, já que, como apresentado, a corrente governa o sentido e a velocidade de transporte da água. Dessa forma, sempre irá existir um ganho de resistência maior próximo ao dreno ânodo, quando no modo inicial, pois a corrente terá maiores magnitudes e em maior período do ensaio. Portanto, a eletro-osmose reversa apenas irá prevenir uma excessiva secagem no ânodo e um pequeno decréscimo na corrosão dos eletrodos.

---

Além do tipo de eletrodo a ser utilizado e o modo da polaridade, os gráficos de desenvolvimento de corrente, recalque e resistência ao cisalhamento evidenciaram que a melhor voltagem para se utilizar no ensaio de campo foi em torno de 25V/m, pois gerou um aumento da resistência elétrica do solo fazendo com que a corrente se mantivesse praticamente constante durante uma boa parte do ensaio, induzindo de forma mais intensa a condução da água para o elemento drenante e desgastando menos os eletrodos, além de ter tido um menor custo com energia em relação aos outros ensaios.

Os ensaios em campo apresentaram resultados, em termos de eficácia dos métodos, similares aos de laboratório, pois da mesma forma, os solos consolidados com eletro-osmose no modo normal alcançaram recalques superiores, recalcou 111% a mais quando comparado ao método convencional, ficando em segundo lugar os ensaios com eletro-osmose reversa, que recalcou 68,5% a mais que o método convencional. Resultou nessa ordem porque a corrente no modo normal atingiu maiores magnitudes, na maior parte do tempo do ensaio, evidenciando, dessa forma, que a corrente tem realmente uma influencia direta no grau de consolidação do solo.

Observando os resultados dos ensaios de campo, é claramente perceptível que a corrente governa o sentido do fluxo da água. Pois quando a polaridade foi revertida houve um aumento de poropressão em um dos piezômetros e, simultaneamente, uma diminuição no outro. Foi constatado, tanto pelos resultados das análises química e eletro-osmóticas, quanto do monitoramento da poropressão e recalque e do estado desintegrado dos eletrodos que, a corrente induziu o fluxo de água, na maior parte do tempo, no sentido do ânodo para o cátodo.

Dentro dessa contextualização, o processo convencional necessitaria de aproximadamente 102 dias para conseguir acelerar a consolidação na mesma taxa que o método eletro-osmótico no modo normal conseguiu em 48 dias. Assim, a velocidade do tratamento com o método eletro-osmótico foi 112% mais rápido que o método convencional de consolidação.

No que tange ao comportamento dos solos tropicais frente ao método eletro-osmótico, por serem ambientes complexos formados por cargas superficiais variáveis, dependentes do pH do meio, provavelmente gera-se uma dupla camada de cargas mista, isto é, com cargas positivas e negativas. Portanto, conclui-se que poderá haver redução na eficiência do processo quando aplicados a solos tropicais, devendo haver aumento da corrente para se conseguir o mesmo efeito dos solos não intemperizados, o que poderá onerar o processo em pequena proporção.

---

Ficou evidente que a eletro-osmose tem grandes vantagens sobre o método convencional de consolidação. Assim, fazendo-se uma comparação do método EO no modo normal e reverso, em termos de custo benefício, ficou constatado que o ensaio com eletro-osmose reversa é benéfico por ter apresentado o mesmo ganho de resistência ao cisalhamento, consumindo 33% a menos de energia. Entretanto, como o objetivo principal é acelerar o processo de consolidação do solo, conclui-se que é grande o benefício de recalcar 42,5% a mais com o custo de energia 33% superior.

A análise de custo é fundamental para se avaliar com clareza as vantagens da eletro-osmose na consolidação de argila mole. Houve um consumo de energia, no ensaio de campo de eletro-osmose no modo normal, de 78,12 kWh/m<sup>3</sup> equivalente a 24,22 R\$/m<sup>3</sup>. Valores semelhantes foram encontrados em outras pesquisas. Desse modo, o valor encontrado não parece ser proibitivo, pelas vantagens proporcionadas pelo método. Isso dependerá muito da necessidade do executor da obra em relação ao tempo e custo.

Conclui-se, por fim, que o dreno condutor elétrico apresentado mostrou-se ser um material geossintético inovador para aplicação da consolidação de solos também nas regiões tropicais, tendo um efeito positivo, por ter conseguido acelerar com grande margem o processo de consolidação do solo, quando comparado ao método convencional.

---

## 8.1. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

1. Utilização de um dreno condutor elétrico (DCE) que elimine o problema de corrosão dos eletrodos no ensaio e, conseqüentemente, diminua a queda da corrente no meio.
2. Confirmar se existe uniformização da poropressão e resistência ao cisalhamento com outras versões de DCE quando aplicados a eletro-osmose reversa.
3. Usar outras configurações de locação dos drenos condutores visando diminuir a área não efetiva do processo eletro-osmótico.
4. Fazer ensaios eletro-osmóticos variando-se a concentração eletrolítica considerada intermediária, entre 5g/L e 20 g/L.
5. Utilizar uma instrumentação mais precisa na avaliação das medidas de poropressão e recalque.
6. Monitoramento das mudanças químicas que ocorrem no processo, como pH e concentração eletrolítica nas áreas próximas aos cátodos e ânodos.
7. Utilização da técnica eletro-osmótica no tratamento de esgoto e na secagem de lama de mineração.
8. Aplicação da técnica de eletro-osmose em uma obra de escala real para avaliação do DCE.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABGE- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (1998). Geologia de engenharia: Antonio Manoel dos Santos Oliveira, Sérgio Nertan Alves de Brito. – São Paulo, SP, 586 p.

ABNT (1984) Solo - Determinação do limite de liquidez - NBR 6459/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.

ABNT (1984) Solo - Determinação do limite de plasticidade - NBR 7180/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT (1984) Solo - Análise granulométrica - NBR 7181/84. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13 p.

ABRACO (2000). Associação Brasileira de Corrosão. ABNT/CB – 43. [www.abraco.org.br](http://www.abraco.org.br).

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2000). ASTM D4648-00, Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine –Grained Clayey Soil, Philadelphia.

Abiera H. O., Miura, N., Bergado D. T. (1998). Response of Ariake clay to electro-osmotic consolidation using electroconductive PVD. In Improvement of Soft Ground, Design, analyses and Current Researches. Asian Center for Soil Improvement and Geosynthetics (ACSIG), Asian Institute of Technology, Bangkok, pp. 59 - 73.

Acar, Y. B., Gale, R. J., Hamed, J., Putnam, G. A., and Wong, R. L. (1990). Electrochemical processing of soils: theory of pH gradient development by diffusion, migration, and linear convection. Environmental Science Health A25, Vol. 6, p. 687–714.

Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N, and Gale, R. J. (1993). “ Fundamentals of extracting species from soils by electrokinetics”. Waste Management, 13(2), pp 141-151.

Acar, Y.B., Hamed, J.T., Alshawabkeh, A.N. and Gale, R.J. (1994). Removal of cadmium(II) from saturated Kaolinite by the application of electrical current. Geotechnique 44, No. 2, 239 – 254.

Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N. (1996). Electrokinetic Remediation I: Pilot-Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite. Journal of Geotechnical Engineering. New York, ASCE, V. 122, n 03, pp: 173 – 185.

Alshawabkeh, A. N; Acar, Y. B. (1992), “Removal of Contaminants from Soils by Electrokinetics: A Theoretical Treatise”, Journal of EnvironmenHealth, A27(7), pp. 1835-1861.

Alshawabkeh, A.N., Acar, Y.B. (1996). Electro-Kinetic remediation I: theoretical model. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE 122 (3), 186-196.

Alshawabkeh, A.N., Yeung, A. T., Bricka, R.M. (1999). Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction. Journal of Environmental Engineering. New York, ASCE, V. 125, n 01, pp: 27 – 35.

---

Alshawabkeh, A.N., Bricka, R.M. (2000). “Basics and Applications of Electrokinetics Remediation”. *Remediation Engineering of Contaminated Soils*, pp.95 - 101.

Bárdossy, G e Aleva, G.J.J. (1990) Lateritic Bauxites. *Developments in Economic Geology*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, vol. 27, 624 p.

Bergado, D. T., Balasubramaniam, A. S., Patawaran, M. A. B. e Kwuenpreuk, W. (2000). Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok Clay with prefabricated vertical drains. *Ground Improvement*, 4, No. 4, 153–163.

Bergado, D.T., Balasubramaniam, A.S., Fannin, R.J., Holtz, R.D. (2002). Prefabricated vertical drains (PVDs) in soft Bangkok clay: a case study of the New Bangkok International Airport project. *Canadian Geotechnical Journal* 39, pp: 304–315.

Bjerrum, L., Moum, J., Eide, O. (1967). Application of electro-osmosis to a foundation problem in a norwegian quick Clay. *Géotechnique*, 17, nº 03, pp: 214 – 235.

Bo, M.W. (2004). Discharge capacity of prefabricated vertical drain and their field measurements. *Geotextiles and Geomembranes*, 22, pp: 37-48.

Boyer, J. (1971). *Propriedades dos solos e fertilidade; tradução de Célia Peixoto Motti e Pascal Motti*, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 196 p.

Botelho da Costa, J. V. (1973) *Caracterização e Constituição do Solo*. 3ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal, 515 p.

Bruell, C. J.; Segall, B. A.; Walsh, M. T. (1992), “Electroosmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and TCE from Clay”, *Journal of Environmental Engineering*, v.118, n. 1, pp. 68 - 83.

Camapum de Carvalho, J.; Crispel, J.J. e Queiroz de Carvalho, J.B. (1985) Influence de la temperature de sechage sur les proprietes chimiques, physiques et mecaniques de quelques sols lateritiques du Nord et du Nord-Est du Brésil. *First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic Soils*, Brasília, DF, 1:51-62.

Camapum de Carvalho, J.; Guimarães, R.C.; Cardoso, F.B.F. e Pereira, J.H.F. (1996) Proposta de uma nova terminologia para ensaios de sedimentação. *30ª Reunião Anual de Pavimentação*, Salvador, BA, 2:521-531.

Cardoso, F.B.F. (1995) *Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142 p.

Cardoso, F.B.F.; Martins, E.S. e Camapum de Carvalho, J. (1995) Micromorphological evolution of collapse in deeply weathered tropical soils. *10<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Guadalajara, México, 1:57-65.

---

Cardoso, F.B.F.; Camapum de Carvalho, J. e Martins, E.S. (1998 *a*) L'effondrement des sols tropicaux: aspect génétique. 16<sup>e</sup> Congrès Mondial de Science du Sol, Montpellier, France, 1 CDROM, 6 p.

Cardoso, F.B.F.; Camapum de Carvalho, J. e Martins, E.S. (1998 *b*) O fenômeno do colapso em solos de diferentes origens e profundamente intemperizados do Distrito Federal. 11<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasília, DF, 1:59-66.

Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-009A/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 357 p.

Carvalho, I.G. (1995) Fundamentos da Geoquímica dos Processos Exógenos. Bureau Gráfica e Editora Ltda., Salvador, BA, 239 p.

Castro, F. J. C. O. (1989), "Eletroquímica e Propriedades Mecânicas dos Solos", II Colóquio de Solos Tropicais e Subtropicais e suas Aplicações em Engenharia Civil, 29 e 30 nov. e 1<sup>o</sup> dez, Porto Alegre.

Catani, R.A, Romano Gallo, J., Gargantini, H. (1955). Amostragem de solo, métodos de análise, interpretação e indicações gerais para fins de fertilidade. Boletim n<sup>o</sup> 69, Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, SP, 28 p.

Chappell, B. A. e Burton, P. L. (1975). Electro-osmosis applied to unstable embankment. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101, No. 8, 733-740.

CEB. ([HTTP://www.ceb.com.br/CebNovo/Ceb/Ceb/area.cfm?id\\_area=57enivel=2](http://www.ceb.com.br/CebNovo/Ceb/Ceb/area.cfm?id_area=57enivel=2)). Acessado em 10/07/2009)

Chew, S. H., Karunaratne, G. P., Kuma, V. M., Lim, L. H., Toh, M. L. e Hee A. M. (2004). A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains. Geotextiles and Geomembranes, 22, No. 1-2, 17-35.

Chu, J., Bo, M.W., Choa, V. (2004). Practical considerations for using vertical drains in soil improvement projects. Geotextiles and Geomembranes, 22, pp: 101 - 117.

Costa, M.L. (1993) Propostas para sistematização do estudo de lateritos. 4<sup>o</sup> Cong. Bras. Geol., Brasília, DF, volume de resumos expandidos, 195-197.

Damasceno, V. M. (2003). Condutividade eletro-osmótica e descontaminação de um solo de comportamento laterítico de Minas Gerais via fenômenos eletrocínéticos. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

De Brito Galvão, T.C. (1993) Mineralogical and Geotechnical Properties of Latossol from Minas Gerais, Brazil. PhD Thesis, Purdue University, West Lafayette, USA, 192p.

Delgado, A. K. C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para Uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de Doutorado,

---

G.TD-045/07. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 392p.

Deotti, L. O. G. (2005). Controle de pH na Técnica de Biorremediação Eletrocínética. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 135p.

Dias, R.D. (1994) Pedogenesis and its relationship to lateritic compressibility and collapsibility. 13<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Delhi, Inde, 4:1489-1492.

Dias, R.D. e Gehling, W.Y.Y. (1986) Geotechnical aspects of undeformed lateritic soils in south Brazil. 5<sup>th</sup> International Congress IAEG, Buenos Aires, Argentina, 2:793-797.

Dinoy A., JR. (1999) Electro-osmotic Consolidation of Reconstituted Soft Bangkok Clay with Prefabricated Vertical Drains. AIT thesis No. GE 98-5, Asian Institute of Technology, Bangkok.

Dutra, A. C. (1987). Proteção catódica: técnica de combate à corrosão. JR Ed. Técnica, Rio de Janeiro – RJ, 208 p.

Eiten, G. (1993) Vegetação. Cerrado: Caracterização, Ocupação e Perspectiva, Novaes Pinto, M. (ed.), 2<sup>a</sup> edição, Ed. UnB, Brasília, DF, pp. 17-74.

EMBRAPA (1978) Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal. Boletim Técnico, n° 53, SNLCS, Rio de Janeiro, RJ, 455 p.

EMBRAPA (1999) Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. EMBRAPA - Solos (Rio de Janeiro), Brasília, DF, 412 p.

Esrig, M.I. (1968). Pore pressure, consolidation and electrokinetics. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 94 (SM4), 899 – 922.

Eswaran, H.; Guthrie, R. e Holzhey, S (1983) The place of laterites in soil taxonomy. Lateritisation Processes. II International Seminar on Lateritisation Processes, Melfi, A.J. e Carvalho, A. (eds.), Universidade de São Paulo, SP, pp. 491-498.

Eykholt, G. R., and Daniel, D. E. (1994). Impact of System Chemistry on electroosmosis in contaminated soil. J. Geotech. Engrg., ASCE, 120(5), 797-815.

Faez, R., Reis, C., Freitas, P.S., Kosima, O.K., Ruggeri, G., Paoli, M.A. (2000). Polímeros Condutores. Química Nova na Escola. N° 11, pp: 13 -18.

Farias, W.M.; Boaventura, G.R.; Cardoso, F.B.F.; Martins, E.S. e Guimarães, E.M. (1999a) Caracterização química e mineralógica do solo do aterro sanitário do Jockey Club (DF) e a influência da matéria orgânica e pH no comportamento dos elementos. 4<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, Ouro Preto, MG, 392-398.

Feitoza, J. (2007). Consolidação de Solos Moles com o Uso de Célula Eletro-Osmótica. Dissertação de Mestrado, Publicação G. DM-163/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108p.

---

Finno, R. J.; Chung, K.; Yin, J.; Feldkamp, J. R. (1996). Coefficient of Permeability from AC Electroosmosis Experiments. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 122. N° 05.

Fiori A. P., Carmignani L. (2001). *Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes*. Editora UFPR, Curitiba, PR, 550p.

Fonini, A. (2008). *Uso da técnica eletrocinética para estabilização de um solos arenoso*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 127p.

Formoso, M. L. L., Cerri, C. C. (1999). *Workshop on Tropical soils*. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, RJ, 192 p.

Galvão, E. Z. (2004). Micronutrientes. In: Souza, D.M.G.;Lobato, E. (Ed) *Cerrado: Correção do Solo e Adubação*. Brasília, EMBRAPA Informação e Tecnologia, 207 – 2008.

Gangaiya, P., Morrison, R. J. (1987). A Review of the Problems Associated with Applying the Terms Surface Charge and Zer Point of Change to Soils. *Commun. In Soil Sci. Plant Anal.*, New York, V. 18, n.12, pp 1431 – 1451.

Gentil, V. (1982). *Corrosão*. Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro – RJ, 453p.

Gidigas, M.D. (1976) *Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles*. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, Netherlands, 570 p.

Glendinning, S., Jones, C.J.F.P., Huntley, D.T., Lamont-Black, J. (2006). Dewatering of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics. 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Yokohama, pp:527 – 530.

Glendinning, S., Lamont-Black, J. (2006). *Treatment of Sewage Sludge Using Electrokinetic Geosynthetics*. 5th ICEG Environmental Geotechnics, Thomas Telford, London, 870 - 877.

Gray, D.H. e Mitchell, J.K. (1967). Fundamental aspects of electro osmosis in soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE 93 (SM 3)*, 875 – 879.

Grim, R.E. (1953) *Clay Mineralogy*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 384 p.

Guaracho, V.V. (2005). *Remediação eletrocinética de chumbo e níquel em solos de Landfarming de refinaria*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 135p.

Guilherme, L.R.G., Curi, N., Guedes, G.A.A (1989). Calagem e Disponibilidade de Fosforo para o Arroz Irrigado Cultivado em Casa de Vegetação. *Revista Brasileira de Comp. do Solo*, V. 13, n 03, Campinas, SP, PP. 341-347.

Guori, G. (1986) The microstructure feature of cohesive residual soil. 5<sup>th</sup> International Congress IAEG, Buenos Aires, Argentina, 3:803-810.

---

Hall, J., Glendinning, S., Lamont-Black, J., Jones, C. (2008). Dewatering of Waste Slurries Using Electrokinetic Geosynthetic (EKG) Filter Bags. Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference - *EuroGeo4*, Paper number 32, 8p.

Hamed, J. Acar, Y.B., Gale, R.J. (1991). Pb (II) Removal from kaolinite by electrokinetics. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1991. Vol. 117, N° 2, p. 241-271.

Hansbo, S., Jamiolkowski, M. e Kok, L. (1981). Consolidation by vertical drains. *Ge´otechnique*, 31, No. 1, 45–66.

Harbottle, M. J. (2003). The Use of Electrokinetics to Enhance the Degradation of Organic Contaminants in Soils. St Hugh´s College. University of Oxford, UK. 255 p.

Heibaum, M., Fourie, A., Girard, H., Karunaratne, G.P., Lafleur, J., Palmeira, E.M. (2006). Hydraulic Applications of Geosynthetics. 8th Int. Con. On Geosynthetics – ICG. J. Kuwanao e J. Koseki, (Eds), Millpress, Rotterdam, pp:79 - 120.

Hendershot, W.H. e Lavkulich, L.M. (1978). The Use of ZPC to Assess Pedogenic Development. *Soil Sei. Soe. Am. J.*, Madison, 42, pp.468-472.

Huntley, D., Lamont-Black, J., Glendinning, S., and Jones, C.J.F.P., 2006, Economic models for the use of electrokinetic geosynthetics, 8<sup>th</sup> Int. Con. on Geosynthetics, J. Kuwanao e J. Koseki, (eds), pp: 543-546.

IAGE (1979). Commision “Engineering Geological Mapping” Classification of Rocks and Soils for Engineering Geology Mapping. Part 1: Rock and Soil Materials. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. Krefeld, V. 19, p.364-371.

IBGE (1993) Mapa de Unidades de Relevamento do Brasil, Escala 1: 5.000.000. SEC/SEDG, Rio de Janeiro, RJ, não paginado.

Indraratna, B., Balasubramaniam, A. S. e Ratnayake, P. (1994). Performance of embankment stabilized with vertical drains on soft clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120, No. 2, 257–273.

Iniguez, J., Val R. M. (1982). Variable Charge Characteristic of Andosols from Navarre, Spain. *Soil Science*, Baltimore, V. 133, n. 06, pp 390 – 396.

Jones, C.J.F.P., Pugh R.C. (2001). A full-scale field of electrokinetically enhanced cohesive reinforced soil using electrically conductive geosynthetics. *Landmarks in Earth Reinforcement*, Nice, França, n: 219-223.

Jones, C.J.F.P., Glendinning, S., and Shim, G.S.C. (2002). “Soil consolidation using electrically conductive geosynthetics.” *Geosynthetics – 7th ICG*. Pp: 1039 – 1042.

Jones, C.J.F.P. e Glendinning, S., Huntley, D.T., Lamont-Black, J. (2006). Case history – *In-situ* dewatering of lagooned sewage sludge using electrokinetic geosynthetics (EKG). 8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Yokohama, pp:539 – 542.

---

Jones, C.J.F.P., Lamont-Black, J., Glendinning, S., Bergado, D., Toby, E., Fourie, A., Liming, H., Pugh, C., Romantshuk, M., Simpanen, S., Yan-feng, Z. (2008). Recent Research and Applications in the Use of Electro-Kinetic Geosynthetics. Proceedings of the 4th European Geosynthetics Conference - *EuroGeo4 - Keynote Paper*, 30p.

Karunaratne, G.P., Chew, S.H., Toh, M.L., Poh, W.G., Hee, A.M. (2002). "Electroosmotic consolidation of soft clay based on laboratory and field trials." *Geosynthetics - 7th ICG*. Pp 1043 – 1046.

Karunaratne, G.P., Jong, H.K., Chew, S. H. (2004). New Electrically Conductive Geosynthetics for Soft Clay Consolidation. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Asian Regional Conference on Geosynthetics – *GeoAsia2004*, pp:277 – 284.

Keng, J.C.W., Uehara, G. (1974). Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. *Proc. Soil Crop Sci. Soc.*, 33: 119-126.

Kiehl, E.J. (1979) *Manual de Edafologia: Relações Solo-Planta*. Ed. Agronômica Ceres, São Paulo, SP, 264 p.

Kim, Soo-Sam, Lee, Kwang-Yeol, Han, Sang-Jae, and Koh, Kyung-Hwan. (1997). "The Study of the Electro Osmotic Consolidation of Marine Clayey Soil." *Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference*.

Kronberg, B.I.; Fyfe, W.S., Leonardos, O.H. e Santos, A.M. (1979) The chemistry of some Brazilian soils: element mobility during intense weathering. *Chem. Geol.*, 24:211-229.

Kulathilaka S. A. S, Sagarika D. K. N. S. e Perera H. A. C. (2004). The parameters affecting electro osmotic consolidation of Peaty clays, *Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*.

Lamont-Black, J. (2001). EKG: the next generation of geosynthetics. *Ground Engineering*, pp: 22 – 23.

Lamont-Black, J., Huntley, D. T., Glendinning, S. e Jones, C. J. F. P, (2006a). Case history: the use of electrokinetic geosynthetics (EKG) in belt press dewatering. *8<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics, Yokohama*, pp:535 – 538.

Lamont-Black, J., Huntley, D., Glendinning, S., e Jones, C.J.F.P. (2006b), The use of Electrokinetic geosynthetics (EKG) in enhanced performance of sports turf, *8<sup>th</sup> Int. Con. on Geosynthetics, Kuwanao e Koseki*, (eds), 453-456.

Lo, K.Y.; Ho, K.S. and Incullet, I.I. (1991a). Field test of electro-osmotic strengthening of soft sensitive clay. *Canadian Geotechnical. Journal*. 28, 74 – 83.

Lo, K.Y.; Ho, Incullet, I.I., and Ho, K.S. (1991b). Electro-osmotic strengthening of soft sensitive clay. *Canadian Geotechnical. Journal*. 28, 62 – 73.

Lorenzo, G. A., Bergado, D.T., Bunthai, W., Hormdee, D., Phothiraksanon, P. (2004). Innovations and performances of PVD and dual function geosynthetics applications. *Geotextiles and Geomembranes* 22, pp: 75 – 99.

---

Magalhães, A. F., Page, A. L. (1984). Características das Cargas Elétricas dos Solos da Zona da Mata de Pernambuco: I. Determinação das Cargas de Superfície. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Campinas, V. 8, pp 173 – 177.

Magnan, J. P. (1994). Methods to Reduce Settlements. *Conf. On Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, ASCE, Geot. Esp. Publ. 40, v. 1, p. 77-91.

Martins, E.S. (2000) Petrografia, Mineralogia e Geomorfologia de Rególitos Lateríticos do Distrito Federal. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 196 p.

McLoughlin P. W. (2005). Belt filter press-fact or fiction? 10<sup>th</sup> European Biosolids and Biowaste Conference, Wakefield UK, paper 45, Aqua Enviro.

Melfi, A.J. e Pedro, G. (1977) Estudo geoquímico dos solos e formações do Brasil, Parte. 1 - Caracterização e repartição dos principais tipos de evolução pedogeoquímica. *Rev. Bras. Geoc.*, 7(4):271-286.

Melfi, A.J. e Pedro, G. (1978) Estudo geoquímico dos solos e formações do Brasil, Parte. 2 - Considerações sobre os mecanismos geoquímicos envolvidos na alteração superficial e sua repartição no Brasil. *Rev. Bras. Geoc.*, 8(1):11-22.

Mergulhão, A.J.P., (2002). Injeção de nitrato de amônio em solo residual por eletrocinese e seu efeito sobre a sobrevivência da microbiota nativa. Dissertação M.Sc., Puc-Rio, Rio de Janeiro,RJ.

Milligan, V. (1994). First application of electro-osmosis to improve friction capacity: three decades later. *Proceedings of the 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, New Delhi, India, Vol. 5, pp. 1–5.

Mitchell, J. K. (1976). *Fundamentals of soil behavior*. Series in Soil Engineering. USA, pp. 340-415.

Mitchell, J. K. (1991). Conduction phenomena: from theory to Geotechnical practice. *Geotechnique* 41: 299-340.

Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. 2 ed. New York, Jonh Wiley e Sons, inc.

Mohamedelhassan E. e Shang J. Q. (2001). Effects of electrode materials and current intermittence in electro-osmosis. *Ground Improvement*, 5, pp: 3 - 11.

Mohamedelhassan E. e Shang J. Q. (2002). Feasibility assessment of electro-osmotic consolidation on marine sediment. *Ground Improvement* 6, Nº 4, pp: 145 - 152.

Mohamedelhassan E. e Shang J. Q. (2003). Electrokinetic generated pore fluid and ionic transport in an offshore calcareous soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, pp: 1185-1199.

---

Morais, F. I., Page, A. L., Lund, L. J. (1976). The Effect of pH, Salt Concentration and Nature of Electrolytes on the Charge Characteristics of Brazilian Tropical Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, V. 40, pp 521 – 527.

Nascimento, A.J.P., Murrieta, P.S.N. (2008). Consolidação com Drenos Condutores Elétricos em Solos com Diferentes Concentrações Eletrolíticas. COBRAMSEG, Búzios, Rio de Janeiro, pp. 959-963.

Nascimento, A.J.P. (2005). Aceleração da Consolidação de Solos Argilosos com o Uso de Eletro-Osmose. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-131/2005, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF 117 p.

Nascimento, A.J.P., Murrieta, P.S.N. (2005). Comportamento da Eletro-Osmose em Solos Tropicais. II Simpósio de Solos Tropicais e Processos Erosivos do Centro Oeste, Goiânia, GO, pp. 151-160.

Nettleton I.M., Jones C.J.F.P., Clarke B. G. and Hamir R. (1998). Electrokinetic geosynthetics and their applications. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Geosynthetics*, Atlanta, 2, 871 -876.

Newill, D. (1961) A laboratory investigation of two red clays from Kenya. *Géotechnique*, 11:302-318.

Pardo, M. T., Guadalix, M. E. (1988). Surface Charge Characteristics of Volcanic-ash Soils from Spain. Effect of Organic Matter and Mineralogical Composition. *Commun. In Soil Sci. Plant Anal.*, New York, V. 19, n. 03, pp 259-269.

Pastore, E.L. (1995) Weathering profiles. 10<sup>th</sup> Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Guadalajara, México, 1:353-364.

Paul, M.A. e Barras, B.F. (1999) Role of organic material in the plasticity of Bothkennar clay. *Géotechnique*, 49(4):529-535.

Pedrazzoli, C. D. (2004). Remediação eletrocinética de chumbo em resíduos industriais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia e Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 128p.

Penn, M. L. M. (1997), *Electrokinetics Soil Remediation: Effects of pH, Temperature and Chemical Reactions*. Tese de PhD, University of Cambridge.

Portillo Miranda, G.A. (2008). Transporte eletrocinético de cromo em sedimentos da Baía de Guanabara. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC/Rio, Rio de Janeiro, RJ, 103p.

Queiroz de Carvalho, J.B. (1985) Study of the plasticity of lateritic soils: methodology and effect of drying on liquid and plastic limits. *First International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic Soils*, Brasília, DF, 1:63-66.

Queiroz de Carvalho, J.B. (1986) Efeito do teor de ferro na plasticidade de solos lateríticos. 21<sup>a</sup> Reunião Anual de Pavimentação, Salvador, 1:265-275.

- 
- Raij, B. Van. (1971). Electrochemical properties of some Brazilian Soils. Ph.D. Thesis. Cornell University, Ithaca, New York, 232p.
- Raij, B. V.; Peech, M (1972). Electrochemical properties of some Oxisols and Alfisols of the tropics. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 36, p. 587- 593.
- Raij, B. Van. (1973). Determinação do Ponto de Carga Zero em Solos. *Bragantia*, Campinas, 32(18), pp 337-347.
- Rittirong A, Douglas R. S., Shang, J. Q., Lee, E. C. (2008). Electrokinetic improvement of soft clay using electrical vertical drains. *Geosynthetics International*, V. 15, No. 5, 369 – 381.
- Rodrigues, T.E. (1977) Mineralogia e Gênese de uma Sequência de Solos do Cerrado do Distrito Federal, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 101 p.
- Russell, E.W. (1961) Soil Conditions and Plant Growth. 9<sup>th</sup> ed., Longmans, Green and Company, London, England, 688 p.
- Salomão, F.X.T. e Antunes, F.S. (1998) Solos. *Geologia de Engenharia*. Oliveira, A.M.S. e Brito, S.N.A. (eds.), ABGE, São Paulo, SP, pp. 87-99.
- Sakurai, K.; Ohdate, Y. e Kyuma, K. (1989). Factors Affecting Zero Point of Charge (ZPC) of Variable Charge Soils. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, 35(1), pp 21-31.
- Sandroni, S.S. (1985) Sampling and testing of residual soils in Brazil. *Sampling and Testing of Residual Soils*. Brand, E.W. e Philipson, H.B. (eds.), Scorpion Press, Hong Kong, pp. 31-50.
- Santos, P. S. (1975). *Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras*. São Paulo, Edgard Blucher. Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 345p.
- Schellmann, W (1982): Some remarks on the dating of laterites.- *Newsletter I.G.C.P. Project 129: Lateritisation Processes*, (4):40-42.
- Schmidt, C.A.B. (2004). *Aplicação de Técnica Biorremediação Eletrocinética a Solos Orgânicos Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 336p.
- Schwertmann, U. e Taylor, R.M. (1989) Iron Oxides. *Minerals in Soils Environments*. Dixon, J.B. e Weed, S.B. (eds.), Soil Scie.Soc. Am, Madisom, USA, pp. 379-438.
- Shang, J. Q., Lo, K.Y., Inculet, I.I. (1995). Polarisation and conduction of clay water-electrolyte systems. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 121 (3), 243–248.
- Shapiro, A. P., Renaud, P. C., and Probst, R. F. (1989). Preliminary studies on the removal of chemical species from saturated porous media by electroosmosis. *PCH PhysicoChemical Hydrodyn*, Vol.11, N° 5 e 6, p. 785–802.

---

Silva, P. F. (1981). Introdução à corrosão e proteção das superfícies metálicas. Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte-MG, 357 p.

Siqueira, C., Leal, J. R., Velloso, A. C. X., Santos, G. A. (1990). Eletroquímica de Solos Tropicais de Carga Variável: II. Quantificação do Efeito da Matéria Orgânica sobre o Ponto de Carga Zero. Revista Brasileira Ci. Solo, V 14, Campinas, SP, PP. 13-17.

Sítio Duas Cachoeiras: educação e agricultura desde 1985. O Conhecimento do Solo. Disponível em: <http://www.sitioduascachoeiras.com.br/agricultura/minerais/solo>. Acesso em: 10 de outubro de 2009.

Skempton, A. W. (1953). The Colloidal Activity of Clays. Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Soil Mec. Found. Eng., Zurich.

Souza, M. V. (2002). Transporte Eletrocinético de Gasolina e Óleo Através de um Solo Residual Gnáissico e Borra de Petróleo da Bacia de Campos. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 137pp.

Souza, U. E. L., Gnecco, C., Figueiredo, A. D., (1988). Proteção contra a corrosão. Publicação Técnica PT 07, Núcleo de Tecnologia da Construção Metálica, São Paulo, 249 p.

Sposito, G. (1989). The Chemistry of Soils, Oxford University Press, New York. 277p.

Sposito, G. (1981). The operational definition of the zero point of charge in soils. Soil Sci Soc. Am. J., 45: 292-297.

Stern, O., 1924, “Zur Theorie der Elektrolytischen Doppelschicht”, Zeitschrift Electrochem, vol. 30, pp. 508 – 516.

Su, J.Q., Wang, Z., Ge, R.H., Wang, H.Y. (2004). A Test about the Application of Electrokinetic Geosynthetics on Consolidation Drains. Proceeding of the 3<sup>rd</sup> Asian Regional Conference on Geosynthetics – GeoAsia2004, pp:762 – 770.

Tardy, Y. (1993) Pétrologie des Latérites et des Sols Tropicaux. Masson, Paris, France, 459 p.

Terashi, M. e Katagiri, M. (2005). Key issues in the application of vertical drains to a sea reclamation by extremely soft clay slurry. In Ground Improvement: Case Histories, Indraratna, B. e Chu, J. (eds), Elsevier, Oxford, UK, pp. 119–143.

Van Schuylenborgh, J. e Sanger, M.H. (1949) The electrokinetic behavior of iron and aluminiumhydroxides and oxides. Rec. Trav. Chim. PayBas, 68: 999-1010.

Vargas, M. (1953) Some engineering properties of residual clay soils occurring in Southern Brazil. 3<sup>rd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Zurich, Swiss, 1:67-71.

Vargas, M.(1982) O uso dos limites de Atterberg na classificação dos solos tropicais. 7<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Olinda/Recife, PE, 5:262-278.

---

Velten, R. Z. (2008). Condutividade eletro-osmótica e remediação de solos contaminados com cádmio. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

Vieira, L. S. (1988). Manual da Ciência do Solo com Ênfase aos Solos Tropicais. Editora Agronômica Ceres Ltda, 2ª edição, São Paulo, 464p.

Wade, M. H. (1976). Slope stability by electro-osmosis. In Proceedings of the 29th Canadian Geotechnical Conference, Vancouver, Canada, section 10, pp. 44–66.

Wallace, K.B. (1973) Structural behaviour of residual soils of the continually wet Highlands of Papua New Guinea. *Géotechnique*, 23(2):203-218.

Wan, T.Y. and Mitchell, J.K. (1976). Electro-Osmotic Consolidation of Soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(GT5), 473 – 491.

White, C., Glendinning, S., Lamont-Black, J., Jones, C., Taylors, T. (2008). The Application of Electrokinetic Geosynthetics in the Advanced Conditioning and Composting Processing of Sewage Sludge. EuroGeo4 Paper number 322, 6pp.

Whitlow, R. (1995), *Basic Soil Mechanics*, 3rd ed., Addison Wesley Longman Limited.

Yong, R.N.; Mohamed, A.J.M.O. e Wang, B.W. (1992) Influence of amorphous silica and iron hydroxide on interparticle action and soil surface properties. *Can. Geotech. J.*, 29:803-818.

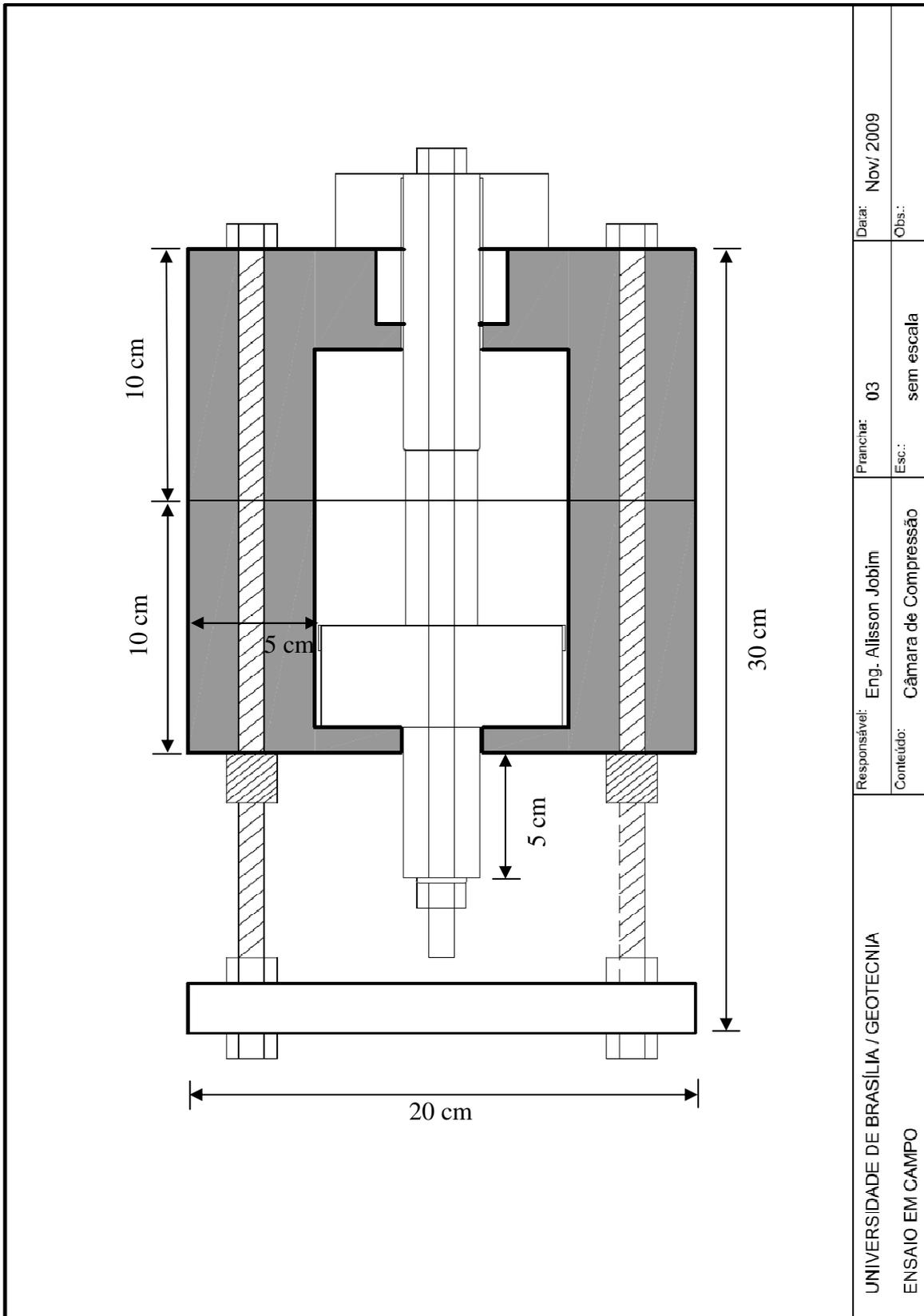
Yong, R.N.; Sethi, A.J e Suzuki, A. (1980) Contribution of amorphous material to properties of a laboratory-prepared soil. *Can. Geotech. J.*, 17:440-446.

Zornberg, J.G., Christopher, B.R. (1999). *Geosynthetics. The Handbook of Groundwater Engineering*, Jacques W. Delleur (ed), CRC Press, Indiana, (27-1) – (27-31).

Zongyuan, L. (1986) On the engineering classification of laterite. 5<sup>th</sup> Congress IAEG, Buenos Aires, Argentina, 3:811-819.

Zorzo, M. (1993). Efeito da Aplicação de calcário e Gesso nas Propriedades Eletroquímicas em Solos do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Departamento de Química, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 167p.

# ANEXO 1 - CÂMARA DE COMPRESSÃO

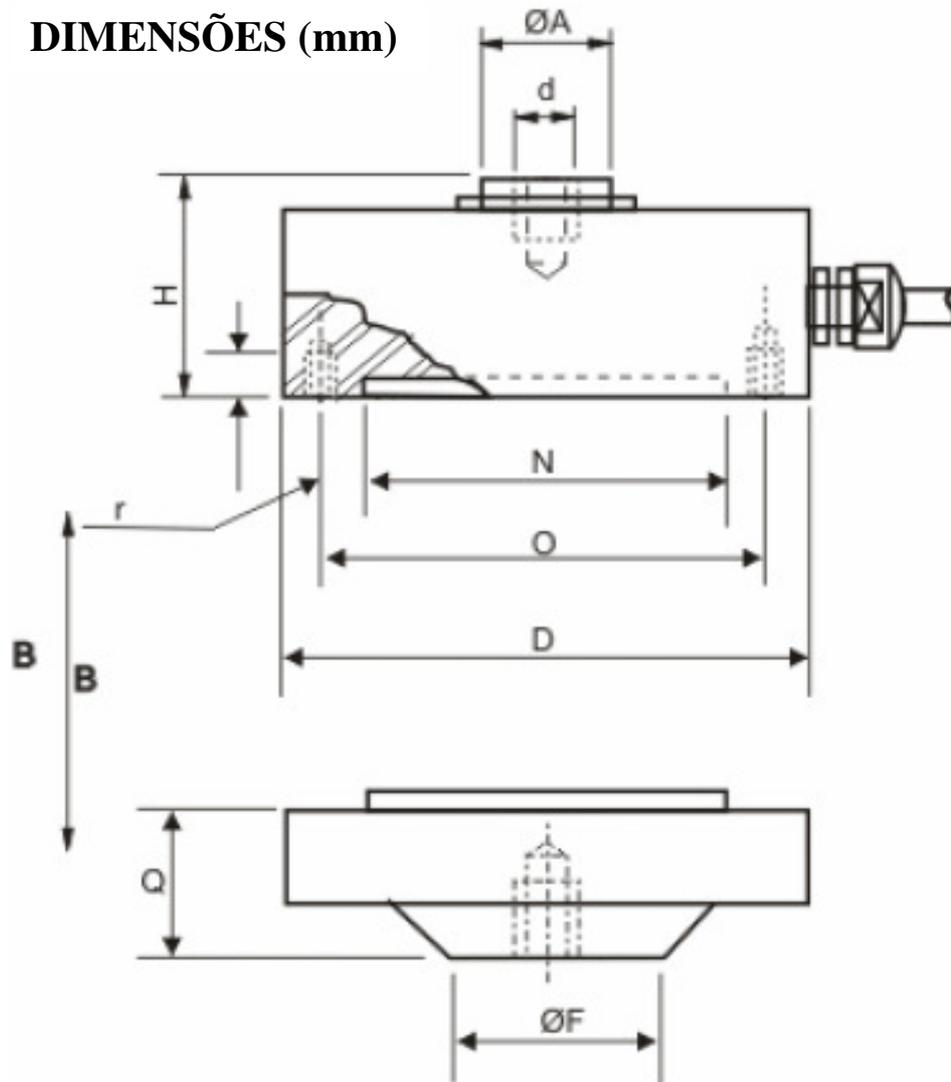


UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA / GEOTECNIA ENSAIO EM CAMPO	Responsável: Eng. Allisson Jobim	Prancha: 03	Data: Nov/ 2009
	Conteúdo: Câmara de Compressão	Esc.: sem escala	Obs.:

---

**ANEXO 2 – CÉLULA DE CARGA DE COMPRESSÃO TF200**

---

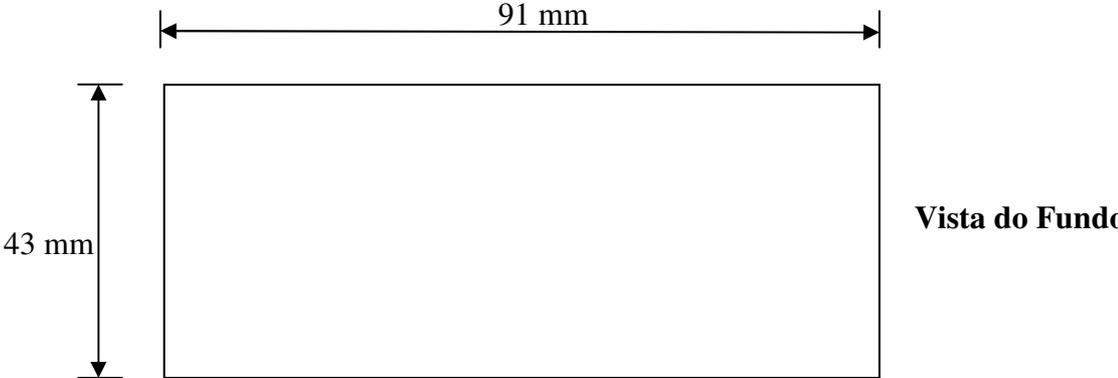
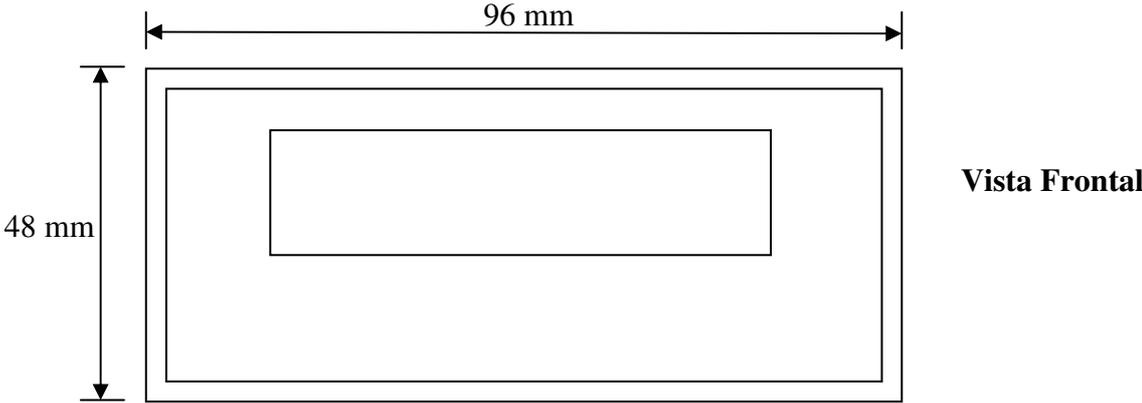
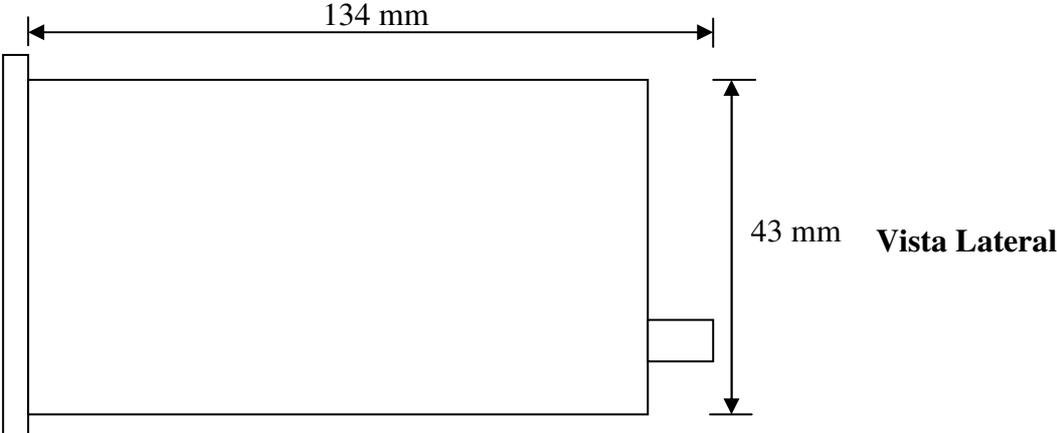


EN (kgf)	$\phi A$	B	$\phi D$	$\phi F$	H	N	O	Q	d	r
1000	12	9	61	20	28	44	52	18	M8	M5(4x)

---

**ANEXO 3 - INDICADOR DIGITAL MODELO IT 100**

---



## ANEXO 4 – INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DE ANÁLISE DE MICRONUTRIENTES EM SOLOS DO CERRADO (GALRÃO, 2004)

Tabela 1. Quanto ao valor do pH em Água ( 1.0:2.5 vol./vol. ).						
<i>Critérose</i>	Fortemente	Mediamente	Fracamente	Neutro	Fracamente	Fortemente
<i>Classes</i>	Ácido	Ácido	Ácido		Alcalino	Alcalino
<i>Teores</i>	< 5,0	5,0 a 5,5	5,6 a 6,9	7	7,1 a 7,8	> 7,8

Tabela 2. Quanto aos teores de Cálcio ( Ca ) e Magnésio ( Mg ) trocáveis, em KCl 1 N.						
Teor de Argila	Teor de Ca, extraído com KCl 1N			Teor de Mg, extraído com KCl 1N		
	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = meq/100ml			cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = meq/100ml		
<i>Critérios para</i>	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
<i>150-350 g/kg</i>	< 1,0	1,0 a 2,5	> 2,5	< 0,2	0,2 a 0,6	> 0,6

Tabela 3. Quanto aos teores de Potássio ( K ) e Sódio ( Na ) trocáveis, com Mehlich I.						
<i>Critérios</i>	K em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = meq/100ml			Na em cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = meq/100ml		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
<i>Teores</i>	< 0,06	0,06 a 0,13	> 0,13	< 0,15	0,15 - 0,57	> 0,57

Tabela 4. Quanto ao teor de Fósforo ( P ), extraído com Mehlich I. Sistema Sequeiro					
<i>Critério Utilizado</i>	Resultados de P, em mg/dm <sup>3</sup> = ppm				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Adequado	Alto
<i>Argila = 150 - 350 g/kg</i>	0 a 5,0	5,1 a 10	10,1 a 15	15,1 a 20	> 20

Tabela 5. Quanto aos teores da Acidez Total ( H + Al ) e de Alumínio ( Al ) trocável.					
cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = meq/100ml					
Acidez Total	Critério Utilizado	Baixa Toxidez	Média Toxidez	Alta Toxidez	
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Teores	0,0 a 0,3	0,4 a 1,0	> 1,0	
Resultado de Alumínio					

Tabela 6. Quanto aos valores da C.T.C a pH 7 - cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup> = meq/100ml.				
<i>Critério Utilizado</i>	Baixa	Média	Adequada	Alta
<i>Argila = 150-350 g/kg</i>	< 4,8	4,8 - 6,0	6,1 - 9,0	> 9,0

Tabela 7. Quanto aos valores de:					
	Critério	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
Saturação por Base	%	< 20	20 a 39	40 a 60	> 60
Matéria Orgânica	Critério	Baixo	Médio	Alto	Muito Alto
<i>Argila = 150-350 g/kg</i>	g/ Kg	< 15	15,1 a 30	30,1 a 50	> 50

<b>Tabela 8. Quanto aos teores dos micronutrientes, em mg/dm<sup>3</sup> = ppm.</b>					
<b>Critério Utilizado</b>	<b>Muito baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Adequado</b>	<b>Alto</b>
<b>Elementos Químicos</b>	< 0,16	0,16 - 0,35	0,36 - 0 60	0,61 - 0,90	> 0,90
<b>Boro disponível ( B )</b>					
	< 0,40	0,40 - 0,79	0,80 - 1,20	1,21 - 1,80	> 1,80
<b>Cobre disponível ( Cu )</b>					
	< 9,0	9,1 - 18,9	19,0 - 30,9	31,0 - 45,0	> 45,0
<b>Ferro disponível ( Fe )</b>					
	< 3,0	3,0 - 5,9	6,0 - 8,9	9,0 - 12,0	> 12,0
<b>Manganês disponível ( Mn )</b>					
	< 0,50	0,51 - 0,99	1,00 - 1,59	1,60 - 2,20	> 2,20
<b>Zinco disponível ( Zn )</b>					
		≤ 4,0	4,1 - 9,9	≥ 10,0	
<b>Enxofre disponível ( S )</b>					

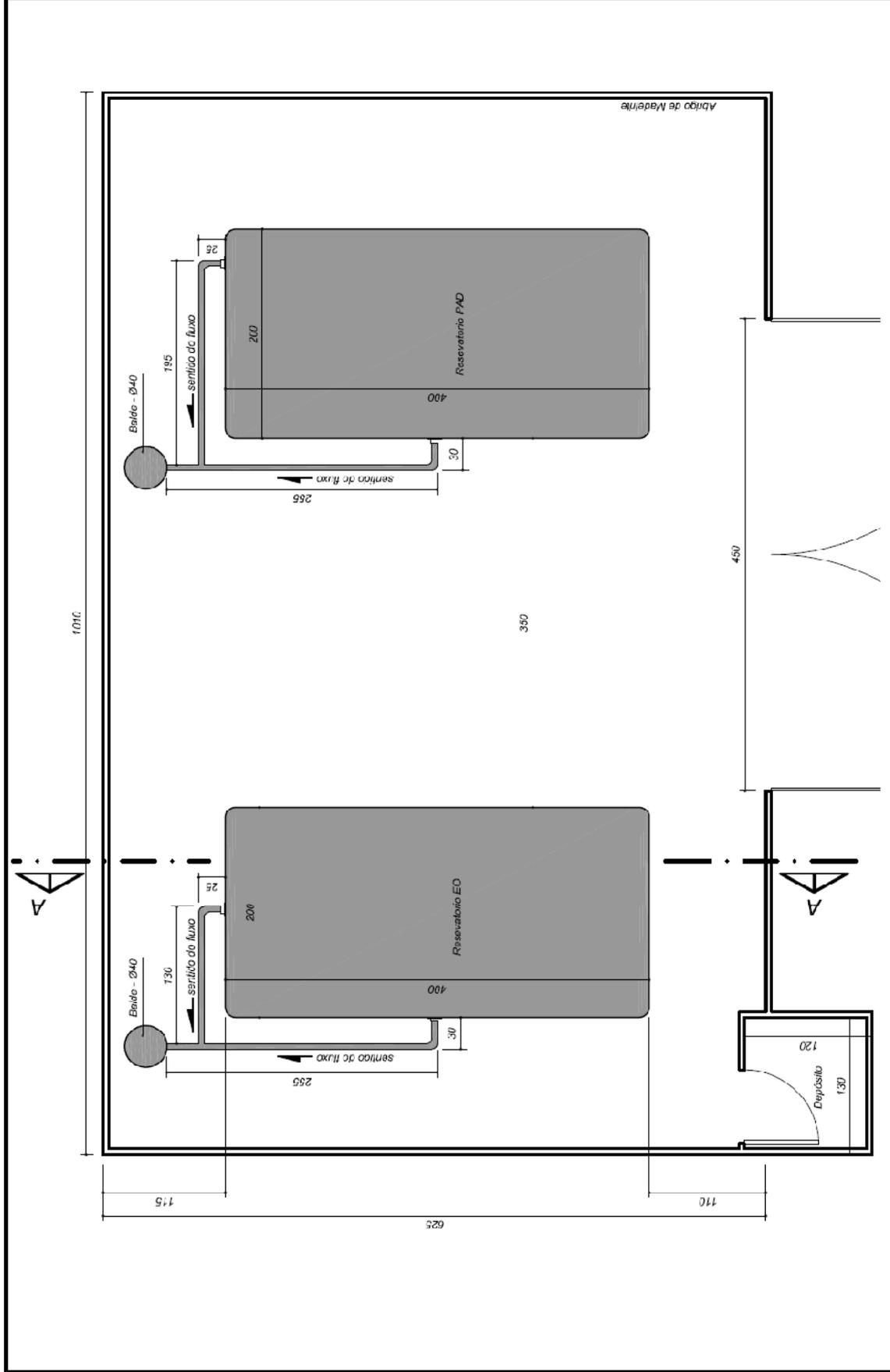
---

## ANEXO 5 – PLANTA BAIXA E CORTE

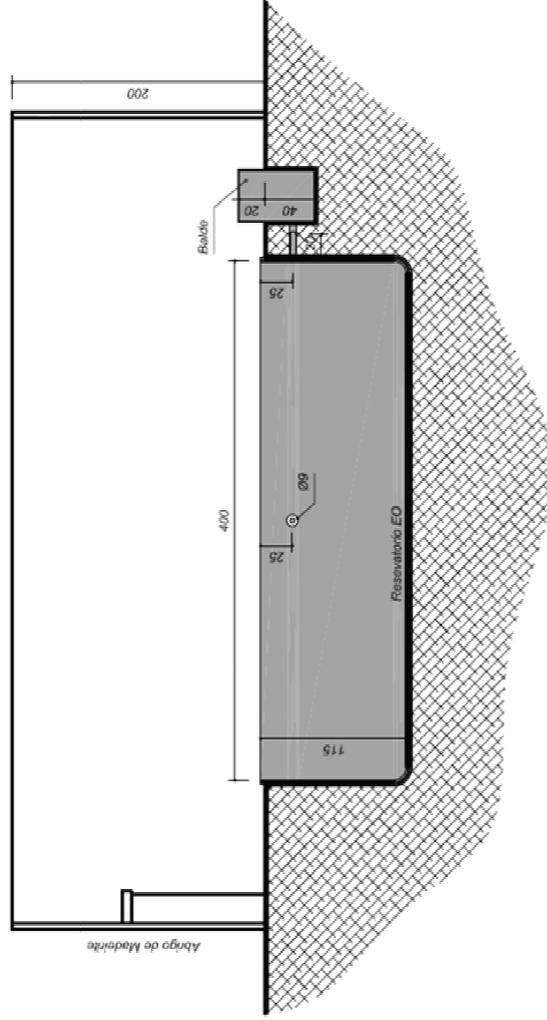
---

PLANTA BAIXA – PRANCHA 01

CORTE AA - PRANCHA 02



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA / GEOTECNIA ENSAIO EM CAMPO	Responsável: Eng. Alisson Jobim	Prancha: 01	Data: Nov/ 2009
	Conteúdo: Planta Baixa	Escala: 1/50	Obs.: Cotas em centímetros



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA / GEOTECNIA  
 ENSAIO EM CAMPO

Responsável: Eng. Alisson Joblim  
 Conteúdo: Corte AA

Prancha: 02  
 Esc.: 1/50

Data: Nov/ 2009  
 Obs.: Cotas em centímetros