

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

***CONSOLIDAÇÃO DE SOLOS MOLES COM O USO DE CÉLULA
ELETRO-OSMÓTICA***

JAQUELLINE DA SILVA FEITOZA

ORIENTADOR: PEDRO MURRIETA SANTOS NETO

DISSERTAÇÃO MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM – 163/07

BRASÍLIA / DF: AGOSTO / 2007

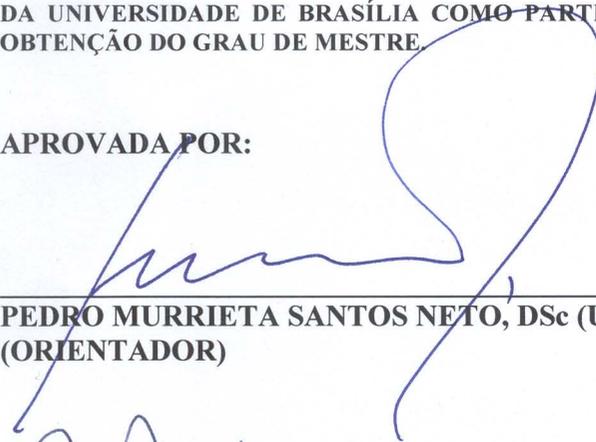
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

***CONSOLIDAÇÃO DE SOLOS MOLES COM O USO DE CÉLULA
ELETRO-OSMÓTICA***

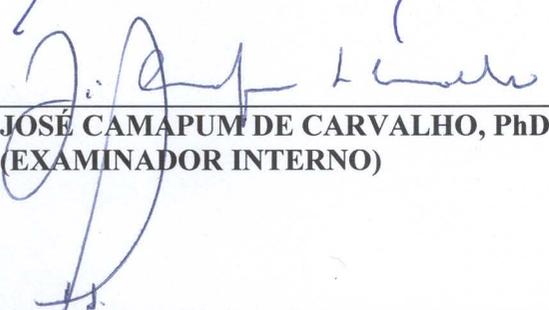
JAQUELLINE DA SILVA FEITOZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



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



**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**PAULO CESAR VIEIRA DOS SANTOS, DSc (ENGEVIX ENGENHARIA S/C LTDA)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 16 de AGOSTO de 2007.

FICHA CATALOGRÁFICA

FEITOZA, JAQUELLINE DA SILVA. Consolidação de Solos Moles com o Uso de Célula Eletro-Osmótica [Distrito Federal] 2007 xv, 108 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2007) Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil	
1. Eletro-osmose	2. Geossintéticos
3. Solo mole	4. Modelos Físicos
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

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, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 108 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jaqueline da Silva Feitoza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Consolidação de Solos Moles com o Uso de Célula Eletro-Osmótica

GRAU / ANO: Mestre / 2007

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

Jaqueline da Silva Feitoza
CLN 109 Bloco B apto 207 Asa Norte
CEP 70752-520- Brasília/DF - Brasil

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado principalmente às duas pessoas que são a razão de todos os meus esforços: Tazshida e Lucas, meus filhos queridos. Obrigada pela força, pelo carinho e pelo amor nos momentos em que era preciso.

A minha mãe Luzia, pela luta para me fazer chegar onde estou com sua dedicação e pela grande batalhadora que é.

Ao meu pai José Feitoza (*in memoriam*), que pelo pouco tempo em que ficamos juntos me mostrou o valor de uma grande e infinita amizade. Sua lembrança me sustentou nos momentos mais difíceis.

As minhas irmãs Sissy e Anny, pela força e carinho durante o desenvolvimento deste trabalho.

A minha madrinha, Socorro Puga e a minha tia Ana Zélia, pela ajuda quando as coisas ficaram difíceis. A todos os que confiaram em mim.

E a todos aqueles que poderão se beneficiar com este estudo.

AGRADECIMENTOS

Primeiro, e principalmente, a Deus.

Aos meus filhos, Tazshida e Lucas, que sempre estiveram ao meu lado.

A minha mãe Luzia por lutar por mim em Manaus e principalmente pela vida: maior presente que uma mãe pode nos dar.

Ao meu pai, José Feitoza, que apesar de não estar mais conosco, continua presente em nossos corações: a amizade atravessa fronteiras.

A minha irmã Sissy, que mesmo longe fisicamente, sempre esteve muito presente em todos os momentos. Muito obrigada pela nossa amizade!

A toda minha família: irmãs, tios e primos que sempre confiaram em mim e a minha “família postiça”: D. Elza e os Naranjo. A minha amiga Islane, que apesar de longe, sempre me escutou e me deu forças quando foi preciso.

Aos professores Nilton Campelo, Raimundo Seixas e Ellen Andrade da UFAM e Noris Diniz da UnB pela amizade e pelas recomendações.

Em especial ao professor Pedro Murrieta, orientador desta dissertação, pela força, confiança, amizade e, principalmente, pela oportunidade de realizar este trabalho.

A todos os professores da Pós Graduação em Geotecnia, pelos ensinamentos ministrados e pelas dúvidas tiradas em momentos cruciais.

A Nilzith, secretária da Geotecnia.

A Prof^ª. Izabel e aos técnicos do Laboratório de Geotecnia: Alessandro, Ricardo, Vanilson, Thiago e Diego pela ajuda e a Tatiany (Taty), que mantém o laboratório sempre impecável.

Ao pessoal do apoio técnico (Xerox): Uziel e Jorge.

Aos colegas da Geotecnia em especial a Salomé, Giovane, Eduardo Beira, Joseleide (Josy), Cláudia Champi, Graça, Luiz Tejada, Roberto, James e Alisson, meus “irmãos” geotécnicos.

A CAPES e à Prefeitura Municipal de Manaus/SEMOSBH pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para esse trabalho.

Muito Obrigada!

*"Existem derrotas, mas não existe o sofrimento.
Um verdadeiro guerreiro sabe que ao perder uma batalha
Está melhorando sua arte de manejar a espada.
Sabará lutar com mais habilidade no próximo combate."*

(Paulo Coelho)

*"Esta é uma terra de ninguém, sei que devo resistir.
Eu quero a espada em minhas mãos.
Eu sou metal, raio relâmpago e trovão..
...Não me entrego sem lutar, tenho ainda coração.
Não aprendi a me render que caia o inimigo então..."*

(Renato Russo)

RESUMO

O crescimento acelerado da população dos grandes centros tem gerado problemas de moradia, já que não existem áreas adequadas suficientes para o uso habitacional. Muitos locais ficam em desuso pelo tempo necessário para consolidação seja pela falta de uma técnica que permita a aceleração dos recalques. Para amenizar este problema, pode-se usar a técnica da eletro-osmose para melhorar solos, a princípio inadequados, a fim de torná-los apropriados para construção.

O processo eletro-osmótico consiste em aplicar uma diferença de potencial através de uma massa de solo, atraindo a água para o cátodo resultando em consolidação mais rápida que as técnicas convencionais.

Este trabalho apresenta os resultados da aplicação desta técnica, no Laboratório de Geotecnia da UnB, com o projeto, construção e uso de uma célula eletro-osmótica para avaliar a capacidade do geossintético eletrocinético adaptado (EKG_{adap}) e otimizar parâmetros do processo de eletro-osmose direcionados à consolidação de argilas moles. Utilizou-se solo do DF preparado com consistência mole e com sal (NaCl) adicionado à água de torneira, para simular as condições de solo marinho. Foram testadas várias diferenças de potencial e duas variações de carregamento.

A célula eletro-osmótica mostrou-se eficiente na estabilização destes solos, reduzindo o tempo de consolidação e aumentando sua resistência não drenada, o que foi comprovado com o uso de Vane test antes e após o tratamento.

ABSTRACT

The rapid population increase in big cities generates habitation problems, because do not exist adequate areas for habitation use. Many places are in disuse for necessary time for consolidation or for deficient of one technique that allows the acceleration of settlement. To brighten up this problem, the technical of electro-osmosis can be used to consolidate soft soils to become them appropriate for construction.

The electro-osmotic process consists in applying a difference of potential through a soil mass, attracting the water for the cathode resulting in consolidation faster than the conventional techniques.

This work presents the results of the application of this technical, in the geotechnical laboratory of UnB, with the use of a electro-osmotic cell to evaluate the capacity of the electro kinetics geosynthetics adapted (EKG adap) and to optimize parameters to use in electro-osmosis process for the consolidation of soft clays It was used clay from Brasilia mixed with salt (NaCl) and water, to simulate the conditions of marine soil. Some voltages and two loads had been tested.

The electro-osmotic cell demonstrated efficient in soft soil consolidation, reducing the consolidation's time and increasing the shear stress, what to proved with the use of Vane shear test in beginning and the end of treatment.

ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. GERAL	1
1.2. OBJETIVOS	1
1.3. ESCOPO DO TRABALHO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO POR ELETRO-OSMOSE	3
2.2 APLICAÇÃO DE ELETRO-OSMOSE NO PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO	4
2.3 ELETROCINESE	6
2.3.1 ELETROMIGRAÇÃO	8
2.3.2 ELETRO-OSMOSE	8
2.3.3 ELETROFORESE	10
2.4 USO DA ELETROCINESE NO BRASIL	10
2.5 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO	11
2.6 TIPOS DE FLUXO ATRAVÉS DO SOLO	13
2.7 DUPLA CAMADA DIFUSA	13
2.8 EFEITO DO PH	14
2.9 CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA (CTC)	15
2.10 POLARIDADE REVERSA	15
2.11 CORROSÃO ELETROQUÍMICA	16
2.12 GEOSINTÉTICO ELETRO CINÉTICO (EKG)	18
2.13 TIPOS DE ELETRODOS EKG	18
2.14 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO	20
2.15 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE	20
2.16 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE ELETRO-OSMÓTICA E EFICIÊNCIA ELETRO-OSMÓTICA	21
2.17 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	22
2.18 PRINCIPAIS TEORIAS	23
2.18.1 TEORIA DE HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI	23
2.18.2 TEORIA DE SCHMID	25
2.18.3 TEORIA DE ESRIG E COMPLEMENTAÇÕES	26
2.18.4 TEORIA DO ÍON HIDRATADO	27
2.18.5 TEORIA FRICCIONAL DE SPIEGLER (1958)	29
2.18.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS TEORIAS DE ELETRO-OSMOSE	31
3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	32
3.1 CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA	32
3.2 GEOSINTÉTICO ELETRO CINÉTICO ADAPTADO (EKG ADAP)	34
3.3 SOLO ARGILOSO	35
3.4 CÉLULA DE CARGA	37
3.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	38

4	METODOLOGIA DE ENSAIOS	40
4.1	PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO	40
4.2	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO	45
4.3	DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS	46
4.3.1	ENSAIO 01	47
4.3.2	ENSAIO 02	47
4.3.3	ENSAIO 03	47
4.3.4	ENSAIO 04	48
4.3.5	ENSAIO 05	49
4.3.6	ENSAIO 06	50
4.3.7	ENSAIO 07	50
4.3.8	ENSAIO 08	50
4.3.9	ENSAIO 09	51
4.3.10	ENSAIO 10	51
4.3.11	ENSAIO 11	51
4.3.12	ENSAIO 12	51
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	52
5.1	ENSAIO DE CONDUTIVIDADE	52
5.2	ENSAIOS COM A CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA	55
5.2.1	ENSAIO 01	56
5.2.2	ENSAIO 02	59
5.2.3	ENSAIO 03	60
5.2.4	ENSAIO 04	64
5.2.5	ENSAIO 05	70
5.2.6	ENSAIO 06	73
5.2.7	ENSAIO 07	76
5.2.8	ENSAIO 08	77
5.2.9	ENSAIO 09	80
5.2.10	ENSAIO 10	84
5.2.11	ENSAIO 11	88
5.2.12	ENSAIO 12	91
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS	94
5.3.1	ENSAIOS COM 50 KPA	94
5.3.2	ENSAIOS COM 100 KPA	97
5.3.3	RESULTADOS FINAIS	99
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	100
6.1	CONCLUSÕES	100
6.2	SUGESTÕES	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
	APÊNDICE A	106

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 – Tipos de fluxo através do solo (Nascimento, 2005).	13
Tabela 3.1 – Propriedades do solo argiloso	36
Tabela 3.2 – Dimensões da célula de carga	38
Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de condutividade	53
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio 01	56
Tabela 5.4 – Parâmetros obtidos no ensaio 01	58
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio 02	59
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio 03	61
Tabela 5.7 – Parâmetros obtidos no ensaio 03	64
Tabela 5.8 – Resultados do ensaio 04	65
Tabela 5.9 – Parâmetros obtidos do ensaio 04	65
Tabela 5.10 – Leituras obtidas no ensaio 05	70
Tabela 5.11 – Parâmetros obtidos do ensaio 05	70
Tabela 5.12 – Resultados obtidos no ensaio 06	73
Tabela 5.13 – Parâmetros obtidos no ensaio 06	73
Tabela 5.14 – Resultados obtidos no ensaio 07	76
Tabela 5.15 – Resultados encontrados no ensaio 08	78
Tabela 5.16 – Parâmetros obtidos no ensaio 08	80
Tabela 5.17 – Resultados encontrados no ensaio 09	81
Tabela 5.18 – Parâmetros obtidos no ensaio 09	83
Tabela 5.19 – Resultados do ensaio 10	84
Tabela 5.20 – Parâmetros obtidos no ensaio 10	87
Tabela 5.21 – Resultados do ensaio 11	88
Tabela 5.22 – Parâmetros encontrados no ensaio 11	90
Tabela 5.24 – Parâmetros encontrados no ensaio 12	92
Tabela 5.25 - Energia elétrica e custos dos ensaios – 50kPa	96
Tabela 5.26 - Energia elétrica e custos dos ensaios – 100kPa	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 – Modelo de Helmholtz-Smoluchowski para o fenômeno de eletro-osmose (adaptado de MITCHELL, 1993).	4
Figura 2. 2 – Teoria Básica de Eletrocinese, (Harbottle, 2003).	7
Figura 2.3 – Estrutura atômica dos argilo-minerais, (Harbottle, 2003).	9
Figura 2. 4 - Representação gráfica da eletro-osmose (Mitchell, 1993).	9
Figura 2.5 – Dupla camada difusa e potencial Zeta (Harbottle, 2003).	14
Figura 2.6 – Pilha de corrosão eletroquímica (Nascimento, 2005).	17
Figura 2.7 – Reação surgida na área anódica (Nascimento, 2005).	17
Figura 2.8 – Consolidação de argila mole, usando EKG (Lamont-Black, 2001).	18
Figura 2.9 – Tipos de eletrodos EKG (Hamir et al, 2001)	19
Figura 2.10 - Modelo de Schmid para eletro-osmose (Yeung, 1994)	26
Figura 2.11 - Movimento de água devido à aplicação de campo elétrico (Nascimento, 2005)	27
Figura 2.12 – Características e relações entre os vários modelos que descrevem eletro-osmose (Mitchell,1993)	31
Figura 3.1 – Esquema da célula eletro-osmótica (Nascimento, 2005)	33
Figura 3.2 – Célula eletro-osmótica	33
Figura 3.3 – Fonte de alimentação elétrica	34
Figura 3.4 – - EKG adaptado de 20 mm de largura	35
Figura 3.5 – Esquema do EKG _{adap.}	35
Figura 3.6 – Granulometria a laser com ultra-som.	36
Figura 3.7 – Célula de carga TF200 e indicador digital IT100	37
Figura 3.8 – Dimensões da célula de carga	37
Figura 3.9 – Vane test de laboratório	38
Figura 3.10 – Mola e haste utilizadas no ensaio.	39
Figura 4.1 – Seqüência de preparação da amostra	42
Figura 4.2 – Instalação do macaco hidráulico e da célula de carga	43
Figura 4.3 – Conectores ligados à fonte	43
Figura 4.4 – Determinação da resistência ao cisalhamento do solo	46
Figura 4.5 – Vista geral do ensaio montado	48
Figura 4.6 – Macaco hidráulico com capacidade de 2 tf sobre anteparo na célula eletro-osmótica	49
Figura 4. 7 – Ânodo rompido	49
Figura 4. 5 – Detalhe da água retirada do ensaio	50
Figura 5.1 - Condutivímetro Hach modelo CO150.	52
Figura 5.2 - Gráfico condutividade x pH	53
Figura 5.3 – Gráfico salinidade x condutividade	54
Figura 5.4 – Gráfico de salinidade x pH	54
Figura 5.5 – Gráfico tempo x recalque médio do ensaio 01	57
Figura 5.6 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 01	57
Figura 5.7 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 01	58
Figura 5.8 – Gráfico recalque x tempo do ensaio 02	60
Figura 5.9 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 03	61
Figura 5.10 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 03	62

Figura 5.11– Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 03	62
Figura 5.12 - Corrosão apresentada pelo extensômetro 02	63
Figura 5.13 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 03	64
Figura 5.14 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 04	66
Figura 5.15 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 04	66
Figura 5.16 – Gráfico recalque x intensidade de corrente	67
Figura 5.17 – Comparação entre os eletrodos	67
Figura 5.18 – Reação apresentada pelo ânodo.	69
Figura 5.19 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 04	69
Figura 5.20 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 05	71
Figura 5.21 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 05	71
Figura 5.22 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 05	72
Figura 5.23 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 05	72
Figura 5.24 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 06	74
Figura 5.25 - Gráfico tempo x recalque do ensaio 06	75
Figura 5.26 – Gráfico recalque x intensidade de corrente	75
Figura 5.27 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 06	76
Figura 5.28 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 07	77
Figura 5.29 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 08	78
Figura 5.30 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 08	79
Figura 5.31 - Gráfico recalque x intensidade de corrente	79
Figura 5.32 – Gráfico recalque x corrente do ensaio 09	81
Figura 5.33 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 09	82
Figura 5.34 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 09	82
Figura 5.35 – Gráfico comparativo dos ensaios 07 e 09	83
Figura 5.36 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 10	85
Figura 5.37 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 10	85
Figura 5.38 – Ânodo completamente desagregado	86
Figura 5.39 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 10	86
Figura 5.40– Gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 10	87
Figura 5.41 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 11	89
Figura 5.42 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 11	89
Figura 5.43 – Gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 11	90
Figura 5.44 – Gráfico recalque x corrente do ensaio 12	92
Figura 5.45 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 12	93
Figura 5.46 – Gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 12	94
Figura 5.47 – Comparação tempo x recalque obtidos nos ensaios com 50 kPa	95
Figura 5.48 – Variação da Su na carga de 50 kPa	96
Figura 5.49 - Comparação tempo x recalque obtidos nos ensaios com 100 kPa	97
Figura 5.50 - Variação da Su na carga de 100 kPa	98

LISTA DE ABREVIACOES , SÍMBOLOS E UNIDADES

ABREVIACOES

CEB	Companhia Energética de Brasília
CTC	Capacidade De Troca Catiônica
DVP	Dreno Vertical Pré-Fabricado
EKG	Geossintético Eletrocinético
EKG _{adap}	Geossintético Eletrocinético Adaptado
EO	Eletro-osmose
pH	Potencial Hidrogeniônico
UnB	Universidade de Brasília

SÍMBOLOS

A	rea da seção transversal normal  direção do fluxo
Aq	Aquoso
Cu	Cobre
Cu(OH) ₂	Hidróxido de Cobre
e	elétrons
H	Hidrognio
H ₂	Gás Hidrognio
H ₂ O	gua
i	Intensidade de corrente elétrica
I _a	ndice de atividade
L	Comprimento da amostra
NaCl	Cloreto de Sódio
O ₂	Gás Oxignio
P _u	Consumo de energia elétrica
q _e	Vazão eletro-osmótica
Q _e	Vazão eletro-osmótica
R	Resistência elétrica
S _u	Resistência ao cisalhamento não drenada
t	intervalo de tempo
u _{EO}	velocidade eletro-osmótica /eletroforética
V	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 de água no solo
γ_w	Peso Específico da gua
ζ	Potencial zeta
κ_a	Condutividade elétrica aparente
κ_e	Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica
κ_i	Eficiência eletro-osmótica

ρ	Recalque
σ_e	Condutividade elétrica do solo
ε	Constante dielétrica
μ	Viscosidade do fluido

UNIDADES

% - Porcentagem	Umidade, Índice de Consistência
A - Amperes	Intensidade de Corrente Elétrica
cm ³ /A.s - Centímetro cúbico por amperes vezes segundo	Eficiência Eletro Osmótica
g - Grama	Massa
g/l - Grama por litro	Concentração
m - Metro	Comprimento
mm. - Milímetros	recalque
M - Mol	Concentração Molar
m ² - Metro quadrado	Área
N - Newton	Força
°C - Grau Celsius	Temperatura
Pa - Pascal	Pressão
Si/cm - Siemens por centímetro	Condutividade Elétrica
tf - Tonelada força	Força
V - Volt	Diferença de Potencial Elétrico
V/m - Volt por metro	Gradiente Elétrico
W - Watt	Potência Elétrica

1. INTRODUÇÃO

1.1. GERAL

O crescimento acelerado da população dos grandes centros tem gerado problemas de moradia, já que não existem áreas adequadas suficientes para o uso habitacional. Muitos locais ficam em desuso, seja pelo tempo necessário para consolidação seja pela falta de uma técnica que permita a aceleração dos recalques. Visando minorar este problema, pode-se usar a técnica de eletro-osmose para acelerar a consolidação de solos moles de modo a torná-los mais adequados para receber construções em geral.

Embora novas aplicações venham sendo desenvolvidas, a eletro-osmose não é um fenômeno recente, sendo que as primeiras pesquisas datam de 1809. A técnica é usada, em Engenharia Civil, para reter ou provocar o fluxo de água, consolidar argilas e aumentar a capacidade de carga de solos argilosos, além de remover elementos contaminantes do subsolo. Em pesquisas desenvolvidas na Índia, Tailândia, Japão e Coreia do Sul, comprovou-se a eficiência do processo no aumento da resistência ao cisalhamento nos solos moles. É prevista sua utilização na remediação e descontaminação de solos, sendo uma excelente alternativa na aceleração de recalques em solos moles e em fundações.

Esta pesquisa é complementar a dissertação de Mestrado de Nascimento (2005), sendo realizada em parceria com a tese de Doutorado do mesmo autor, e envolve o projeto, construção e uso de uma célula eletro-osmótica cuja finalidade é avaliar a capacidade do geossintético eletrocinético adaptado (EKG_{adap}), direcionado para a consolidação. A célula foi projetada para analisar e otimizar parâmetros no processo de eletro-osmose para consolidação de argilas moles. Os resultados obtidos foram comparados a ensaios realizados sem o uso de eletro-osmose.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é projetar, montar e testar uma célula eletro-osmótica de modo a otimizar e analisar parâmetros do processo eletro-osmótico obtidos em laboratório.

Secundariamente, faz-se uma estimativa superficial do custo do processo de modo a compará-lo aos custos dos métodos tradicionais de aceleração de recalques.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida nos seguintes tópicos:

- **CAPÍTULO 1** - introdução ao uso de eletro-osmose e objetivos da pesquisa;
- **CAPÍTULO 2** - revisão bibliográfica do assunto com definições fundamentais, as teorias relativas a eletro-osmose e suas aplicações;
- **CAPÍTULO 3** - descrição dos materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho;
- **CAPÍTULO 4** - metodologia dos ensaios realizados;
- **CAPÍTULO 5** - resultados, interpretações e comentários sobre os ensaios;
- **CAPÍTULO 6** - conclusões e sugestões para pesquisas futuras no assunto.

Finalmente são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no decorrer do trabalho e os anexos contendo os resultados de ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO POR ELETRO-OSMOSE

A eletro-osmose ocorre quando uma corrente é aplicada em solos saturados. O potencial elétrico entre os eletrodos causa o fluxo de água do ânodo para o cátodo através da massa de solo. A eletro-osmose atrai a água para o cátodo e, se não recarregada no ânodo, ocorre a consolidação do solo entre os eletrodos. O adensamento é igual ao volume de água removida. O movimento da água na região do ânodo causa consolidação nessa região e a tensão efetiva aumenta. A tensão total nas vizinhanças do ânodo permanece essencialmente inalterada e a poropressão deve diminuir. Conseqüentemente desenvolve-se um gradiente hidráulico que tende a causar o fluxo de água do ânodo para o cátodo.

A consolidação continua até que a força hidráulica equilibre a força eletro-osmótica que dirige a água para o cátodo.

O uso da consolidação por eletro-osmose foi demonstrado através de várias aplicações de campo bem sucedidas como as de Casagrande (1959) e Bjerrum *et al* (1967) citados por Mitchell (1993). Mitchell (1993) afirma que dois questionamentos são importantes nesse caso: quanto será consolidado e em quanto tempo? As respostas podem ser obtidas usando-se as equações de fluxo acopladas em substituição à Lei de Darcy da teoria da consolidação.

O modelo matemático mais conhecido foi desenvolvido por Helmholtz, em 1879 e refinado por Smoluchowski, em 1914. O modelo indica a existência de uma dupla camada adjacente à superfície da partícula, conforme a Figura 2.1 (Mitchell, 1991).

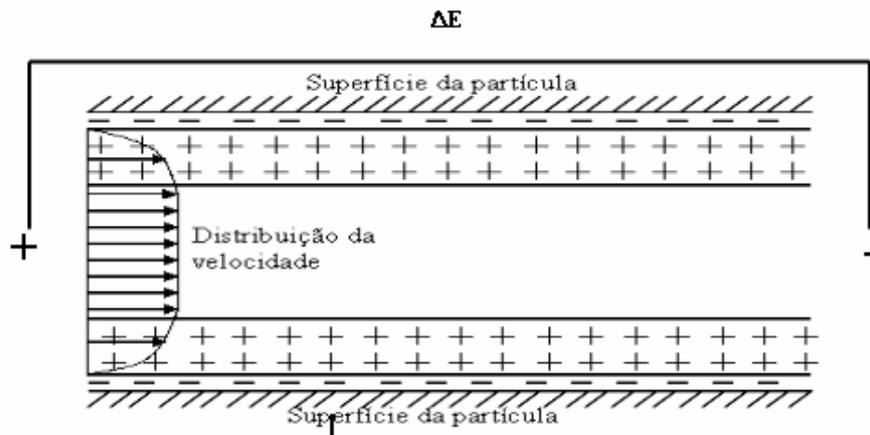


Figura 2.1 – Modelo de Helmholtz-Smoluchowski para o fenômeno de eletro-osmose (adaptado de MITCHELL, 1993).

A camada delgada interior contém ânions (íons negativos) firmemente adsorvidos. A camada exterior contém cátions (íons positivos) móveis. Imediatamente adjacente à dupla camada existe água livre. Com a aplicação da corrente elétrica, os íons positivos móveis são atraídos para o cátodo, levando com eles a água livre, resultando num movimento de água do ânodo para o cátodo. Segundo Mitchell (1991), este modelo é o mais utilizado para explicar o fluxo hidráulico sobre eletro-osmose (EO) e é conhecida como teoria de Helmholtz-Smoluchowski.

2.2 APLICAÇÃO DE ELETRO-OSMOSE NO PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO

Segundo Mitchell (1991), a publicação de Leo Casagrande (1941) é pioneira na aplicação de eletro-osmose para extração de água e estabilização de taludes. Mitchell (1993) cita as publicações de Gray & Mitchell (1967) que descreveram a eficiência da eletro-osmose e Esrig (1968) que desenvolveu uma teoria para consolidação por eletro-osmose. Depois, pouca atenção foi dada ao processo de fluxo acoplado em solos durante alguns anos, sendo recentemente renovado o interesse devido a novos problemas e aplicações em que têm funções importantes, aumentando o interesse a cada década. Estes incluem melhoria de solos usando processos químicos, térmicos e elétricos, a descontaminação *in situ* de solos, o transporte eletrocínético de nutrientes em um solo para gerar a biorremediação, o tratamento

de resíduos industriais, o aumento da capacidade de carga de estacas e o melhoramento da tecnologia de solos reforçados.

Argilas moles são altamente compressíveis e de baixa resistência e quando submetidas a carregamento, consolidam e passam por um recalque significativo, podendo ser prejudicial às edificações. O adensamento desses solos leva um longo tempo para ocorrer devido à baixa permeabilidade da argila. Assim sendo, a técnica mais comum de melhoramento nestes depósitos é a utilização de pré-carregamento e drenos verticais para a aceleração dos recalques. O excesso de poropressão é dissipado através de estacas de areia ou de geodrenos e colchão de areia ou camada de geossintético na superfície. Os drenos verticais têm a vantagem de proporcionar um caminho de drenagem adicional, segundo Shang (1997). O processo de adensamento pode ser acelerado acrescentando-se o processo de eletro-osmose.

Existe, conforme Harbottle (2003), mais dados na literatura da aplicação da eletrocinese (especialmente da eletro-osmose) em laboratório aplicada à melhoria de solos do que em escala de campo. Entretanto, Harbottle (2003) cita projetos específicos de campo que incluem: a melhoria da capacidade de carga de uma estaca através de eletro-osmose (Milligan, 1995), onde a resistência ao cisalhamento foi aumentada devido ao rebaixamento e a trocas iônicas, conduzindo a redução do atrito negativo e a um aumento da capacidade de atrito lateral da estaca; redução de altas poropressões abaixo da barragem de West Branch em Ohio, através de rebaixamento por eletro-osmose (Fetzer, 1967) estabilizando o movimento excessivo de terra e permitindo a conclusão da obra; melhoria das fundações de uma estação de tratamento de esgoto (Bjerrum *et al*, 1967); neste caso, o tratamento eletro-osmótico permitiu a escavação, sem danificar a ferrovia que passava no talude e a melhoria do solo para a construção de uma ferrovia e uma barragem em British Columbia (Casagrande *et al*, 1981).

O estímulo para combinar sobrecarga, drenos verticais e eletro-osmose surgiu no sudeste da Ásia, devido ao rápido crescimento populacional e econômico, gerando carência de áreas adequadas para construções, sobretudo no Japão, Coréia do Sul, Hong Kong; há locais onde a sobrecarga é restrita pela indisponibilidade de materiais de boa qualidade para aterro, sendo assim o processo de consolidação mesmo com o auxílio de geodrenos pode levar anos o que levou ao estudo do uso de eletro-osmose nas áreas citadas por Shang (1998) e mais recentemente em países como a Tailândia, Malásia e Cingapura, conforme os trabalhos de Bergado *et al* (2000), Bo *et al* (2000), Toh *et al* (2001) citados por Chew *et al* (2004).

Assim, para reduzir o tempo de consolidação, aumentar a disponibilidade de áreas adequadas e reduzir a sobrecarga iniciaram-se trabalhos utilizando a eletro-osmose (EO), associada a

uma tecnologia relativamente nova, ou seja, a eletricidade é conduzida por meio de geossintéticos eletrocinéticos (EKG) acelerando o processo de consolidação da argila.

Provavelmente, devido ao alto custo operacional e algumas incertezas sobre o assunto, o processo não teve ampla aplicação, embora estejam sendo realizados vários projetos de pesquisa para melhorar o processo e a relação entre os parâmetros do solo e elétricos.

2.3 ELETROCINESE

Deotti (2005) define eletrocinese como o transporte físico-químico de carga elétrica, ação de partículas carregadas e efeitos da aplicação de um potencial elétrico na formação e transporte de fluido em meios porosos. É uma técnica usada em solos de granulometria fina, onde outras técnicas são ineficazes. A presença da dupla camada difusa provoca diversos fenômenos eletrocinéticos que podem resultar do movimento de diferentes fases devido à aplicação de um campo elétrico. Os fenômenos eletrocinéticos incluem a eletromigração, a eletroforese e a eletro-osmose, sendo esta a mais significativa para a melhoria dos solos. Além destes fenômenos, as reações de eletrólise nos eletrodos podem influenciar diretamente no transporte de substâncias no solo. Basicamente, a eletromigração é o movimento dos cátions e dos ânions devido à atração eletrostática; a eletroforese é o movimento de material coloidal através da massa de solo e a eletro-osmose é o movimento da água sob a ação de um campo elétrico, conforme mostra a Figura 2.2. A eletro-osmose ocorre geralmente nos solos enquanto que a eletroforese ocorre nas pastas e colóides.

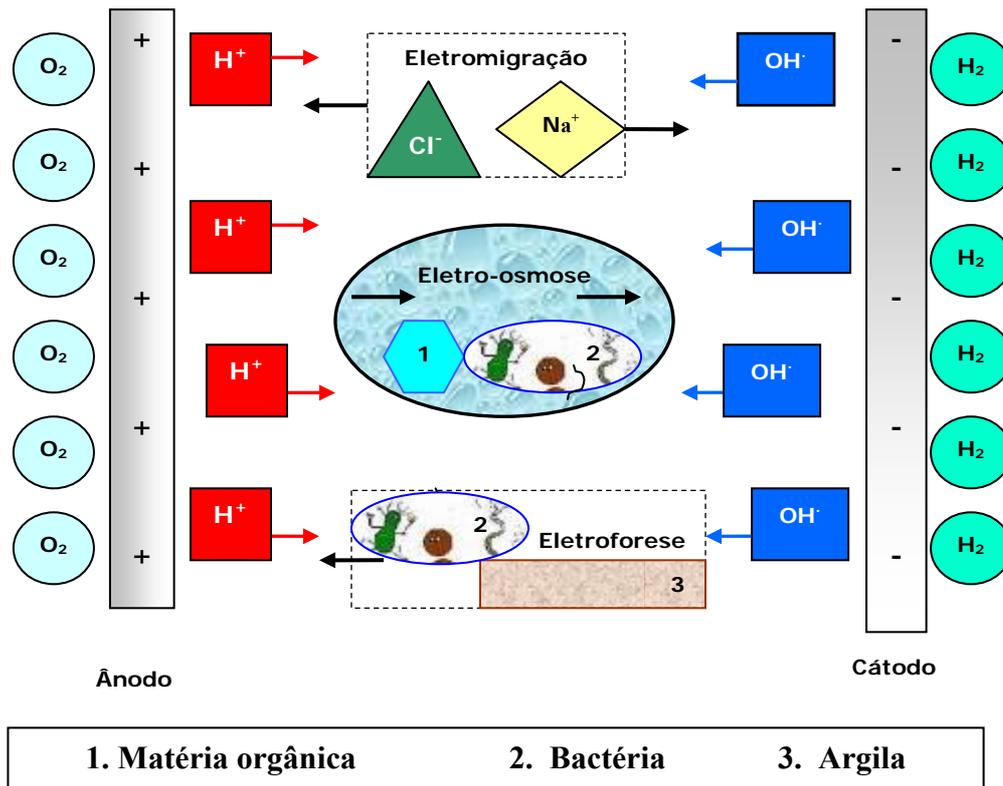


Figura 2. 2– Teoria Básica de Eletrocinese, (Harbottle, 2003).

Casagrande (1939) provou que aplicando eletrocinese em solos finos com elevado grau de saturação ocorre um aumento das tensões efetivas através do decréscimo das poropressões. Na prática, o método electrocinético de melhoria de solo (eletro-osmose) consiste na aplicação “*in situ*” de uma corrente contínua ou uma diferença de potencial elétrico, através de eletrodos inseridos no solo de consistência mole. Ele usou este fenômeno para aumentar a resistência ao cisalhamento em taludes de corte.

A aplicação de corrente elétrica em um solo requer que íons fluam para fechar o circuito, permitindo que seja estabelecida a corrente elétrica. Os íons presentes no solo executam em parte esta tarefa, mas a eletrólise da água também é importante. No ânodo são produzidos íons do gás oxigênio e hidrogênio, enquanto que no cátodo são criados gás hidrogênio e íons de hidroxila. Os íons são repelidos dos eletrodos em que são criados, produzindo um movimento no solo. Isto cria um gradiente de pH através do solo.

Um fator que influencia na técnica é o grau de saturação do solo. A eficiência do processo tende a ser maior à medida que se aumenta a saturação do solo, atingindo-se a condição ótima antes da saturação total do mesmo (Schmidt, 2004).

2.3.1 ELETROMIGRAÇÃO

Quando um campo elétrico é aplicado em um meio, as espécies iônicas presentes nesse meio serão atraídas para o eletrodo de carga oposta. Se o meio for tal que elas possam se mover, então tendem a fluir para esse eletrodo. Em uma massa de solo, tipos diferentes de íons, como cátions e ânions, podem fluir muito tempo sob essa ação eletrostática através dos caminhos preferenciais onde estão os poros do fluido. A eletromigração é o termo usado para descrever o movimento dos íons neste sistema, sob a ação de um campo elétrico.

2.3.2 ELETRO-OSMOSE

A estrutura da argila é tal que tende a formar planos achatados como partículas. Essas partículas, que são minúsculas ($< 2\mu\text{m}$), geralmente têm cargas negativas, distribuídas em superfícies planas e com um menor número de cargas positivas concentradas nas extremidades. Isto se deve à constituição dessas partículas por folhas intercaladas de óxido de sílica e óxido de magnésio, ferro ou de alumínio conforme mostrado na Figura 2.3. Esse excesso de cargas negativas atrai íons e moléculas polares dentro dos poros do fluido formando ligações químicas (de variadas forças) com elas. Quando se aplica uma diferença de potencial os íons positivos tendem a ser atraídos para o cátodo, movendo-se naquela direção, levando com eles, seja por atrito ou por água de hidratação, moléculas de água criando um fluxo de água do ânodo para o cátodo. A dimensão reduzida das partículas de argila conduz a um tamanho pequeno de poros, sendo assim a área do plano carregado de água será significativa em relação ao volume do poro. Conseqüentemente, em macro escala, podem-se mover grandes volumes de água desta maneira.

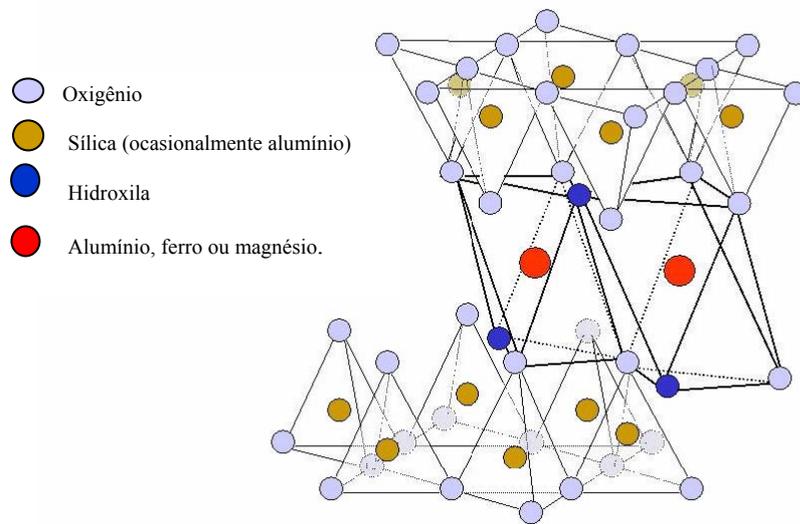


Figura 2.3 – Estrutura atômica dos argilo-minerais, (Harbottle, 2003).

A eletro-osmose é um processo pelo qual os íons carregados positivamente se movem do ânodo para o cátodo, carregando com eles a água, através da aplicação de corrente direta. A consolidação se dá quando a água é drenada no cátodo e não é recarregada no ânodo. Num sistema água-argila, a dupla camada consiste numa parte fixa e numa parte difusa. A água que é dipolar é atraída pela face negativa da partícula de argila.

É eficaz na estabilização e consolidação de solos em laboratório e no campo. Este é um processo estudado, no Brasil, principalmente na remediação e descontaminação de solos.

Fluxo de água induzido por Gradiente Elétrico

$$\Delta\psi \text{ (CC)}$$



Figura2. 4 - Representação gráfica da eletro-osmose (Mitchell, 1993).

Schmidt (2004) constatou, em estudos feitos em argilas ativas e inativas, que a eficiência da eletro-osmose pode ser da ordem de grandes magnitudes dependendo do tipo de solo, da umidade e da concentração eletrolítica. Argilas inativas, que tem baixa capacidade de troca catiônica – CTC, com alto teor de umidade terão maior hidratação de seus cátions que argilas ativas de alta capacidade de troca catiônica e baixos teores de umidade. Deve-se observar que maior hidratação favorece o aumento do fluxo.

2.3.3 ELETROFORESE

Um sistema de solo pode conter uma amplitude diferente de partículas em suspensão no líquido. Podem ser formados por colóides de argila e geralmente apresentam a presença de bactérias. Frequentemente, estas partículas têm resultante de carga e assim movem-se sob um campo elétrico de maneira similar a eletromigração. Sendo assim, dizemos que a eletroforese é o transporte de partículas ao eletrodo de polaridade oposta.

2.4 USO DA ELETROCINESE NO BRASIL

No Brasil, a eletro-osmose foi utilizada, pela primeira vez, na secagem das paredes da Igreja Nossa Senhora dos Navegantes, em Santos, litoral sul de São Paulo, em 1984.

Recentemente, a técnica da eletrocinese vem sendo bastante explorada na biorremediação do solo, conforme mostram os trabalhos de Souza (2002) no transporte eletrocinético de gasolina e óleo através de um solo residual gnáissico focado no uso da eletrocinese como uma técnica de remediação para solos finos; Monterroso (2002) no desenvolvimento de célula para estudo de eletro-osmose em solos tropicais; Schmidt (2004) para a biorremediação de um solo fabricado com caulim e bentonita e um solo natural orgânico, silto-argiloso, contaminado por óleo cru; Pedrazzoli (2004) para a remoção de chumbo em solos contaminados em Curitiba/PR; Deotti (2005) no controle de pH de um solo argiloso formado sobre uma matriz calcária contaminado por hidrocarbonetos de petróleo; Guaracho (2005) para a remoção de níquel e chumbo de solos de landfarming¹ de refinaria em Curitiba/PR; no transporte de nutrientes apresentado por Mergulhão (2003), dentre outros. A eletro-osmose direcionada

¹ Landfarming é um sistema para tratamento de solos contaminados. É um tratamento biotecnológico que aproveita a população microbiana do solo para a degradação de poluentes orgânicos.

para a consolidação foi estudada em solos argilosos do Distrito Federal por Nascimento (2005).

2.5 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Em 1809, Reuss observou os fenômenos electrocinéticos ao aplicar corrente elétrica a uma mistura argila-água. A água moveu-se para o cátodo sob a ação do campo elétrico. Quando o campo elétrico foi removido, o fluxo de água parou. Napier (1846) distinguiu a eletro-osmose da eletrólise. Helmholtz, em 1879, foi o primeiro a tratar analiticamente os fenômenos electroosmóticos, fornecendo uma base matemática. Pellat (1904) e Smoluchowski (1921), citados por Pamucku (modificaram-na mais tarde para aplicá-la a eletroforese). Com o refinamento proposto por este, a teoria de Helmholtz-Smoluchowski (H-S) foi desenvolvida. Ela trata da velocidade electroosmótica/electroforética de um líquido de determinada viscosidade e da constante dielétrica em um meio poroso numa superfície-carregada do potencial zeta (ζ), sob um gradiente elétrico, como mostra a Equação 2.1.

$$u_{EO} = \frac{\varepsilon \zeta}{\mu} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.1)$$

Onde

u_{EO} = velocidade electroosmótica /electroforética;

ε = constante dielétrica;

ζ = potencial zeta² ;

μ = viscosidade do fluido;

$\partial \phi / \partial x$ = gradiente elétrico.

Em 1939, Leo Casagrande demonstrou que aplicando a eletro-osmose aos solos com umidades elevadas, o acréscimo na tensão efetiva no solo aumenta sua resistência ao cisalhamento de tal modo que mesmo os cortes íngremes permanecem estáveis. Dois anos mais tarde, ele utilizou outra vez a eletro-osmose em engenharia de fundação com sucesso. Foram indicadas na prática de Casagrande, que pequenas reduções no índice de água pelo

² Potencial zeta - potencial elétrico no plano de cisalhamento entre a superfície carregada e a solução eletrolítica, que será visto adiante.

processo de eletro-osmose poderiam produzir aumentos significativos na resistência do solo. Ballou (1955) realizou estudos sobre o fluxo eletro-osmótico e o efeito de várias propriedades físico-químicas do solo e dos poros do fluido. Desde então, o tratamento eletroquímico dos solos tem sido investigado e usado em projetos de campo, tais como: melhoria da estabilidade de escavação, estabilização de solos, consolidação eletroquímica, consolidação e densificação de solos finos. Nas décadas de 60 e 70, a corrente direta foi aplicada com sucesso para remediação de solos degradados (Waxman & Smits, 1967). Esrig (1967) notou mudanças no pH, limites de Atterberg e quantidade de água e resistência de uma argila com alta quantidade de ilita, com o uso de eletro-osmose. A introdução de cálcio mostrou o efeito da capacidade de troca catiônica na eletrocinese no solo. Também foi notado um incremento de resistência e dos limites de Atterberg.

Mais recentemente, Lo *et al* (1991a e b) realizaram estudos de estabilização em argilas moles, usando vários tipos de eletrodos e arranjos diferentes. De maneira similar, Micic *et al* (2001) e Abdel-Meguid *et al* (1999) usaram eletro-osmose em uma argila marinha, desenvolvendo um método para aumentar a capacidade de carga de fundações offshore. Alshawabkeh *et al* (1999) avaliaram configurações de diferentes eletrodos em termos de eficiência de remediação, custo e outros parâmetros. Bergado *et al* (2000) desenvolveram estudos de consolidação de argilas moles com o uso de geossintéticos condutores elétricos (GCE), concluindo que a eletro-osmose aumenta a resistência do solo em 58% além do tempo de tratamento ser reduzido de 16 para 3-5 dias. Harbottle (2003) realizou estudos do uso da eletrocinese na melhoria de solos orgânicos contaminados. Além de estudos realizados no Brasil por Souza (2002) na remoção por eletrocinese de gasolina e óleo de solos contaminados na Bacia de Campos/RJ; Monterroso (2002) trabalhou no desenvolvimento de célula eletro-osmótica na PUC/RJ; Pedrazzoli (2004) na remoção eletrocinética de chumbo em resíduos industriais em Curitiba/PR; Schmidt (2004) no uso de biorremediação eletrocinética na remoção de contaminantes em solos no Rio de Janeiro/RJ; Guaracho (2005) na remoção eletrocinética de chumbo e níquel de solos contaminados de refinaria de petróleo em Curitiba/PR; Deotti (2005) nas pesquisas com eletrocinese para remoção de contaminantes de solos no Rio de Janeiro/RJ e Nascimento (2005) no estudo do uso de eletro-osmose direcionada a consolidação de solos moles no Distrito Federal.

2.6 TIPOS DE FLUXO ATRAVÉS DO SOLO

Até pouco tempo, a engenharia geotécnica voltava sua atenção ao fluxo hidráulico, com algum interesse no fluxo de calor, principalmente em regiões frias. Porém, com a necessidade de solucionar problemas geotécnicos, outros tipos de fluxo foram considerados, conforme a Tabela 2.1, que mostra a equação específica e a lei de cada fluxo.

Desde que as condições de fluxo e os gradientes estejam linearmente relacionados, o tratamento matemático de cada fluxo é o mesmo e as soluções para o fluxo de um tipo podem ser usadas para problemas de outro tipo, com a condição de que os valores das propriedades e condições de contorno sejam adequadamente representados.

Tabela 2.1 – Tipos de fluxo através do solo (Nascimento, 2005).

Tipo de Fluxo	Equação	Lei
Fluxo hidráulico	$q_h = \kappa_h \cdot i_h$	Lei de Darcy
Fluxo de calor	$q_t = \kappa_t \cdot i_t$	Lei de Fourier
Fluxo Elétrico	$I = \sigma_e \cdot i_e$	Lei de Ohm
Fluxo Químico	$J_D = D \cdot i_c$	Lei de Fick

Onde:

q_h, q_t, I e J_D são os índices de fluxo da água, de calor, elétrico e químico;

$\kappa_h, \kappa_t, \sigma_e$ e D são as condutividades hidráulica, térmica, elétrica e coeficiente de difusão química.

i_h, i_t, i_e e i_c são os gradientes hidráulico, térmico e elétrico.

2.7 DUPLA CAMADA DIFUSA

As partículas de argila possuem normalmente carga de superfície negativa. Para neutralizar essas cargas, os cátions livres no solo (Ca^{+2}, Na^+), são atraídos para a superfície das partículas. Essa atração cria uma dupla camada formada pelas cargas negativas da partícula e

os cátions presentes em solução e atraídos pelas partículas. Chama-se a essa dupla camada de dupla camada difusa.

A dupla camada difusa, segundo Stern (1924) compõe-se de uma camada fixa (camada Stern) e uma camada difusa (camada Gouy). Na camada Stern os íons oscilam em locais fixos de adsorção e na camada Gouy os íons se submetem ao movimento browniano, conforme a Figura 2.5.

Deotti (2005) afirma que os cátions pertencentes à dupla camada difusa possuem ligações iônicas com a superfície da partícula, sendo fracamente ligados a ela.

A teoria da dupla camada difusa foi proposta por Gouy (1910) e modificada por Chapman (1913) e sua descrição matemática desenvolvida para os casos de superfície de partícula plana, seguindo as idealizações:

- Os íons da camada dupla são pontuais e não interagem entre si;
- As cargas na superfície da partícula são uniformemente distribuídas;
- A superfície da partícula é relativamente maior que a espessura da dupla camada difusa (condição unidimensional);
- A permissividade do meio independe da posição.

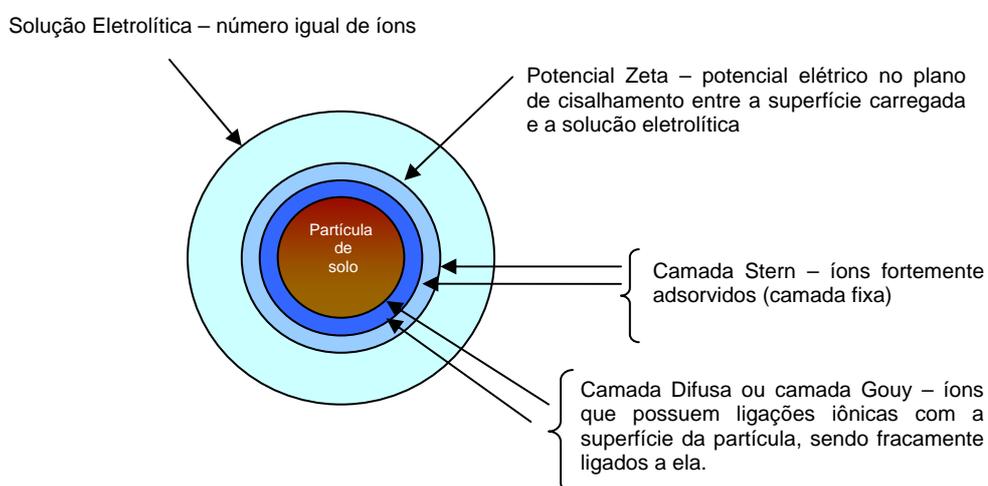


Figura 2.5 – Dupla camada difusa e potencial Zeta (Harbottle, 2003).

2.8 EFEITO DO pH

O efeito do pH é importante já que produz grandes mudanças nas propriedades do solo. No caso do solo pesquisado, a adição de NaCl diminui o valor do pH. Acar *et al* (1995) afirmam

que quando a concentração eletrolítica é alta e o pH dos poros do fluido baixo, é possível se reverter a polaridade da superfície carregada e iniciar o fluxo eletro-osmótico e que o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e) é afetado por mudanças no pH. Hamed *et al* (1991) mostram que no início do ensaio por eletro-osmose, o pH é constante até chegar a um estágio em que começa a decrescer podendo até fazer parar o fluxo.

2.9 CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA (CTC)

A capacidade de troca catiônica (CTC) pode ser definida como a quantidade total de cátions trocáveis que um solo pode adsorver. A quantidade de cátions é dada pelo número de cargas positivas (centimol ou milimol) e a massa de solo seco, geralmente 100g ou 1 kg. Os valores encontrados para solos argilosos variam de 1-150 cmol/kg. As substituições isomórficas, a quebra das ligações das partículas e a reposições das hidroxilas expostas são fontes de capacidade de trocas das argilas (Mitchell, 1993). A CTC é função do tipo, da quantidade de argila e da quantidade de matéria orgânica. A matéria orgânica é uma importante fonte de CTC porque aumenta a capacidade de adsorção de cátions pelo solo.

Existem duas fontes principais de geração de cargas negativas dentro da estrutura cristalográfica das argilas: uma originada da dissociação iônica dos grupos OH⁻ e O⁻ dos extremos e da superfície externa dos cristais (dependente do pH) e outra originada pelas substituições isomórficas (independentes do pH) que são consideradas permanentes.

2.10 POLARIDADE REVERSA

A eletro-osmose move a água do ânodo para o cátodo. São geradas poropressões negativas em torno do ânodo, espalhando-se gradualmente para fora tendo como resultado a consolidação do solo. Para se conseguir uma distribuição mais uniforme da consolidação é necessário se inverter a polaridade do sistema. A esta inversão chama-se polaridade reversa.

A técnica é usada para prevenir secagem excessiva no ânodo e diminuir a corrosão no eletrodo. Promove uma quantidade de água mais uniforme e uma distribuição de resistência ao cisalhamento devido a um aumento uniforme da tensão efetiva além de melhorar o desenvolvimento da poropressão (Shang *et al*, 1995).

Segundo Nascimento (2005), durante a consolidação eletro-osmótica a poropressão negativa máxima ocorre no ânodo enquanto que no cátodo a poropressão tende a zero, produzindo uma variação na resistência ao cisalhamento entre o ânodo e o cátodo.

Shang *et al* (1995) concluíram que a polaridade reversa aumenta a eficiência do tratamento por eletro-osmose devido à redução na reação eletroquímica adversa que ocorre durante o processo devido à mudança no gradiente de pH.

Ocorrem reações eletrolíticas nos eletrodos pela aplicação da corrente elétrica gerando íons do gás oxigênio e íons de hidrogênio no ânodo e gás hidrogênio e íons hidroxila no cátodo, conforme se pode ver na Figura 2.2. Estas reações são explicadas pelas seguintes equações no cátodo (Equação 2.2) e no ânodo (Equação 2.3):



Estas reações conduzem a um ambiente ácido em torno do ânodo e um ambiente básico em torno do cátodo.

2.11 CORROSÃO ELETROQUÍMICA

A corrosão consiste na deteriorização dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio, podendo estar ou não associada a esforços mecânicos. Os processos corrosivos podem ser classificados, dependendo do tipo de ação do meio corrosivo, em corrosão eletroquímica e corrosão química.

Corrosão eletroquímica é o processo de destruição que se desenvolve por meio de eletrólitos (água do mar, solo, soluções aquosas, bases, sais, ar atmosférico com umidade, etc.) em contato com o metal. Tais processos são os mais frequentes na natureza e se caracterizam basicamente por necessidade da presença de água em estado líquido, temperaturas abaixo do ponto de orvalho da água³ sendo que a maioria ocorre na temperatura ambiente, formação de uma pilha ou célula de corrosão com a circulação de elétrons na superfície metálica.

A pilha de corrosão eletroquímica é constituída de quatro elementos fundamentais:

- a. Área anódica: superfície onde se verifica a corrosão (reações de oxidação);
- b. Área catódica: superfície protegida onde não há corrosão (reações de redução);

³O ponto de orvalho é definido como sendo o ponto em que o vapor de água presente no ar está prestes a se condensar.

- c. Eletrólito: solução condutora ou condutor iônico que envolve simultaneamente as áreas anódicas e catódicas.
- d. Ligação elétrica entre as áreas anódicas e catódicas.

A Figura 2.6 mostra esquematicamente uma pilha de corrosão eletroquímica.

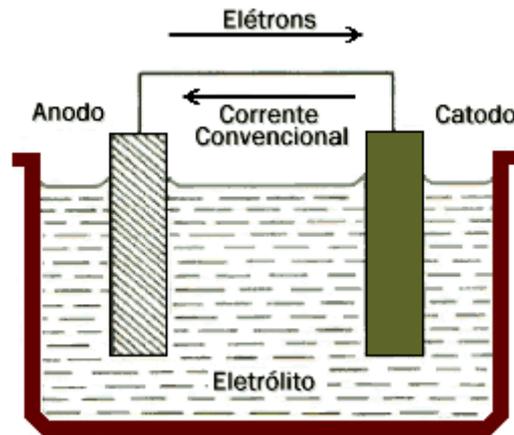


Figura 2.6 – Pilha de corrosão eletroquímica (Nascimento, 2005).

As reações da corrosão envolvem sempre as reações de oxi-redução. Na área anódica onde se processa a corrosão ocorrem as reações de oxidação, sendo que a principal é a passagem do metal da forma reduzida para a forma iônica (Figura 2.7).

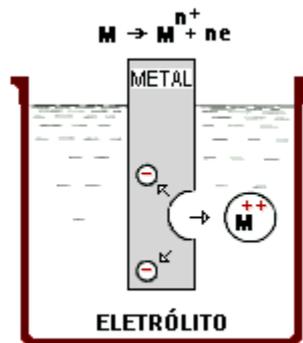


Figura 2.7 – Reação surgida na área anódica (Nascimento, 2005).

O desgaste do material pode ser observado na Figura acima, ocorre com a passagem do metal da forma reduzida para a iônica (combinada).



Percebe-se pelas reações de oxi-redução, que liberam gás após reagirem, que a aplicação de eletro-osmose em consolidação é um processo que merece estudos de modo a eliminar essas dificuldades encontradas para fazer com que este processo tenha maior eficiência.

2.12 GEOSSINTÉTICO ELETRO CINÉTICO (EKG)

É uma combinação das qualidades dos geossintéticos com os fenômenos eletrocinéticos, com inúmeras vantagens: custo, estrutura, funções de geossintético e polaridade reversa. O EKG é usado para consolidar argila muito mole, permitir a construção em pasta argilosa, estabilizar aterros de ferrovias, rebaixar esgotos, controlar condições de drenagem em turfas e rebaixar aterros sanitários e minas de rejeitos.

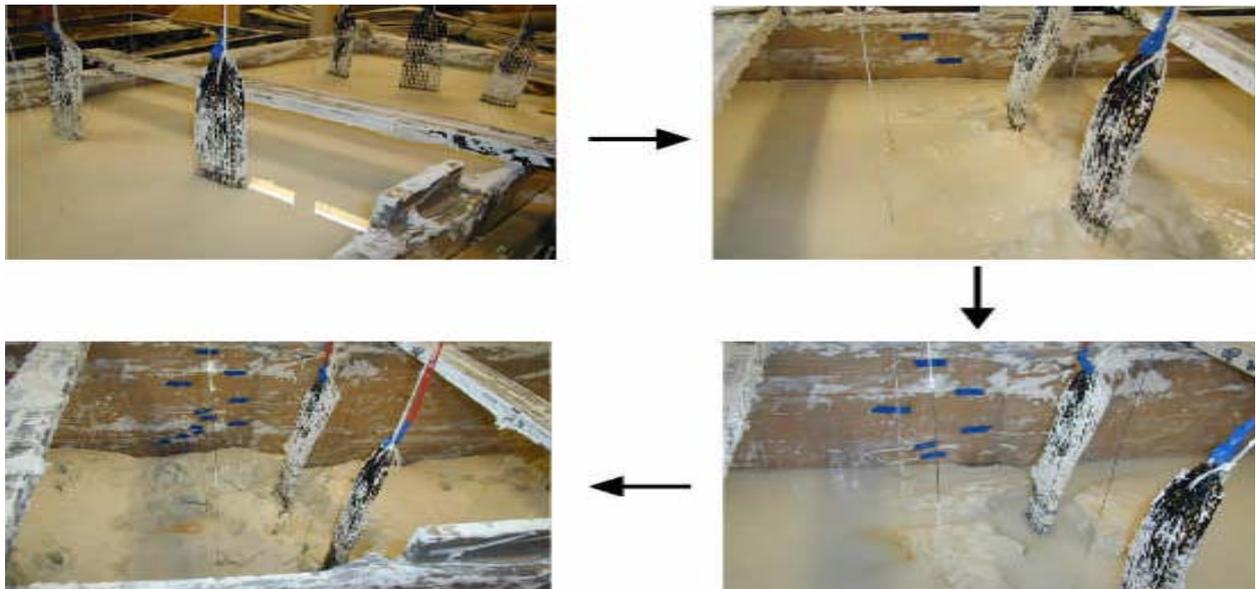


Figura 2.8 – Consolidação de argila mole, usando EKG (Lamont-Black, 2001).

2.13 TIPOS DE ELETRODOS EKG

Hamir *et al* (2001) citam alguns tipos de eletrodos EKG, são eles:

- i. **EKG tipo 1:** Material geossintético contendo um cordão de fio de cobre. É formado por um geotêxtil agulhado convencional de polipropileno. A corrente elétrica é transferida a um fio de cobre costurado no material conforme mostrado na Figura 2.9(a);

- ii. **EKG tipo 2:** Material geossintético com fibras de aço incorporadas. É formado por uma mistura de fibras poliméricas e aço inoxidável, como mostra a Figura 2.9(b); As fibras de aço constituem 20% do peso do material;
- iii. **EKG tipo 3:** Composto de polipropileno e chapas de fibra de carbono não tecido. É formado por um sanduíche de fibras de carbono entre duas camadas de chapa de polipropileno não tecido, Figura 2.9(c). A corrente é transmitida através do carbono com o polipropileno tendo a função de drenagem e filtração;
- iv. **EKG tipo 4:** Geocomposto reforçado com um corda de fio de cobre. É composto por uma fita de reforço comercialmente disponível formado de fibras de poliéster anexado em polietileno, O fio de cobre é costurado ao polietileno tornando-se condutor, Figura 2.9(d).

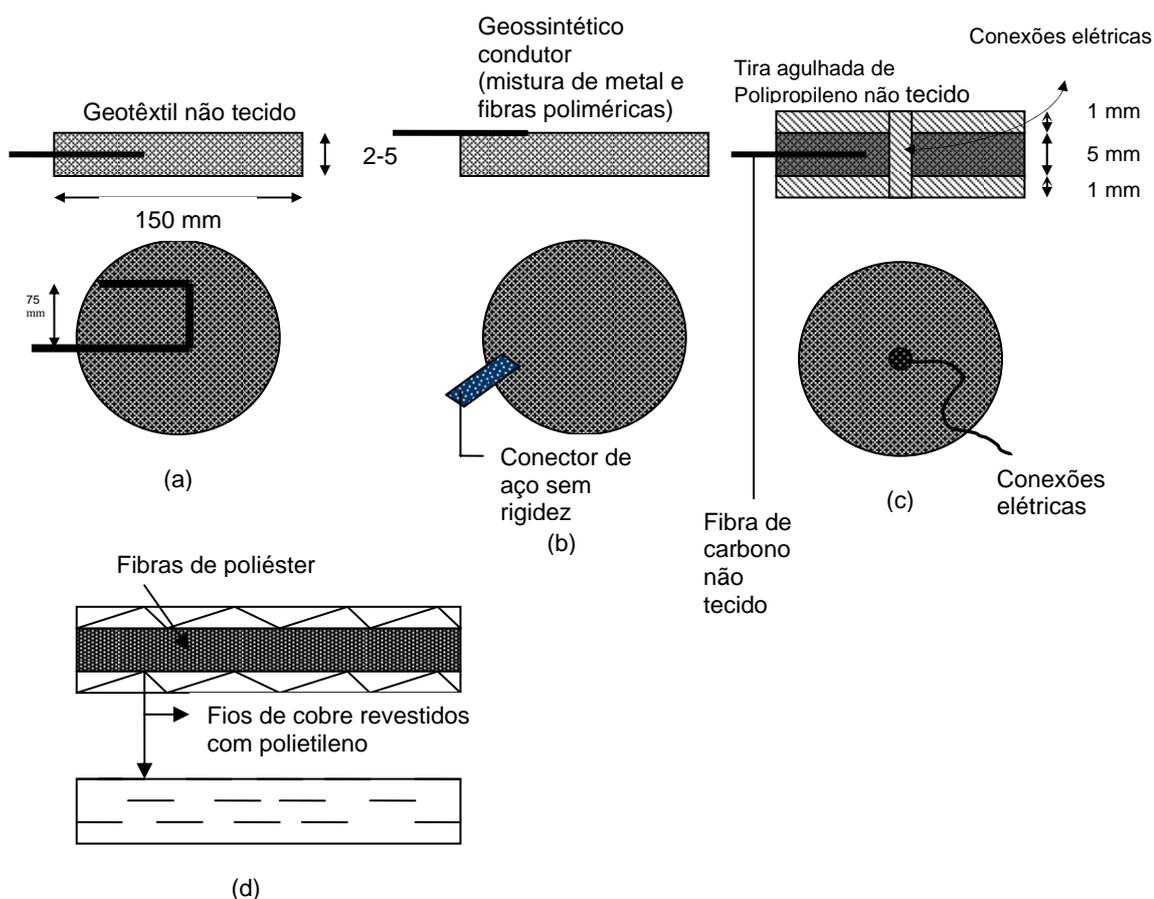


Figura 2.9 – Tipos de eletrodos EKG (Hamir *et al*, 2001)

2.14 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

De modo similar à equação de Ohm, a condutividade elétrica (σ_e) é considerada nos sistemas solo-água, como sendo proporcional ao inverso da resistividade elétrica, conforme a Equação 2.5.

$$\sigma_e = \frac{1}{R} \cdot \frac{L}{A} \quad (2.5)$$

Onde R = resistividade elétrica (ohm);

L = comprimento da amostra (m);

A = área da seção transversal da amostra.

O valor da condutividade elétrica de um solo saturado, segundo Mitchell (1993), varia de 0,0001 a 0,01 Siemens/cm sendo dependente de fatores como porosidade, grau de saturação, mineralogia, trajetória e tamanho das partículas, forma e superfície de condutância, estrutura do solo, cimentação e temperatura. Tais medidas são usadas nos campos de engenharia petrolífera, mapeamento e prospecção geofísica e mecânica dos solos.

2.15 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE

É um parâmetro inversamente proporcional à resistência oferecida pelo fluxo de corrente elétrica. Esta resistência pode mudar devido a variações na porosidade, no fluido do poro, tortuosidade do meio poroso e concentrações eletrolíticas na dupla camada. A condutividade elétrica aparente (κ_a) representa um aumento na resistência e um incremento na voltagem requerida para manter a corrente constante, sendo uma boa aproximação da condutividade do solo somente durante as primeiras fases da eletro-osmose. Este parâmetro pode ser avaliado através da equação 2.6.

$$\kappa_a = \frac{i.L}{V.A} \quad (2.6)$$

Onde: i = corrente elétrica;

L = comprimento da amostra;

V = diferença de potencial elétrico;

A = área da seção transversal da amostra.

2.16 COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE ELETRO-OSMÓTICA E EFICIÊNCIA ELETRO-OSMÓTICA

O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e) é um indicador da rapidez com que a água pode ser retirada do solo pela aplicação de um gradiente de potencial elétrico. A magnitude de κ_e depende do gradiente elétrico, da química do sistema solo-água e das relações entre a poropressão, sendo independente do tamanho dos poros.

O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica pode ser calculado usando a Equação 2.7.

$$\kappa_e = \frac{Q_e \cdot L}{A t_e \cdot E} \quad (2.7)$$

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.

A eficiência e a economia da eletro-osmose dependem de fatores tais como o tipo de solo, teor de umidade e concentração eletrolítica. Quanto maior a diferença na concentração de cátions e ânions tanto maior o arraste de água na direção do cátodo durante a eletro-osmose, Mitchell (1993).

Devido a eletronegatividade das partículas de argila, a concentração de cátions na dupla camada é maior e a de ânions é menor dentro de um solo fino, do que a concentração na solução externa livre. Isto é responsável pela distribuição iônica adjacente às superfícies argilosas.

A eficiência eletro-osmótica (κ_i) depende da quantidade de água transportada pela unidade de corrente elétrica passada, sendo definida pela equação 2.8.

$$\kappa_i = \frac{\kappa_e}{\sigma_e} \quad (2.8)$$

Onde:

κ_e = coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica;

σ_e = condutividade elétrica do solo;

Acar *et al* (1995) afirmam que os coeficientes não são constantes e sim dependentes do tempo. Em seus ensaios, encontraram valores entre 0 - 5 cm³/A.s e 0 - 0,03 cm³/A.s.

2.17 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

O consumo de energia elétrica por unidade de volume de solo (P_u), em ensaios unidimensionais, é dado pela equação 2.9.

$$P_u = \frac{dE_u}{dt} = \frac{i.V}{A.L} \quad (2.9)$$

Onde P_u = Consumo de energia elétrica por unidade de volume de solo;

E_u = energia elétrica utilizada por unidade de volume de solo;

t = intervalo de tempo em que é utilizada a energia elétrica;

i = corrente elétrica;

V = diferença de potencial;

A = área da seção transversal da amostra;

L = comprimento da amostra.

Acar *et al* (1995) realizando ensaios sob intensidade de corrente constante, concluíram que o consumo de energia é controlado pela evolução do gradiente elétrico ou pelo desenvolvimento da resistência através da amostra, ou seja, após o período inicial de indução o consumo permanece constante. O custo, em eletro-osmose, é proporcional ao fluxo eletro-osmótico.

2.18 PRINCIPAIS TEORIAS

2.18.1 TEORIA DE HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI

Similarmente à condutividade hidráulica, esta teoria introduz o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica, κ_e , como a taxa de volume do líquido que passa através da área da seção transversal devido a um gradiente elétrico. É expressa por uma relação semelhante à de Darcy:

$$q_e = \kappa_e \cdot i_e \cdot A \quad (2.10)$$

Onde:

- q_e = vazão eletro-osmótica ($L^3 T^{-1}$);
- κ_e = coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica ($L^2 T^{-1} V^{-1}$);
- A = área da seção transversal normal à direção do fluxo (L^2);
- i_e = gradiente elétrico ($V L^{-1}$).

Sendo V a diferença de potencial elétrico, obtida pela relação entre o trabalho da força elétrica, em Joule, e a carga, em Coulomb. A unidade padrão é: $V = M L^2 T^{-3} I^{-1}$, sendo I a unidade fundamental de corrente elétrica.

Pode-se obter o gradiente elétrico através da diferença de voltagem entre os eletrodos e a distância entre os mesmos. O coeficiente de condutividade eletro-osmótica, κ_e , é uma propriedade do solo que indica a velocidade do fluxo hidráulico sob um gradiente elétrico unitário sendo obtido através da determinação da razão de fluxo de água que passa na amostra de solo de largura e seção transversal conhecidos, sob um gradiente elétrico também conhecido. Mitchell (1993) mostra que o valor de κ_e situa-se no intervalo de 1×10^{-8} a 1×10^{-9} $m^2/V.s$, independente do tipo de solo, sendo sensível à concentração eletrolítica da água, enquanto que Hamed *et al* (1991) encontraram κ_e variando entre 1×10^{-4} a 1×10^{-6} $m^2/V.s$ para todos os solos, o que difere dos resultados obtidos por Mitchell (1993); os valores mais altos indicam solos de grãos finos de baixa atividade, com maiores concentrações de água e em menores concentrações eletrolíticas.

Embora a equação 2.4 forneça uma estimativa da taxa de fluxo para o valor do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica sob circunstâncias constantes, ela supõe que o gradiente

elétrico seja constante através dos elétrodos. Aplicar uma corrente elétrica no meio do solo gerará uma zona de condutividade elétrica elevada no ânodo e uma zona de baixa condutividade elétrica no cátodo (Hamed, 1990; Acar *et al*, 1997).

A aplicação de eletro-osmose reduz a poropressão em solos de baixa permeabilidade como argilas e siltes, resultando na consolidação, acompanhada de aumento na resistência do solo. O efeito é permanente e ocorre em um intervalo de tempo relativamente curto. (Milligan, 1994 citado por Hamir *et al*, 2001).

A economia e eficiência da extração de água por eletro-osmose são governadas pela quantidade de água transferida por carga unitária, quantificada pela eficiência eletro-osmótica de transporte de água, κ_i . O parâmetro κ_i relaciona-se com o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico através da Equação 2.11.

$$\kappa_i = \frac{\kappa_e}{\sigma_e} \quad (2.11)$$

Onde σ_e é a condutividade elétrica do solo.

κ_i pode variar em uma escala de 0 a 5 cm³/A.s, dependendo da condutividade elétrica do meio poroso. A condutividade muda conforme a quantidade de água, a CTC e a quantidade de eletrólitos livres no solo (Gray&Mitchell, 1967). Os mesmos autores indicam que a eficiência eletro-osmótica inicial diminui com o decréscimo da umidade e o aumento da atividade do solo. A eficiência do rebaixamento eletro-osmótico tende a ser independente das variações na concentração eletrolítica inicial para argilas de alta atividade. Quando ocorre um aumento na concentração eletrolítica em argilas de baixa atividade, Hamed *et al* (1991) mostram que o κ_e e o κ_i não são constantes, diminuindo com a transformação química através da massa de solo durante o processo. O valor de κ_i aumenta de 0,32 para 1,20 cm³/A.s com o decréscimo da concentração inicial de NaCl e HCl de 10⁻¹ M para 10⁻³ M no solo. A eficiência eletro-osmótica diminui com o aumento dos gradientes elétricos, provavelmente devido a uma quantidade elevada de íons H⁺.

Mitchell (1991) afirma que a teoria de Helmholtz-Smoluchowski é considerada um modelo para grandes poros, sendo aplicável para diâmetros superiores a 1000 Å e concentração diluída na água dos poros de 0,1% em peso. A teoria também não leva em consideração a interação entre duplas camadas de partículas adjacentes. A espessura da dupla camada difusa é inversamente proporcional à concentração eletrolítica, então camadas adjacentes podem se sobrepor para concentrações no fluido intersticial baixíssimas, isto é, em baixas concentrações

a teoria pode não ser aplicável, pois a espessura da dupla camada difusa não pode mais ser desprezada (Schmidt, 2004).

2.18.2 TEORIA DE SCHMID

Schmid (1950, 1951) supõe que os íons opostos estão distribuídos homogeneamente nos poros do fluido. As distâncias entre as cargas são comparadas ao raio do poro ou consideradas muito grandes. Os íons contrários estão distribuídos nos poros do fluido de maneira similar aos íons na nuvem iônica em torno do íon central na teoria de eletrólitos fortes. Caso a solução eletrolítica esteja diluída nos poros do fluido, os íons são distribuídos homogeneamente na seção transversal dos poros através de seu movimento térmico. As equações utilizadas são semelhantes às da teoria de Helmholtz-Smoluchowski.

Baseando-se na concentração fixa de íons, desenvolve-se uma teoria eletroquímica mais generalizada de sistemas de poros estreitos (diâmetros inferiores a 1000 Å).

Schmid assume simplificações no desenvolvimento de sua teoria:

- O coeficiente de atividade presente na fase membrana e em fases maiores é igual a 1;
- A concentração dos grupos iônicos fixos não muda durante as reações químicas com os íons do eletrólito;
- A concentração eletrolítica de duas fases tem o mesmo valor e as soluções estão em equilíbrio nos fluidos do poro;
- A eletro-osmose é observada através de um fluxo de corrente elétrica infinitesimal;
- A matriz tem as propriedades de um isolante elétrico e o volume do fluxo eletro-osmótico é tão lento que as forças de aceleração podem ser desprezadas em relação às forças de atrito
- O fluido e as cargas são tratados como contínuos.

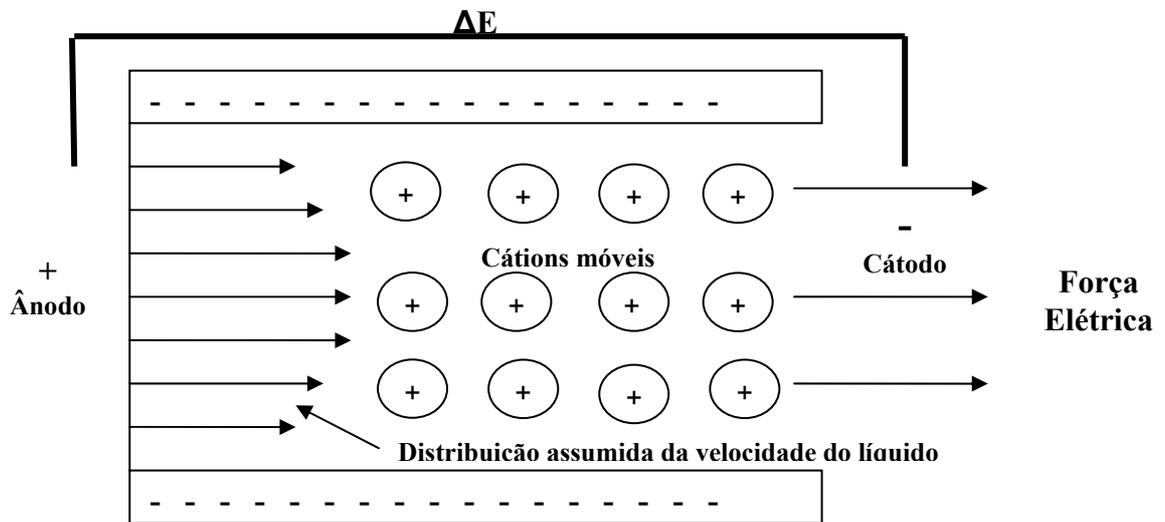


Figura 2.10 - Modelo de Schmid para eletro-osmose (Yeung, 1994)

2.18.3 TEORIA DE ESRIG E COMPLEMENTAÇÕES

É baseada no desenvolvimento de poropressão resultante da aplicação de um campo potencial uniforme. Esrig mostrou que aplicando a equação da continuidade e a lei da conservação de massa, a equação da consolidação unidimensional também é verdadeira para a consolidação eletro-osmótica unidimensional. A teoria foi validada por Wan e Mitchell (1976).

Em um sistema água-argila, a dupla camada difusa consiste de uma parte fixa e uma parte difusa, conforme descrito na teoria de Helmholtz-Smoluchowski (fig. 2.11). A água, sendo dipolar, é atraída tanto por superfície carregada negativamente nas partículas argilosas quanto por cátions na camada dupla. Quando uma corrente direta é aplicada ao sistema, cátions na dupla camada difusa movem-se em direção ao cátodo para ganhar elétrons e assim, ficarem descarregados.

Sob um gradiente de voltagem uniforme, as poropressões desenvolvidas dependem das condições de contorno. Para ânodo fechado e cátodo aberto com livre acesso da água, a poropressão será dada pela equação 2.12

$$u_w = - \frac{Ke \cdot \gamma_w}{Kh} \cdot V \quad (\text{Equação 2.12})$$

Onde V é a diferença de potencial elétrico. Conseqüentemente, o ânodo fechado produz poropressão negativa em algum ponto que seja proporcional à tensão.

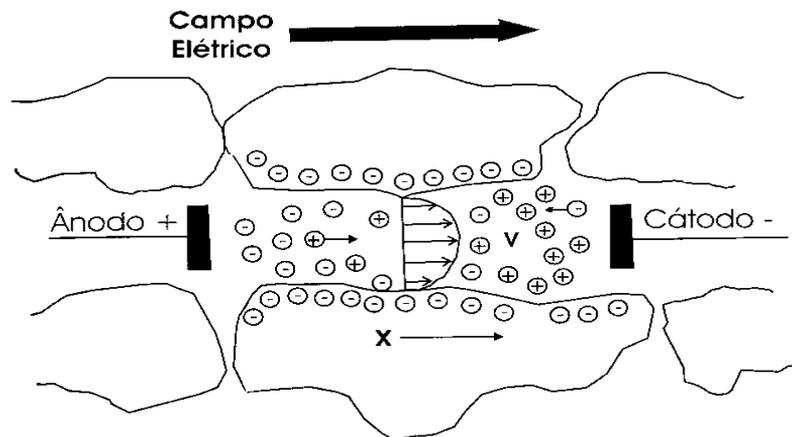


Figura 2.11 - Movimento de água devido à aplicação de campo elétrico (Nascimento, 2005)

A poropressão, durante o processo, muda seu desenvolvimento na massa de solo. Supondo que a tensão total permanece constante, a mudança na poropressão levará a mudanças na resistência do solo. Quando a água é removida no cátodo e não é repostada no ânodo, o resultado é a consolidação do solo.

2.18.4 TEORIA DO ÍON HIDRATADO

A água é provavelmente o composto químico mais comum para todos, sendo uma substância com características únicas, o que torna a água um ótimo solvente para sólidos iônicos cristalinos. Duas propriedades são responsáveis por este fator: a primeira é que a molécula de água é um dipolo, ou seja, sua molécula é angular existindo uma pequena fração de carga negativa no oxigênio central e cargas positivas nos hidrogênios terminais, de maneira que existe uma pequena separação entre as cargas resultando num pólo positivo e num pólo negativo (ou dois pólos ou ainda dipolo). Isso é resultado do oxigênio ter a tendência de atrair para si os elétrons das ligações O-H, portanto tornando-se mais negativo, deixando o hidrogênio mais positivo. A molécula de água continua neutra, mesmo contando com a ocorrência do dipolo, que é permanente.

Sendo a água polar há uma força de atração chamada íon dipolo entre uma ponta da água e um íon de carga oposta. Dessa forma, as moléculas de água tendem a orientar qualquer tipo de íon, e permanecer dessa forma associada com ele. Neste caso, dizemos que o íon está hidratado, ou solvatado. A conclusão geral a ser tirada é: todos os íons quando em solução aquosa são (ou estão) hidratados, onde uma molécula de água é substituída por outra, presente na solução aquosa. Esse número médio de moléculas de água envolvendo o íon é chamado de número de hidratação, e em geral é pequeno para os ânions.

Para se compreender porque é que a água é um solvente tão poderoso para sólidos iônicos cristalinos, têm-se que entender a constante dielétrica da água. Para que se possa definir e entender o significado do alto valor da constante dielétrica da água usase a Lei de Coulomb (equação 2.13), ou seja, força é diretamente proporcional ao produto das cargas, e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa, dependendo ainda do meio no qual as partículas estão imersas: sendo muito maiores se as partículas estiverem no ar que se estiverem na água.

$$F = \frac{(q_1 q_2)}{r^2} \quad (2.13)$$

De fato, a força elétrica é inversamente proporcional à constante dielétrica do meio (ϵ), onde:

$$F = \frac{(q_1 q_2)}{\epsilon \cdot r^2} \quad (2.14)$$

Se q_1 e q_2 forem de sinais opostos, a força F é de atração, e será negativa. Caso q_1 e q_2 sejam de mesmo sinal, F será positiva, e de repulsão. Quanto maior ϵ menor F , e a água, tem uma constante dielétrica grande quando comparada com outras substâncias ($\epsilon_{H_2O} = 78,54$). Pode-se definir a constante dielétrica do meio como a razão entre o trabalho necessário para separar cargas opostas a uma determinada distância no vácuo pelo trabalho necessário para separar as mesmas cargas quando imersas no meio.

A constante dielétrica é uma propriedade do meio como um todo, isto é, é o conjunto de um número muito grande de moléculas de água que determina a propriedade dielétrica do solvente água.

A teoria do íon hidratado supõe que quando a carga elétrica for suficientemente grande, existe uma grande concentração de íons próximos à partícula de solo, conduzindo a uma diminuição da constante dielétrica. A contribuição principal na polarização da molécula de água é o alinhamento de seu dipolo pelo campo elétrico. A polarização é proporcional ao campo elétrico quando este é muito pequeno, tornando-se saturado em campos elétricos elevados. A água de hidratação é carregada juntamente com os íons na direção do gradiente elétrico (do ânodo para o cátodo). O transporte de íon hidratado é dado pela equação 2.15.

$$H = t_+N_+ - t_-N_- \quad (2.15)$$

Onde t_+ e t_- são os números de transporte, isto é, números que representam a fração de corrente carregada por uma espécie iônica particular. Os números N_+ e N_- são os números de moles de água de hidratação por mole de cátions e ânions respectivamente.

2.18.5 TEORIA FRICCIONAL DE SPIEGLER (1958)

Conforme Huang *et al* (1999), Spiegler, em 1958, introduziu um conceito completamente diferente para explicar os processos eletro-osmóticos baseado nas interações de atrito entre íons, água e paredes do poro. O conceito é independente de toda a estrutura particular do meio poroso, podendo esclarecer algumas discrepâncias encontradas nas teorias mais avançadas. Ele mostra que o transporte eletro-osmótico por unidade de carga elétrica aumenta conforme aumenta a razão cátion/água no sistema. O modelo eletro-osmótico é descrito macroscopicamente pela Equação 2.16:

$$\frac{Q}{I} = \frac{\epsilon \cdot \zeta}{\mu(\lambda_0 + 2\lambda_s / r)} \quad (2.16)$$

Onde: Q = taxa de fluxo de água pelo tempo

ε = constante dielétrica;

ζ = potencial zeta;

μ = viscosidade do meio;

I = intensidade de corrente;

λ_0 e λ_s = condutividade específica do líquido e do solo.

A teoria de Spiegler é conceitualmente útil, mas as previsões quantitativas requerem soluções numéricas longas (Gray & Mitchell, 1967), o que tornou a teoria pouco utilizada, outra variação é a descrição macroscópica do modelo, conforme a equação 2.17.

$$Q_e = \kappa_e \cdot i_e \cdot A \quad (2.17)$$

Onde: Q_e = taxa de fluxo eletro-osmótico;

κ_e = coeficiente de condutividade eletro-osmótica;

i_e = gradiente elétrico aplicado;

A = área da seção transversal perpendicular ao fluxo de água.

A teoria assume as hipóteses seguintes:

- Exclusão de co-íons⁴, isto é, o meio se comporta como uma membrana permseletiva⁵ perfeita, admitindo apenas íons de um único sinal;
- Dissociação completa dos íons do poro do fluido.

O valor da condutividade hidráulica de solos diferentes difere em valores, entretanto a condutividade eletro-osmótica situa-se entre 1×10^{-9} e $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2 / \text{V.s}$, sendo independentes do tipo de solo (Mitchell, 1993). Assim, sendo o gradiente elétrico é muito mais eficaz que a condutividade hidráulica. No entanto, não existem correlações aceitáveis entre o transporte eletro-osmótico da água e parâmetros do sistema solo-água (índice de água do solo, densidade da carga de superfície do solo, e concentração eletrolítica). Uma das dificuldades encontradas para se desenvolver uma correlação universal é a grande variação do comportamento eletrocínético exibido por sistemas argila-água-eletrólito.

⁴ Íons de sinais opostos ao da superfície carregada são chamados de contrários. Íons de mesmo sinal são chamados de co-íons.

⁵ Que permite migração de íons e água em velocidades diferentes.

2.18.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS TEORIAS DE ELETRO-OSMOSE

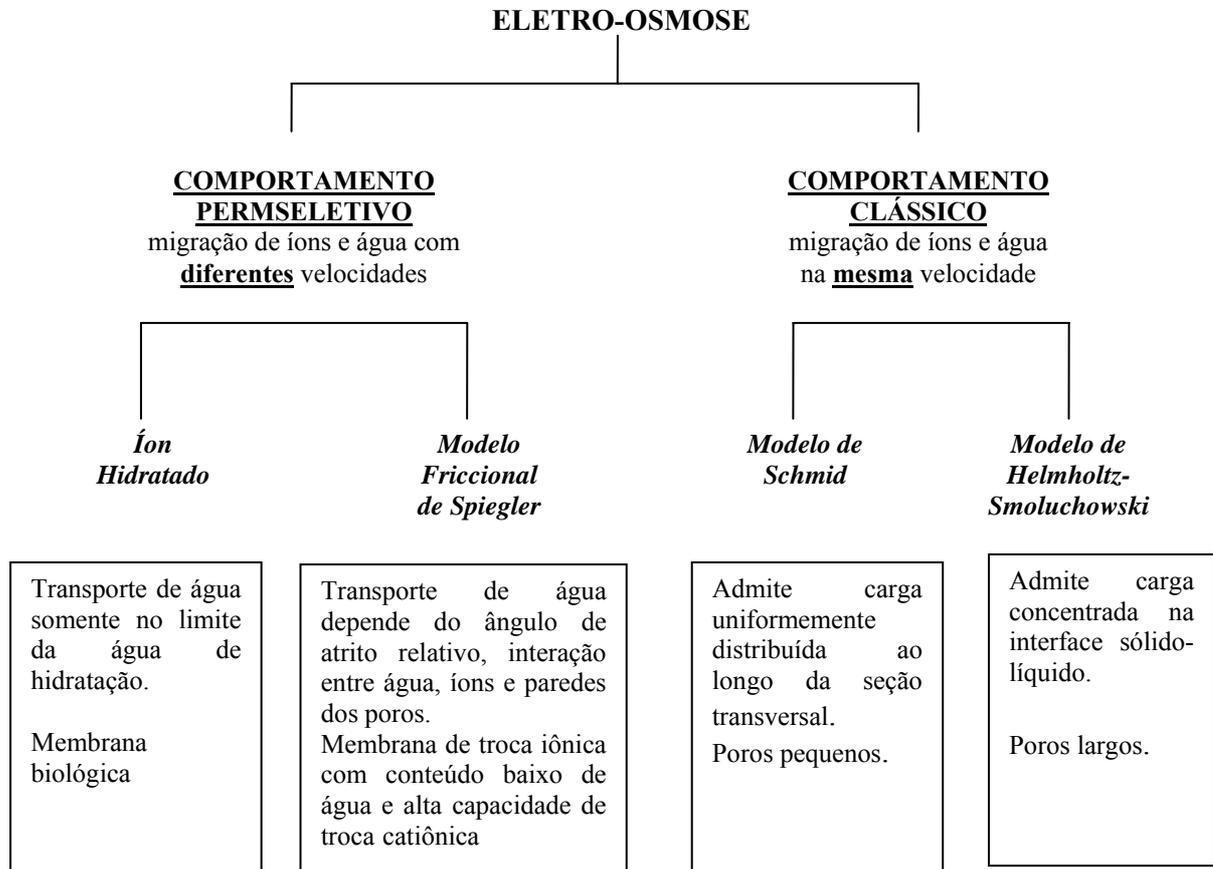


Figura 2.12 – Características e relações entre os vários modelos que descrevem eletro-osmose (Mitchell,1993)

3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1 CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA

Utilizou-se, nesta pesquisa, a célula eletro-osmótica prevista por Nascimento (2005), para desenvolvimento de sua tese de doutorado (Figura 3.1). Esse equipamento visa avaliar a capacidade do geossintético eletrocinético adaptado (EKG_{adap}), direcionado à consolidação. A célula foi projetada para analisar e otimizar parâmetros utilizados no processo de eletro-osmose para consolidação de argilas moles, permitindo avaliar os vários tipos de eletrodos utilizados no processo; o limite de intensidade de corrente que movimenta os íons da água livre resultando em uma boa eficiência eletro-osmótica; a determinação de como a concentração de sal na água e a mudança no pH do solo aceleram o processo de consolidação; além de simular alguns valores de cargas a serem aplicadas com o pistão para avaliar até que ponto isto ajudará no processo de consolidação.

O equipamento é similar ao usado por Abiera *et al.* (1998) na consolidação da argila reconstituída de Ariake – Japão e Dinoy (1999) com argila reconstituída de Bangkok – Tailândia, citados por Bergado *et al.* (2000). Foi produzido com material acrílico de 12 mm de espessura em formato cilíndrico de 280 mm de diâmetro interno e 450 mm de altura. O mesmo contém uma tampa também de acrílico com dois furos, de 30 mm de comprimento por 10 mm de largura, espaçados de 200 mm de distância entre os centros, para facilitar a instalação dos EKG_{adap} (drenos de 20 mm de comprimento e 5 mm de largura e 500 mm de altura), os quais simulam as condições de campo (drenos de 100 mm distanciados de 1000 mm). O acrílico foi escolhido por ser um material inerte que não interfere nos resultados que dependem do circuito elétrico contido no ensaio.

A aplicação da carga vertical no topo da tampa é feita através de um macaco hidráulico sobre a mesma, o qual com um pórtico de reação reverte a carga para a célula. O monitoramento da carga aplicada foi acompanhado por meio de uma célula de carga colocada acima do pistão do macaco, entre este e o pórtico de reação. Três extensômetros analógicos foram postos sobre a tampa monitorando recalques durante a reconstituição da amostra de solo mole, bem como, durante o processo de consolidação.

Os EKG_{adap} instalados são conectados a uma fonte de energia regulável e estabilizada de marca Power Supply modelo EMG 18134, com capacidade de fornecer uma diferença de

potencial de até 30 V e corrente de até 10 A. As medidas de voltagem e amperagem do circuito são lidas na própria fonte e conferidas através de um multímetro.

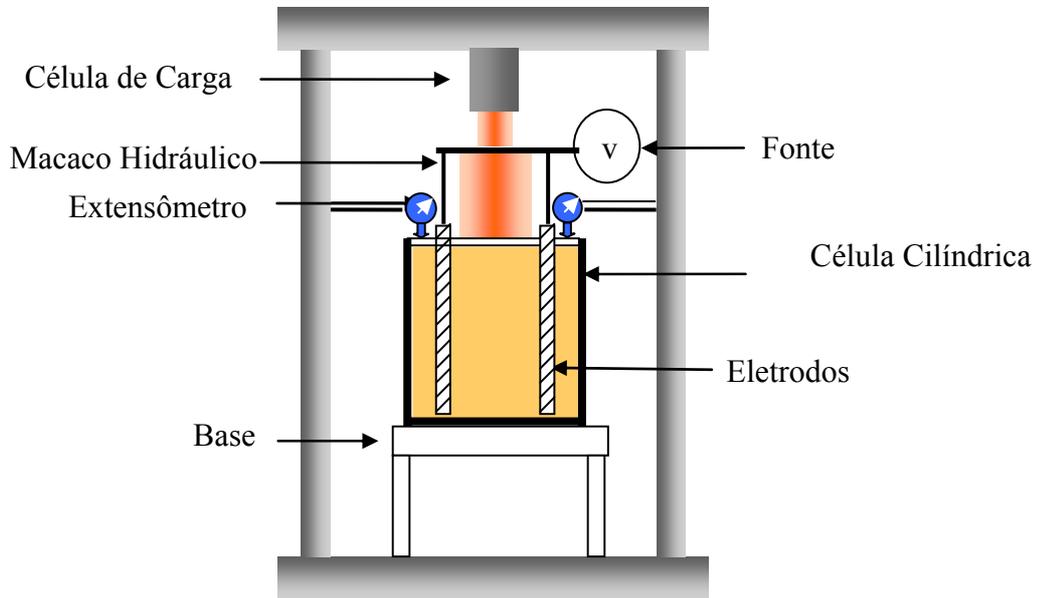


Figura 3.1 – Esquema da célula eletro-osmótica (Nascimento, 2005)



Figura 3.2 – Célula eletro-osmótica



Figura 3.3 – Fonte de alimentação elétrica

3.2 GEOSINTÉTICO ELETRO CINÉTICO ADAPTADO (EKG_{adap})

Aproveitando-se da combinação das vantagens dos geossintéticos com os fenômenos eletrocinéticos, como custo, estrutura, funções de geossintético e polaridade reversa, resolveu-se confeccionar um geossintético eletrocinético adaptado para permitir a adequação dos parâmetros de campo ao ensaio de laboratório.

Utilizou-se o geossintético eletro cinético (EKG) adaptado de 20 mm de comprimento, 5 mm de largura e 500 mm de altura, como mostra a Figura 3.4.. Usou-se o geodreno ESTEDRAIN, cortado para formar o EKG_{adap}, com a função de drenagem e filtração e anexado ao mesmo, um cabo contendo sete fios de cobre de 4mm² de diâmetro cuja função é acelerar e direcionar o fluxo horizontal para o geossintético específico, formando o geossintético eletrocinético adaptado (EKG_{adap}).

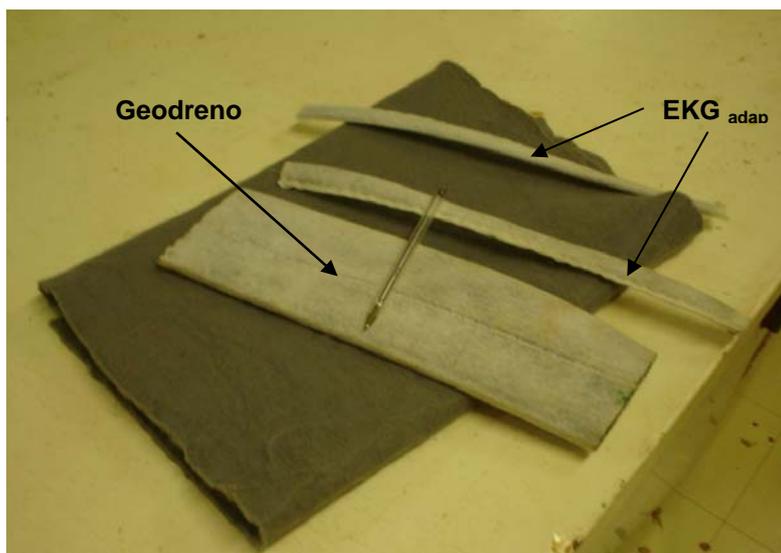


Figura 3.4 – EKG adaptado de 20 mm de largura

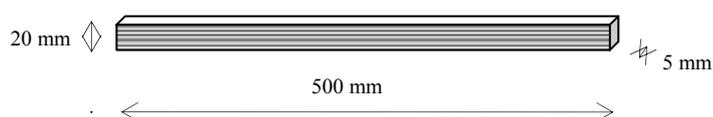


Figura 3.5 – Esquema do EKG_{adap}

3.3 SOLO ARGILOSO

O solo utilizado nos ensaios foi retirado de uma escavação na Estrutural, no aterro do Jóquei Clube. O ensaio de granulometria foi realizado com o granulômetro a laser, com o uso de ultra-som e mostrou que o solo apresenta proporções de 0,3%, 13,7%, 46,2 % e 39,8% de pedregulho, areia, silte e argila respectivamente.

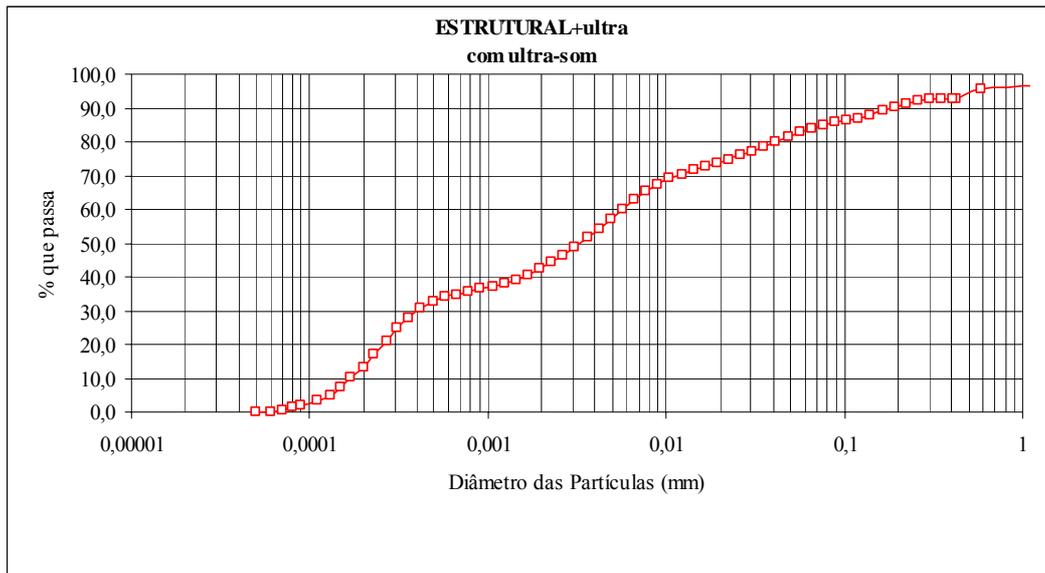


Figura 3.6 – Granulometria a laser com ultra-som.

Os resultados dos ensaios de caracterização física e química encontram-se na Tabela 3.1

Tabela 3-1 – Propriedades do solo argiloso

Limite de Liquidez (w_L)	39 %
Limite de Plasticidade (w_P)	31 %
Índice de Plasticidade (IP)	8%
Índice de Atividade (I_a)	0,15
Densidade Relativa dos Grãos (G_s)	2,72
pH (em H ₂ O)	6,8
C.T.C.	5,97 cmol/kg
Condutividade (σ_e)	36,6 μ Si/cm

O pH do solo encontrado é elevado, provavelmente por contaminação na área onde foi coletado. A condutividade elétrica do solo foi medida com condutímetro, com o solo misturado em água destilada na proporção correspondente ao limite de liquidez do solo (cerca de 40%) e temperatura ambiente de 25,9°C. A temperatura no momento do ensaio é medida por recomendação do manual do condutímetro.

Com a adição de sal, a condutividade deve aumentar gradativamente conforme a quantidade adicionada à água. Esta pesquisa realizou ensaios com água tratada (para simular a condição de campo) misturada com sal na proporção de 33g/l (proporção da água do mar).

Segundo Skempton (1953), a argila presente no solo é considerada normal quando seu índice de atividade situa-se entre 0,75 e 1,25. O solo utilizado nesta pesquisa é considerado de baixa atividade, pois seu índice de atividade (I_a) é igual a 0,15, conforme cálculo recomendado pela EMBRAPA

3.4 CÉLULA DE CARGA

Utilizou-se uma célula de carga TF200, de compressão e com as seguintes características: escala nominal (EN): 1000 kgf sensibilidade: 1 676 mV/V, erro global (Linearidade, repetibilidade e histerese) <0,1% EN e um indicador digital modelo IT100 com precisão melhor que 0,1% +/- 1 dígito como pode ser visto nas Figuras 3.7e 3.8 e na Tabela 3.2.

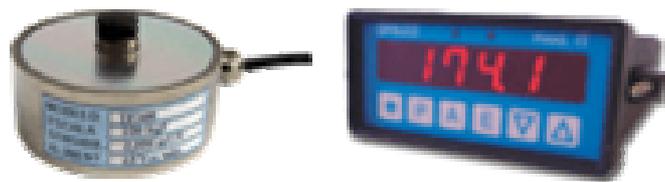


Figura 3.7 – Célula de carga TF200 e indicador digital IT100

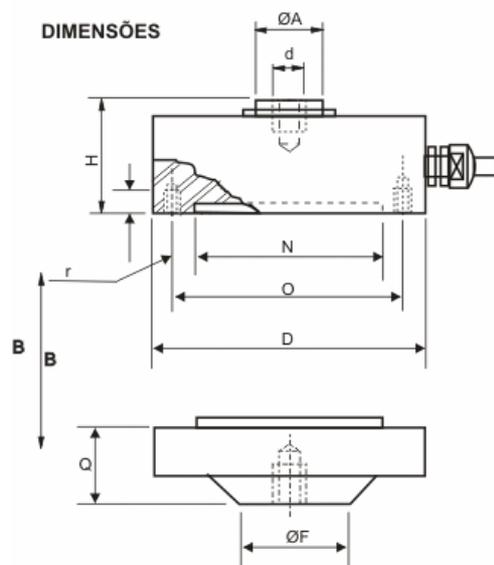


Figura 3.8 – Dimensões da célula de carga

Tabela 3.2 – Dimensões da célula de carga

EN (kgf)	ϕA	B	ϕD	ϕF	H	N	O	Q	d	r
1000	12	9	61	20	28	44	52	18	M8	M5(4x)

A curva de calibração da célula é mostrada nos anexos deste trabalho.

3.5 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

As medidas da resistência ao cisalhamento do solo, antes e depois da aplicação da eletro-osmose, foram feitas com o uso de um Vane test de laboratório seguindo a norma ASTM D4648-00. Os componentes básicos do equipamento estão mostrados na Figura 3.9 e são descritos a seguir:

- Corpo do equipamento formado por partes metálicas aparafusadas entre si, onde estão fixados o sistema de acoplamento das palhetas e haste, a manivela e a base da aparelhagem;



Figura 3.9– Vane test de laboratório

- Sistema de acoplamento das palhetas e haste, que permite a movimentação vertical, pela rotação de uma manivela. No sistema é colocada a mola que será utilizada nos

ensaios e, na parte inferior, são fixas a haste e a palheta. Lê-se a superfície de ruptura através de uma escala graduada existente no topo do sistema;

- Jogo de molas e hastes com palhetas distintas. Usou-se neste ensaio a mola de número 01 e uma palheta de 30 mm de altura por 15 mm de diâmetro, ou seja, $H/D = 2$;



Figura 3.10 – Mola e haste utilizadas no ensaio.

- Escala de leitura de deformações no topo do sistema já descrito anteriormente, cuja graduação é em graus. O sistema é composto por dois ponteiros que ficam juntos entre si até que se alcance a deformação correspondente ao torque máximo.

4 METODOLOGIA DE ENSAIOS

Esta pesquisa, contou com ensaios em laboratório realizados na célula eletro-osmótica, a fim de superar dificuldades encontradas em pesquisas anteriores na otimização dos parâmetros no processo de eletro-osmose.

Estes ensaios consistiram na aplicação de sobrecarga e instalação de drenos condutores elétricos em recipiente experimental contendo argila do Distrito Federal com consistência mole. O efeito eletro-osmótico foi investigado pelo uso de geossintéticos electrocinéticos adaptados (EKG_{adap}). A aceleração da consolidação pelo processo de eletro-osmose é analisada através de comparação dos resultados obtidos. Foram realizados, ensaios pilotos utilizando apenas os geodrenos. Estes têm o mesmo carregamento, tempo para consolidação e concentração eletrolítica do solo, que os ensaios com EKG_{adap}. Conseqüentemente, é possível comparar os ensaios pilotos com os ensaios eletro-osmóticos. Ao final, fez-se uma comparação entre os ensaios eletro-osmóticos para otimização de suas variáveis.

Para otimizar as variáveis contidas no ensaio de consolidação por eletro-osmose, em termos de custo - benefício, foi realizado o seguinte planejamento:

1. Carga aplicada: 50 kPa, 100kPa;
2. Diferença de Potencial: 5V (25V/m), 10 V (50 V/m), 15V(75V/m) e 25V(125V/m);
3. Eletrodos: Cobre;
5. Concentração salina: 33 g/l (concentração da água do mar);

4.1 PREPARAÇÃO DA AMOSTRA DE SOLO

Com o conhecimento dos índices de consistência da argila, conforme mostrado na Tabela 3.1, foi possível preparar o solo mole. A amostra de solo utilizada era deformada, sendo coletada na Estrutural, e reconstituída em laboratório. Como se pretendia trabalhar com uma argila de consistência mole sua umidade foi mantida sempre acima do limite de liquidez.

O procedimento utilizado para a preparação das amostras foi o seguinte:

- a. Determinou-se a umidade higroscópica da argila;

- b. Destorroou-se e peneirou-se a argila na # 10, para retirada de partículas maiores que 2 mm,
- c. Aplicou-se silicone líquido para reduzir o atrito nas regiões de contato da célula com a amostra.
- d. Depositou-se a argila em uma bandeja, acrescentando-se água tratada, com NaCl ou sem o sal, conforme o ensaio, até que a umidade ficasse maior que o Limite de Liquidez (w_L); A quantidade de água adicionada foi calculada baseando-se na Equação 4.1 de umidade;

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Onde: w = umidade em porcentagem (acima do w_L);

W_w = peso da água no solo;

W_s = peso do solo seco.

e. Homogeneizou-se a amostra, fazendo-se uma medida de umidade para comprovar se a mesma estava acima do w_L (52 % de umidade em média); Optou-se por este valor de umidade pelo fato do ensaio ser influenciado pela saturação da amostra, conforme Schmidt (2004), que o processo tende a ser mais eficaz à medida que se aumenta a saturação do solo e para se manter a umidade da amostra sempre maior que o limite de liquidez. Os ensaios com a carga de 50 kPa foram realizados com a umidade de 52% e os ensaios com a carga de 100 kPa com a umidade de 55%, porque quando estes foram realizados a época de umidade baixa no DF já havia começado.

A seqüência de preparação da amostra pode ser vista na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Seqüência de preparação da amostra.

- f. Preencheu-se a célula com este solo homogeneizado.
- g. Deixou-se descansar por 24 horas. A altura escolhida da amostra foi de 32 cm para que se pudesse instalar, sem problemas, o conjunto macaco hidráulico e extensômetros;
- h. Realizou-se a medição da resistência inicial com o Vane test;
- i. Fechou-se a célula, verificando-se o nivelamento da mesma, com um nível de bolha;
- j. Instalaram-se os geossintéticos eletrocinéticos adaptados (EKG_{adap});
- k. Instalou-se o macaco hidráulico e a célula de carga;



Figura 4.2 – Instalação do macaco hidráulico e da célula de carga

- l. Instalaram-se os extensômetros, verificando a verticalidade dos mesmos. Foram instalados dois extensômetros no primeiro ensaio e, a partir do segundo ensaio, optou-se por três extensômetros para monitorar os recalques da amostra. Realizou-se a leitura da altura inicial dos extensômetros;
- m. Ligaram-se os conectores e aplicou-se a carga lentamente, sendo que após a aplicação monitorou-se o valor da carga;



Figura 4.3 – Conectores ligados à fonte

n. Ligou-se a fonte de alimentação elétrica, monitorando-se a diferença de potencial e a corrente aplicada através da mesma;

o. Realizaram-se leituras no extensômetros e multímetro observando-se um intervalo de trinta minutos entre as leituras (até que se completassem duas horas de ensaio) e a partir daí as leituras passaram a ser realizadas com intervalo de uma hora entre as mesmas, sendo que estas foram realizadas até que se estabilizassem.

p. Após a estabilização retirou-se a tampa do equipamento e procedeu-se a medição da resistência ao cisalhamento do solo final através do Vane test de laboratório.

Optou-se por utilizar sal de cozinha (NaCl), pelo fato do custo ser vinte vezes menor que o sal marinho e os resultados, segundo Nascimento (2005), estarem próximos aos obtidos com este sal. A diferença entre os dois sais é que o sal de cozinha contém a adição de Iodato de Potássio exigido pela legislação brasileira, para prevenir o bócio, uma doença que ocorre na tireóide em função da diminuição ou ausência de iodo no organismo. A quantidade adicionada à água foi de 33 g/l para simular a água do mar e tentar aumentar a condutividade do solo e comparar os resultados aos obtidos sem a adição de NaCl à água.

Por questões de custo e tempo para a obtenção de material, optou-se por utilizar eletrodos de cobre, sendo estes cabos de 4 mm de diâmetro. Após o rompimento do ânodo em um dos ensaios de 50kPa, resolveu-se aumentar o diâmetro do eletrodo pra 6 mm.

No ensaio aplicou-se a corrente elétrica de um eletrodo a outro, percebendo-se que a água contida no solo iniciou a migração do eletrodo positivo (ânodo) para o eletrodo negativo (cátodo). Isto é devido ao fato de as partículas do solo argiloso possuírem carga negativa conforme explicado no Capítulo 2. Ao aplicar-se a diferença de potencial, ocorre a eletrólise da água a qual pode ser observada pela formação de bolhas no cátodo devido à saída de gás hidrogênio. As reações citadas por Acar *et al* (1995) mostram o processo de eletrólise da água conforme as equações 4.2 ocorrida no ânodo e 4.3 ocorrida no cátodo.



Nos ensaios foram utilizados circuitos elétricos básicos que obedecem a Lei de Ohm, a qual indica que a tensão é diretamente proporcional a corrente e existe uma constante que

dificulta a passagem desta corrente elétrica, que é chamada de resistência elétrica (R). A Equação 4.4 mostra a formulação da Lei de Ohm.

$$V = R \cdot i \quad (4.4)$$

Onde:

V = diferença de potencial elétrico (Volt);

R = resistência elétrica (ohm);

i = corrente elétrica (Ampere).

4.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DO SOLO

A metodologia e execução do ensaio de Vane test seguiram os preceitos da norma ASTM-D 4648/00. A amostra foi ensaiada antes e depois da aplicação de eletro-osmose para se avaliar o aumento da resistência não-drenada (S_u) com a aplicação da técnica.

Após isso, começava-se a fase de cisalhamento do ensaio, marcando-se na escala de leitura o torque máximo medido na fase de cisalhamento. Os resultados de resistência ao cisalhamento, inicial e final, foram obtidos através dos gráficos de calibração obtidos no Departamento de Estruturas.

O aparelho era colocado dentro da célula eletro-osmótica, anotando-se a leitura inicial e girando-se a manivela, na velocidade de 6°/ min até que fosse obtida a leitura final, ou seja, quando o ponteiro do leitor não se movesse mais apesar de se girar a manivela. Utilizando-se a manivela procedia-se à cravação da palheta no solo, numa profundidade média de 5 cm.

Os resultados do Vane test inicial das amostras de 50 kPa foram realizados três vezes quando a amostra foi colocada na célula e foram iguais para todos os ensaios desta carga. As alterações ocorreram após a aplicação de EO.

Para a carga de 100 kPa, o procedimento foi exatamente o mesmo. Os resultados obtidos no começo do ensaio foram iguais aos obtidos na amostra de 50 kPa. Vale ressaltar que o Vane test inicial é feito sem a aplicação de sobrecarga e antes da célula ser fechada.



Figura 4. 4 – Determinação da resistência ao cisalhamento do solo

Usando as equações 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 e 2.9 foi possível calcular a condutividade elétrica do solo (σ_e), a condutividade elétrica aparente (κ_a), o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e), a eficiência eletro-osmótica (κ_i) e o consumo de energia elétrica (P_u) em cada ensaio, como será mostrado no capítulo seguinte.

4.3 DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram numerados de 01 a 12, sendo que os ensaios de 01 a 06 foram realizados com a carga de 50 kPa e os ensaios de 07 a 12 com a carga de 100 kPa. Além disso, os ensaios 02 e 07 foram realizados sem EO, com o uso dos EKG_{adap}, sem o eletrodo para que se pudessem comparar os resultados obtidos com o uso da técnica. Também foram feitos ensaios sem a adição de NaCl, para avaliar se a técnica era viável neste caso. Segue abaixo, uma descrição sumário dos ensaios, que serão mostrados no capítulo 5.

4.3.1 ENSAIO 01

O ensaio piloto, denominado ENSAIO 01, ocorreu entre os dias 18/03/07 e 19/03/07. A amostra de solo foi preparada em camadas de 3 kg de solo, até que se completassem os 18 kg inicialmente estimados para o ensaio. Após isso, fez-se a leitura da resistência inicial da amostra, S_u inicial = 1,82 kPa. Esta leitura foi realizada três vezes para se obter uma média dos valores obtidos para encontrar a resistência não drenada inicial. A célula foi fechada depois de 24 horas em repouso; colocaram-se os EKG_{adap}; instalou-se o macaco hidráulico e os dois extensômetros, além de conectar os eletrodos à fonte de alimentação. O ensaio foi realizado com solo com umidade inicial média de 52 %; as leituras dos extensômetros foram realizadas de duas em duas horas e aplicação de carga a cada minuto começando em 5 kPa até chegar em 50 kPa, (5 kPa por minuto), sendo a primeira leitura realizada antes da aplicação da carga. Ao final, procedeu-se a determinação da resistência final da amostra.

4.3.2 ENSAIO 02

Este ensaio também foi preparado com 18 kg de solo em uma umidade correspondente a 52%. A amostra foi preparada da mesma forma que o ensaio anterior. Aumentou-se a quantidade de extensômetros para três, a fim de se obter maior confiabilidade nos recalques medidos. Instalou-se o conjunto macaco hidráulico e célula de carga e os extensômetros. Ligaram-se os eletrodos e iniciou-se o ensaio.

Este ensaio foi realizado em 03/04/07, sem o uso de eletro-osmose e com a adição de NaCl, com a carga de 50 kPa, com o uso dos EKG_{adap} sem o eletrodo, para comparação com os ensaios com EO. Este durou cerca de 29 horas. Apesar de se nivelar a tampa da célula ainda ocorreu, quando do carregamento um recalque maior em um dos lados da tampa. Estes recalques desiguais são esperados uma vez que a drenagem está ocorrendo desigualmente nos EKG_{adap} e não há inversão de polaridade.

4.3.3 ENSAIO 03

O ensaio 03 foi realizado em 18/04/2007, com a adição de NaCl à água na proporção de 33 g/l. A carga aplicada foi de 50 kPa e a diferença de potencial foi de 5 V. O ensaio montado pode ser visto na Figura 4.5. Pode-se observar que esta configuração ainda não era a ideal

para a realização do ensaio, pois se fazia necessária a utilização de pesos para que se estabilizasse o macaco hidráulico. Resolveu-se aumentar a quantidade de solo utilizada de 18 kg para 24 kg para melhor visualização dos extensômetros.



Figura 4.5 – Vista geral do ensaio montado

Ao final deste ensaio, um dos extensômetros apresentava-se corroído e, por este motivo, resolveu-se colocar os extensômetros acima do nível de água num anteparo colocado entre a tampa e o macaco hidráulico. Este anteparo consistiu de pesos de metal colocados de maneira que a água extraída pela consolidação não ficasse em contato com os extensômetros. O incremento do peso do anteparo foi descontado no momento da aplicação da carga. Também foi adquirido um macaco hidráulico de capacidade de 2 tf, para facilitar a realização dos ensaios.

4.3.4 ENSAIO 04

Este ensaio foi realizado em 24/04/07, com carga de 50 kPa e diferença de potencial de 10 V, obedecendo às mesmas orientações já apresentadas, usando desta vez o novo macaco hidráulico conforme se observa na Figura 4.6 colocado sobre o anteparo já descrito anteriormente.



Figura 4.6– Macaco hidráulico com capacidade de 2 tf, sobre anteparo na célula eletro-osmótica.

4.3.5 ENSAIO 05

Este ensaio começou a ser realizado em 09/05/07. A carga utilizada para a consolidação da amostra era de 50 kPa e a voltagem de 15 V, com umidade de 52% e água contendo NaCl. A fonte foi desligada às 09h40min do dia 10/05/07 porque o ânodo se rompeu, como pode ser visto na Figura 4.7.



Figura 4.7– Ânodo rompido

4.3.6 ENSAIO 06

Este ensaio começou a ser realizado em 13/05/07 com a preparação da amostra, sendo a fonte ligada no dia seguinte com voltagem de 25 V e carga aplicada de 50 kPa. O diâmetro do eletrodo foi aumentado para 6 mm devido ao rompimento do mesmo no ensaio anterior.



Figura 4.8 – Detalhe da quantidade de água retirada no ensaio

Pode-se observar na Figura 4.8 que a quantidade de água retirada durante a consolidação é grande e, para se evitar qualquer corrosão, a mesma era bombeada para um balde com uma bomba de sucção manual.

4.3.7 ENSAIO 07

Este ensaio foi realizado em 12/04/07, sem eletro-osmose, com a carga de 100 kPa com a adição de NaCl e com os EKG_{adap} sem eletrodo. Este ensaio será comparado aos ensaios com eletro-osmose para avaliar a aceleração de consolidação e aumento de recalques.

4.3.8 ENSAIO 08

Este ensaio começou a ser realizado em 18/05/07 com a preparação da mostra sem NaCl. Foi feito com a aplicação de uma diferença de potencial de 10 V a uma carga aplicada de 100 kPa. A duração deste ensaio foi de 28 horas (até as 15:00 de 20/05/07) quando ocorreu a estabilização dos extensômetros. A duração deste ensaio foi de 28 horas (até as 15:00 de 20/05/07) quando ocorreu a estabilização dos extensômetros.

Os valores de corrente eram muito baixos, da ordem de miliamperes (mA), sendo lidos com o uso de um multímetro marca Minipa modelo ET-1001

4.3.9 ENSAIO 09

Este ensaio começou a ser realizado em 22/05/07 com a preparação da amostra e no dia seguinte com a aplicação de voltagem de 5 V a uma carga aplicada de 100 kPa. A duração deste ensaio foi de 30 horas quando ocorreu a estabilização dos extensômetros.

4.3.10 ENSAIO 10

A amostra foi preparada em 25/05/07 e o ensaio começou no dia seguinte. Neste ensaio a voltagem aplicada foi de 10 V sendo que a carga aplicada na consolidação foi 100 kPa. Ocorreu o rompimento do ânodo.

4.3.11 ENSAIO 11

Este ensaio foi realizado em 28/05/07 quando a fonte foi ligada. A carga aplicada foi de 100 kPa e a voltagem de 15 V. A duração foi de 23 horas e trinta minutos. Novamente ocorreu o rompimento do ânodo.

4.3.12 ENSAIO 12

Este ensaio foi realizado em 30/05/07 quando a fonte foi ligada. A carga aplicada foi de 100 kPa e a voltagem de 25 V. A duração foi de 7 horas e trinta minutos. Observa-se que a corrente decresce na primeira hora e meia de ensaio, e após isso aumentou e decresceu para 0,07 A e a tensão caiu, além da fonte esquentar o que levou ao desligamento da mesma e encerramento do ensaio. Ao desmontar o ensaio e analisar os eletrodos, confirmou-se que o ânodo completamente desagregado.

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados com o uso do condutivímetro e os ensaios com a célula eletro-osmótica. O programa de ensaios foi dividido em seis ensaios para cada carga escolhida (50 kPa e 100 kPa), nas seguintes diferenças de potencial: 5V, 10V, 15V e 25V e com a adição de 33g/l de NaCl e sem a adição do sal.

5.1 ENSAIO DE CONDUTIVIDADE

Os ensaios com condutivímetro foram realizados para avaliar a variação de condutividade elétrica do solo argiloso, visando submetê-lo ao tratamento por eletro-osmose para a aceleração de sua consolidação. Para tal, realizaram-se vários ensaios com o uso de um condutivímetro marca Hach modelo CO 150 como pode ser visto na Figura 5.1, variando os teores de NaCl adicionados à água tratada, de tal forma que a umidade do solo estivesse em torno de seu limite de liquidez, cerca de 40 %. A maior variação de NaCl corresponde ao sal contido na água do mar. Foi monitorada, também, a variação de pH conforme era adicionado NaCl à amostra de solo-água. Os resultados obtidos no ensaio são mostrados na Tabela 5.1 e plotados nas Figuras 5.2, 5.3, e 5.4.

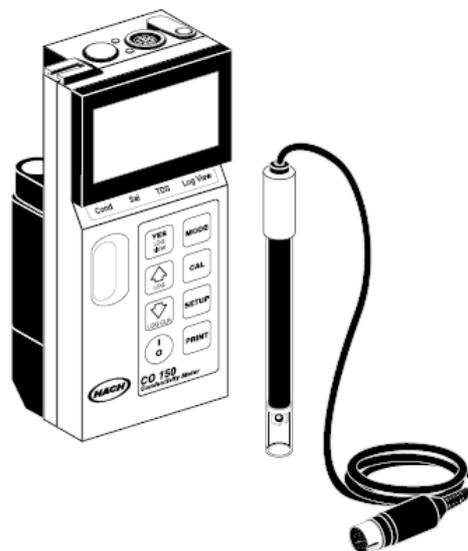


Figura 5.1 Condutivímetro Hach modelo CO150.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de condutividade

Salinidade (g/l)	σ_e (mSi.cm)	pH
0	0,0366	6,91
5	0,342	6,89
10	0,763	6,87
20	3,39	6,83
33	6,5	6,75

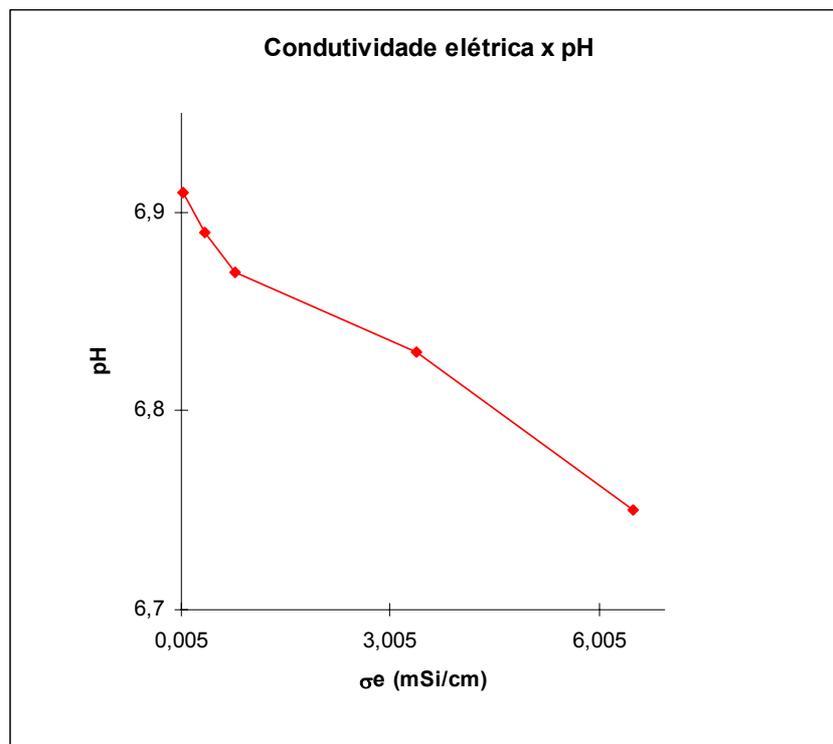


Figura 5.2 - Gráfico condutividade x pH

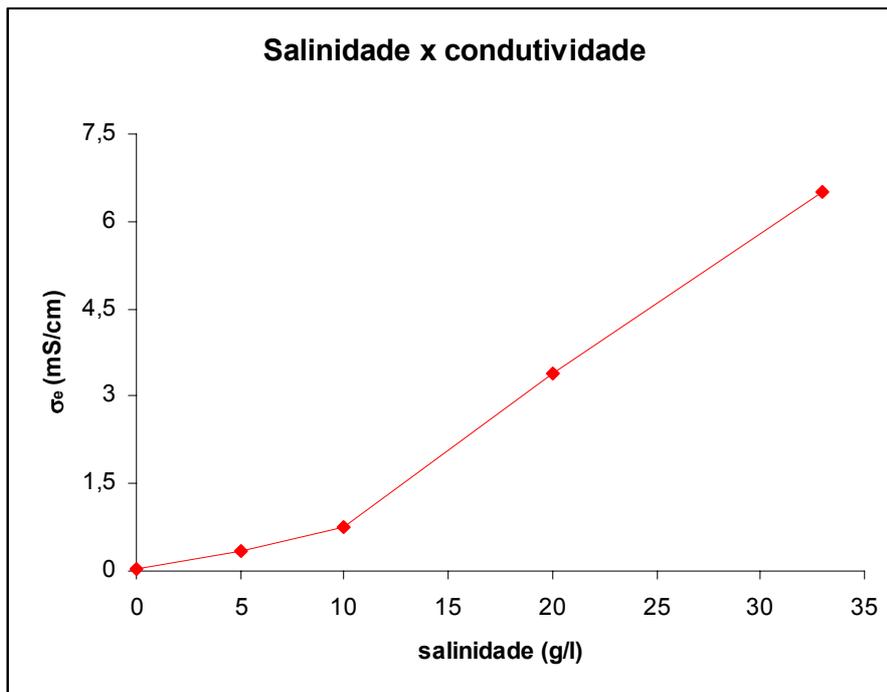


Figura 5.3 – Gráfico salinidade x condutividade

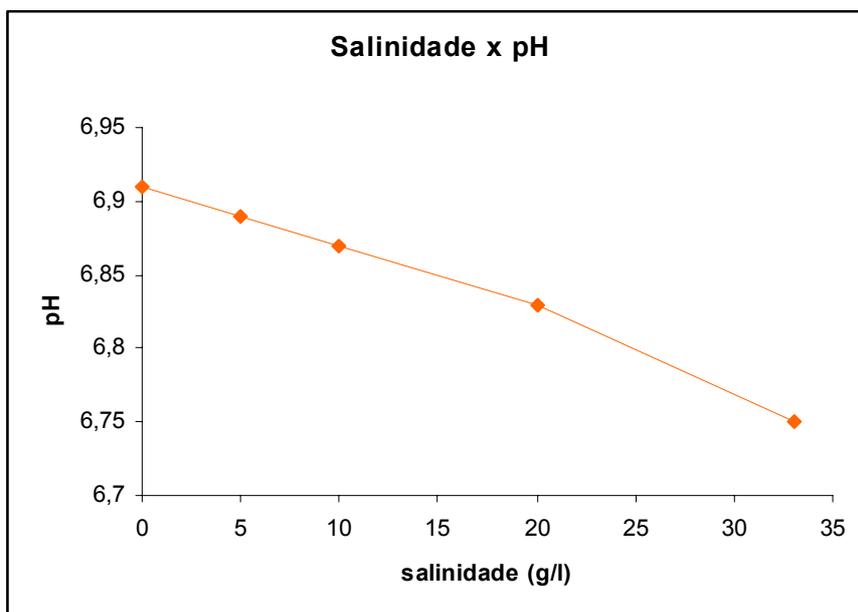


Figura 5.4 – Gráfico de salinidade x pH

Schmidt (2004) mostra que quando a condutividade elétrica aumenta ocorre uma diminuição do pH, o que é observado na Figura 5.2. Nota-se que com o aumento da salinidade ocorre aumento da condutividade do solo e decréscimo do pH. Por falta de tempo para a realização das outras variações de salinidade, optou-se por realizar com os ensaios apenas com a

quantidade de NaCl relativa à água do mar, visto que a técnica de eletro-osmose funciona melhor em solos marinhos.

5.2 ENSAIOS COM A CÉLULA ELETRO-OSMÓTICA

Os ensaios de consolidação começaram a ser realizados no mês de março/2007, com a calibração da célula de carga, realizada na prensa de CBR com a ajuda de um anel dinamométrico de 1 tf. Essa calibração foi repetida várias vezes de modo a se ter segurança quanto às medidas.

Realizou-se um ensaio piloto para o desenvolvimento de uma metodologia para otimizar a realização dos mesmos, que só foi conseguida após a realização de cerca de quatro ensaios. Algumas dificuldades foram encontradas nestes primeiros ensaios, a falta de familiaridade com o equipamento, a altura da amostra de solo na célula (que dificultava a leitura nos extensômetros), a retirada da tampa da célula eletro-osmótica (que gerou algumas dificuldades, o que nos levou a estudar formas de lubrificar as paredes da célula sem danificar os o-rings).

Os ensaios foram numerados de 01 a 12, conforme pode ser visto na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Esquema de ensaios

Ensaio	Carga (kPa)	Quant. Solo (kg)	V (V)	w inicial(%)	w final(%)	EO	NaCl	Água	
								inicial (l)	retirada (l)
01	50	18	10	52	44	sim	não	9,36	1,44
02	0	18	0	52	46	não	sim	9,36	1,08
03	50	24	5	52	32	sim	sim	12,48	4,80
04	50	24	10	52	30	sim	sim	12,48	5,28
05	50	24	15	52	30	sim	sim	12,48	5,28
06	50	24	25	52	37	sim	sim	12,48	3,60
07	100	24	0	55	41	não	sim	12,72	4,39
08	100	24	10	55	41	sim	não	12,72	4,00
09	100	24	5	55	38	sim	sim	12,72	4,79
10	100	24	10	55	36	sim	sim	12,72	4,00
11	100	24	15	55	32	sim	sim	12,72	4,03
12	100	24	25	55	36	sim	sim	12,72	4,57

5.2.1 ENSAIO 01

Os resultados obtidos neste ensaio podem ser vistos na Tabela 5.3 e os gráficos são mostrados nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.7. Apesar de se nivelar a tampa da célula ocorreu, quando do carregamento um recalque maior em um dos lados da tampa. Estes recalques desiguais são esperados uma vez que a drenagem está ocorrendo desigualmente nos EKG_{adap} e não há inversão de polaridade.

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio 01

hora	Δt (h)	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	i (mA)	V (V)
10:00	0	0	0	0	5,3	10
10:30	0,5	2,6	0,57	1,6	4,7	10
11:00	1	2,62	1,66	2,1	4,6	10
14:00	4	2,64	1,68	2,2	3,7	10
15:30	5,5	2,64	1,68	2,2	3,5	10
16:30	6,5	2,64	1,68	2,2	3,5	10
17:00	7	2,64	1,68	2,2	3,5	10

Onde: Δt = intervalo de tempo entre as leituras realizadas;

ρ_1 = recalque no extensômetro 1 (mm);

ρ_2 = recalque no extensômetro 2 (mm);

$\rho_{\text{médio}}$ = média dos recalques;

i = intensidade de corrente (A);

V = diferença de potencial (V).

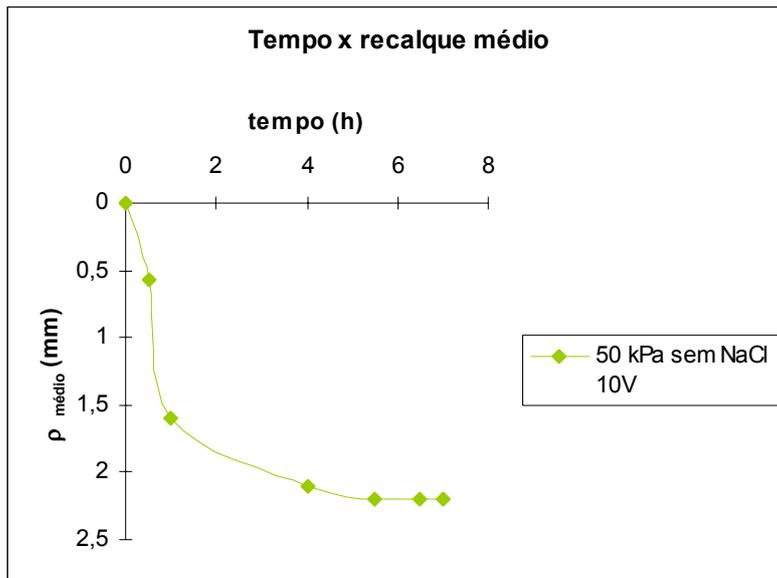


Figura 5.5 – Gráfico tempo x recalque médio do ensaio 01

Pode-se observar que no ensaio ocorreu a estabilização da consolidação a partir da quarta hora e que a corrente é maior nos primeiros momentos do ensaio, reduzindo-se posteriormente até estabilizar-se.

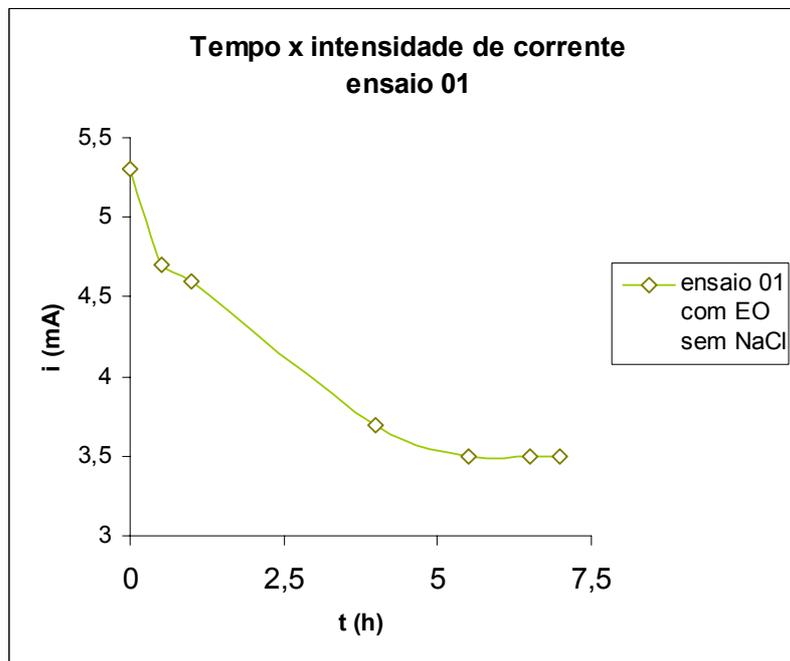


Figura 5.6 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 01

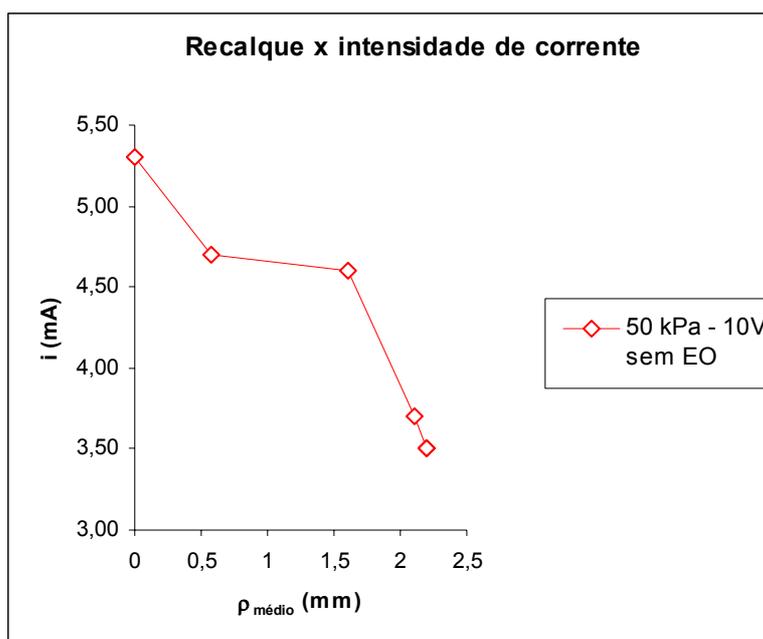


Figura 5.7 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 01

Usando-se a Lei de Ohm, chegou-se ao valor de resistência média do sistema solo-água no valor de $2,49 \Omega$ sendo que a corrente média foi a média aritmética das correntes medidas; neste ensaio igual a $4,11 \text{ mA}$ e a partir daí, calcularam-se os outros valores usando as equações já apresentadas no capítulo 2.

Os resultados obtidos quanto aos parâmetros eletro-osmóticos são mostrados na Tabela 5.4:

Tabela 5.4 _ Parâmetros obtidos no ensaio 01

Grandeza		Unidade
Resistência (R)	2494,64	Ω
condutividade elétrica do solo (σ_e)	18,22	$\mu\text{Si/cm}$
corrente elétrica (i)	4,11	mA
condutividade elétrica aparente (κ_a)	18,70	$\mu\text{Si/cm}$
coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	1,93E-08	$\text{m}^2/\text{V.s}$
eficiência eletro-osmótica (κ_i)	0,0011	cm/A.s
Consumo de energia elétrica / volume de solo (1 m^3)	0,0166976	kWh/m ³
Custo da eletro-osmose	0,005	R\$/m ³
Quantidade de água retirada	0,0008	m ³

A resistência não drenada inicial medida pelo Vane test foi igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final, de 1,94 kPa, correspondendo a um aumento de 6,6% em relação à resistência inicial.

O custo foi calculado com base na tarifa da CEB (Companhia Energética de Brasília), por meio da metodologia do site www.ceb.com.br, em planilha a ser mostrada nos anexos deste trabalho, onde 1 kWh vale R\$ 0,3083639 para o nível B3 (Comercial/Industrial) até 200 kWh. O cálculo foi feito da seguinte forma: multiplicou-se o consumo encontrado de energia elétrica por volume de solo pela quantidade de horas de duração do ensaio. Após isso, realizou-se o produto entre o valor encontrado e a tarifa fornecida pela CEB.

5.2.2 ENSAIO 02

As tabelas e gráficos do ensaio 02 serão mostrados a seguir, através da Tabela 5.5 e da Figura 5.8. Vale observar que este ensaio corresponde à carga de 50 kPa, com água com NaCl na proporção de 33 g/l para ficar equivalente a água do mar, sem a aplicação de eletro-osmose (EO).

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio 02

Hora	Δt (h)	ρ 1 (mm)	ρ 2 (mm)	ρ 3 (mm)	ρ média (mm)
11:30	0	0	0	0	0
12:00	0,5	5,36	4,4	3,12	3,8
12:30	1	9,65	7,05	5,77	6,4
13:00	1,5	10,98	7,47	7,3	7,4
13:30	2	13	7,49	9,12	8,3
14:00	2,5	13,94	7,55	10,07	8,8
15:00	3,5	15,52	8,19	12,19	10,2
16:00	4,5	16,16	9,1	13,1	11,1
17:00	5,5	17,2	10,14	14,44	12,3
09:00	21,5	17,3	10,24	15,24	12,7
10:00	22,5	16,03	11,02	15,97	13,5
11:00	23,5	17,58	12,22	16,72	14,5
12:00	24,5	19,03	13,26	16,79	15,0
13:00	25,5	19,18	13,53	17,05	15,3
14:00	26,5	19,23	13,62	17,16	15,4
15:00	27,5	19,43	13,97	17,54	15,8
16:00	28,5	19,43	13,97	17,54	15,8

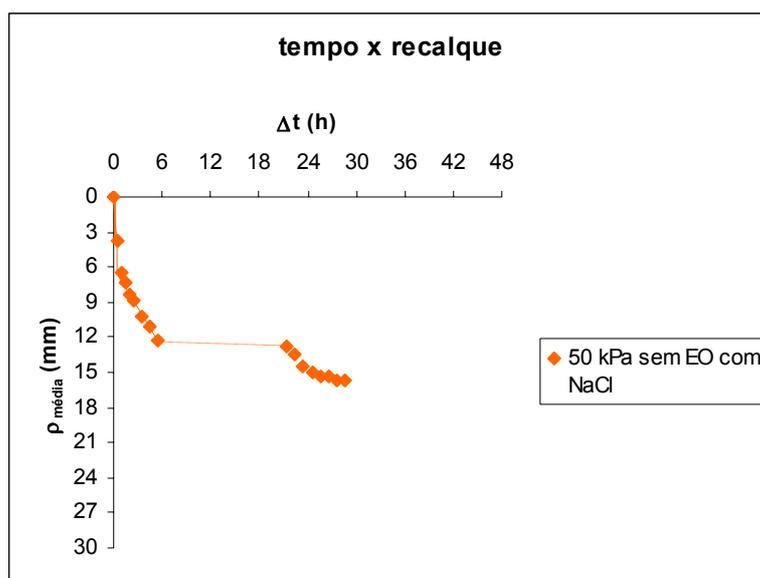


Figura 5.8– Gráfico recalque x tempo do ensaio 02

Este ensaio levou 28 horas e 30 minutos para estabilização completa dos extensômetros. A quantidade de água retirada pela consolidação foi $0,0059 \text{ m}^3$. Este valor foi obtido através da Equação 4.1 para o cálculo do peso da água no solo (W_w) para a umidade final e inicial e a diferença entre o peso inicial e final da água.

A resistência não drenada inicial medida pelo Vane test é igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final é de 1,94 kPa, correspondendo a um aumento de 6,6% em relação a resistência inicial.

5.2.3 ENSAIO 03

Os resultados obtidos neste ensaio são mostrados nas Tabelas 5.6 e 5.7 e nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.13.

Considerando que a diferença de potencial utilizada neste ensaio era pequena, 5 V, a variação de corrente observada não foi alta e a corrosão observada no ânodo foi quase que desprezível, em relação aos outros ensaios.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio 03

hora	$\Delta t(h)$	$\rho_1(mm)$	$\rho_2(mm)$	$\rho_3(mm)$	$\rho_{m\u00e9dio}(mm)$	V (V)	i (A)
10:45	0	0	0	0	0	5	1,09
11:15	0,5	6,63	6,16	4,15	5,6	5	1,08
11:45	1	8,4	6,67	5,83	7,0	5	1,18
12:15	1,5	8,67	8,15	7,07	8,0	5	1,22
12:45	2	11,05	9,53	8,44	9,7	5	1,21
13:45	3	12,18	11,99	9,85	11,3	5	1,36
14:45	4	13,61	12,42	10,3	12,1	5	1,45
15:45	5	14,39	13,16	11,05	12,9	5	1,23
16:45	6	15,37	14,12	12,03	13,8	5	1,09
17:45	5	16,22	14,95	13,87	15,0	5	1,09
08:45	22	18,26	17,02	16,02	17,1	5	1,07
09:45	23	19,53	18,37	16,32	18,1	5	1,06
10:45	24	19,76	18,63	17,56	18,7	5	1,04
11:45	25	19,77	18,63	17,57	18,7	5	1,04
12:45	26	19,77	18,63	17,59	18,7	5	1,04
13:45	27	19,77	18,63	17,59	18,7	5	1,04

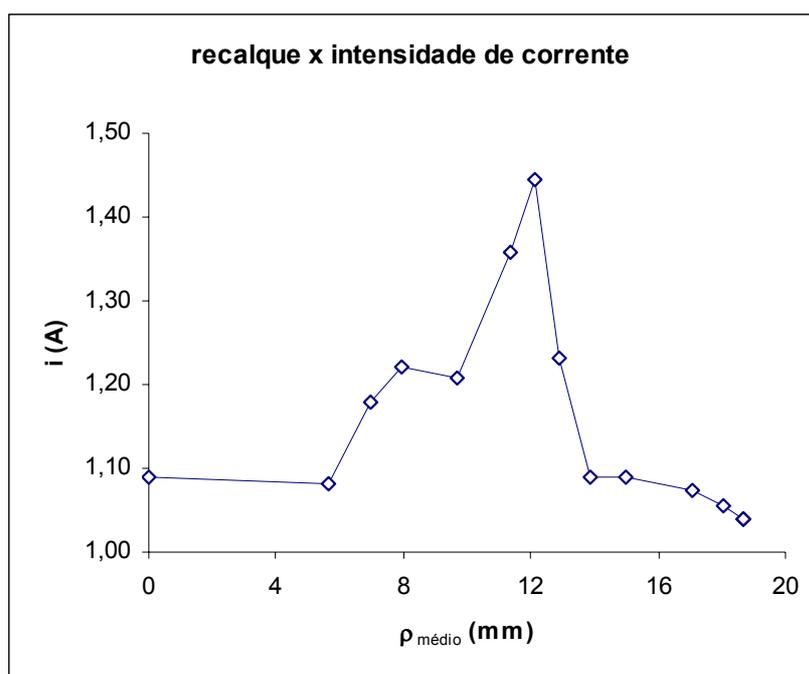


Figura 5.9 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 03

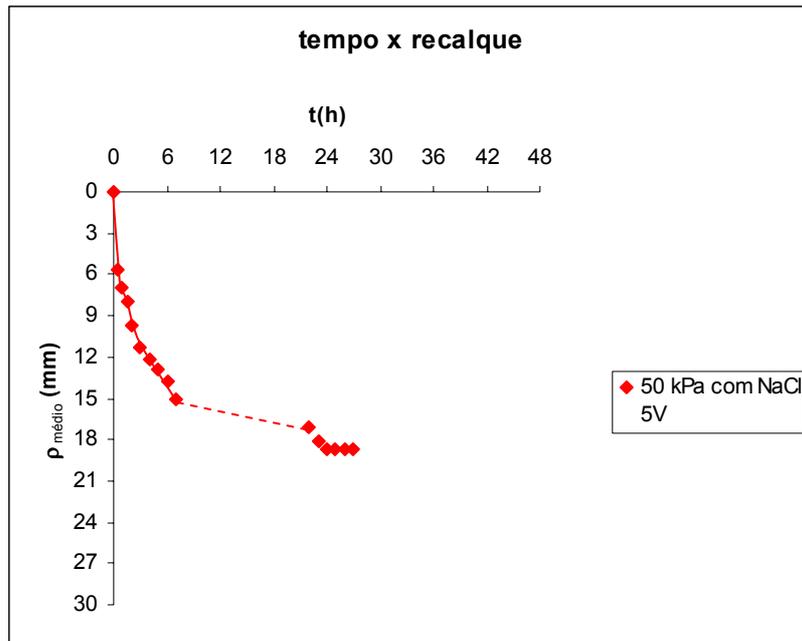


Figura 5.10– Gráfico tempo x recalque do ensaio 03

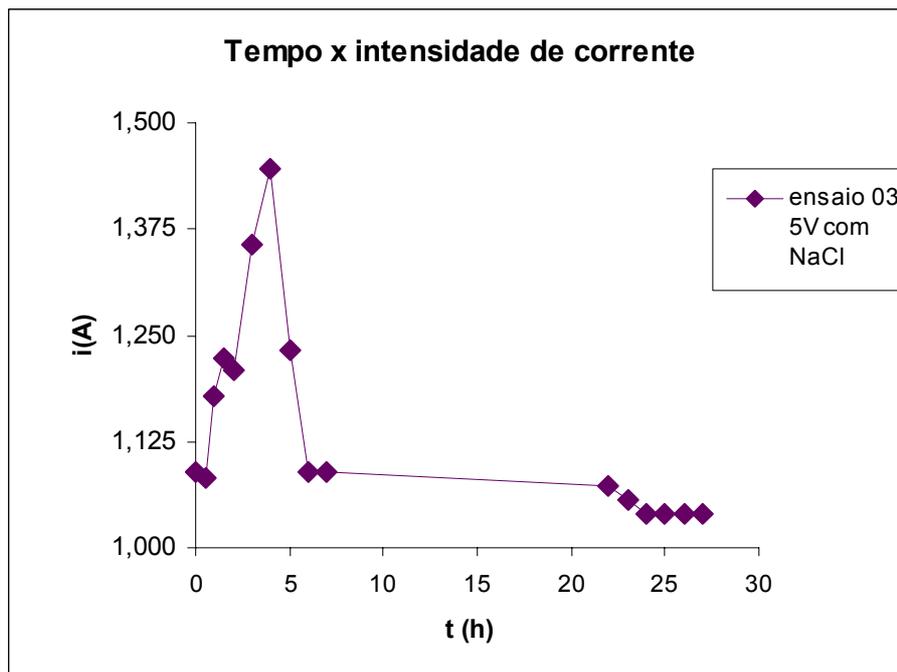


Figura 5.11– Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 03

Pode-se observar que houve um pico de corrente (1,45 A) em 4 horas de ensaio e a partir daí a corrente começou a cair, passando a estabilização na faixa de 1,04 A. Monterroso (2002) afirma que isso pode acontecer devido à formação de sais não condutores no cátodo, que reduzem a resistência elétrica e resultam em flutuações erráticas da corrente elétrica. Schmidt

(2004) afirma que a variação da corrente com o tempo ocorre pela variação da resistência equivalente do circuito, já que a diferença de potencial aplicada entre os eletrodos é constante. Ao final, observou-se que o extensômetro 02 apresentou corrosão em sua haste, como pode ser observada na Figura 5.12. A água retirada encontrava-se cheia de resíduos metálicos, além do macaco hidráulico também apresentar sinais de corrosão.



Figura 5.12 - Corrosão apresentada pelo extensômetro 02

Notou-se a migração de água do eletrodo positivo para o negativo e a evidência da eletrólise através da formação de bolhas pela formação de gás hidrogênio no cátodo. Percebeu-se que o mesmo não ocorre no ânodo, onde o que se verifica é a oxidação do eletrodo.

A resistência não drenada inicial medida pelo Vane test é igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final é de 2,07 kPa, correspondendo a um aumento de 13,7% em relação à resistência inicial.

Comparando-se ao resultado obtido pelo ensaio 02, podemos observar um aumento da resistência final da ordem de 7,1%.

Tabela 5.7– Parâmetros obtidos no ensaio 03

Grandeza		Unidade
Resistência (R)	4,42	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,32	m
Área da amostra (A)	0,0616	m ²
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	11,76	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	1,33	A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	13,81	mSi/cm
Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	9,24E-09	m ² /V.s
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	7,85611E-07	cm ³ /A.s
Consumo de Energia Elétrica Pu	9,104	kWh/m ³
Quantidade de água retirada	0,0019	m ³
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	2,07	kPa
Custo:	2,81	R\$

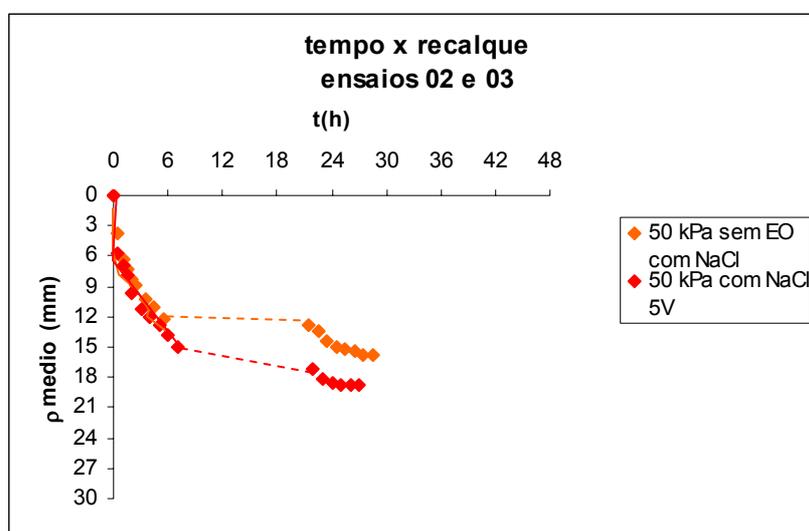


Figura 5.13 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 03

Observa-se na Figura 5.13, claramente a aceleração do tempo de consolidação do solo mole que foi reduzido em 5,3% passando de 28,5 horas para 27 horas. Como era de se esperar, o recalque no ensaio com EO é maior que o do ensaio sem o uso da técnica.

5.2.4 ENSAIO 04

Os valores encontrados neste ensaio são mostrados nas Tabelas 5.8 e 5.9 e nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16 e 5.19. A altura inicial da amostra na célula era de 31,5 cm e a final foi de 25,3 cm.

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio 04

Hora	Δt (h)	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	i (A)	V (V)
11:30	0	0	0	0	0	2,18	10
12:00	0,5	3,2	2,82	3,1	2,0	2,16	10
12:30	1	6,28	7,0	5,8	4,3	2,36	10
13:00	1,5	8,41	8,9	7,3	8,2	2,44	10
13:30	2	9,74	10,2	9,1	9,7	2,42	10
14:00	3,5	11,49	10,2	10,1	10,6	2,71	10
15:00	4,5	13,72	12,6	12,2	12,8	2,89	10
16:00	5,5	16,72	12,9	13,1	14,2	1,46	10
17:00	6,5	16,82	13,0	14,4	14,8	1,18	10
18:00	7,5	16,28	14,1	15,2	15,2	1,18	10
09:00	21,5	16,57	14,2	16,0	15,6	0,75	10
10:00	22,5	17,65	14,2	16,7	16,2	0,71	10
11:00	23,5	17,66	14,2	16,8	16,2	0,58	10
12:00	24,5	17,68	14,3	17,1	16,3	0,58	10
13:00	25,5	17,82	14,4	17,2	16,4	0,11	10
14:00	26,5	17,92	14,4	17,5	16,6	0,11	10
15:00	27,5	17,92	14,4	17,5	16,6	0,11	10
16:00	28,5	17,92	14,4	17,5	16,6	0,11	10

Nota-se que a corrente começa a sofrer queda por volta da quinta hora de ensaio e passa a um valor de 0,11 A nas últimas quatro horas do mesmo, provavelmente pela deteriorização do eletrodo (+).

Tabela 5.9 – Parâmetros obtidos do ensaio 04

Grandeza	Unidade
Resistência (R)	26,57 Ω
Comprimento da amostra (L)	0,315 m
Área da amostra (A)	0,0616 m ²
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	1,92 mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	1,34 A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	6,83 mSi/cm
Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	5,72E-09 m ² /V.s
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	2,96978E-06 cm ³ /A.s
Consumo de energia elétrica (Pu)	0,69 kW/m ³
Quantidade de água retirada	0,0036 m ³
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82 kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	1,34 kPa
Custo	6,05 R\$/m ³

A resistência não drenada inicial é, medida pelo Vane test, igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final é de 2,07 kPa, correspondendo a um aumento de 13,7% em relação à resistência inicial.

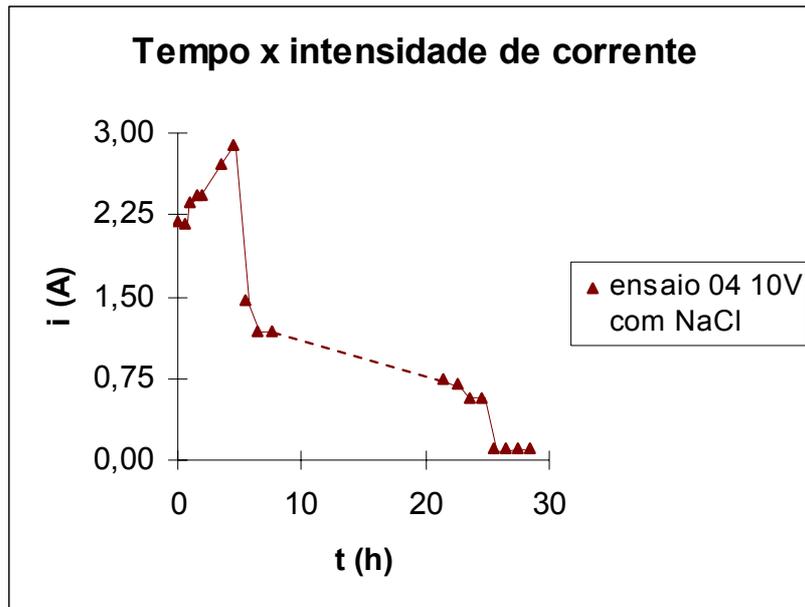


Figura 5.14 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 04

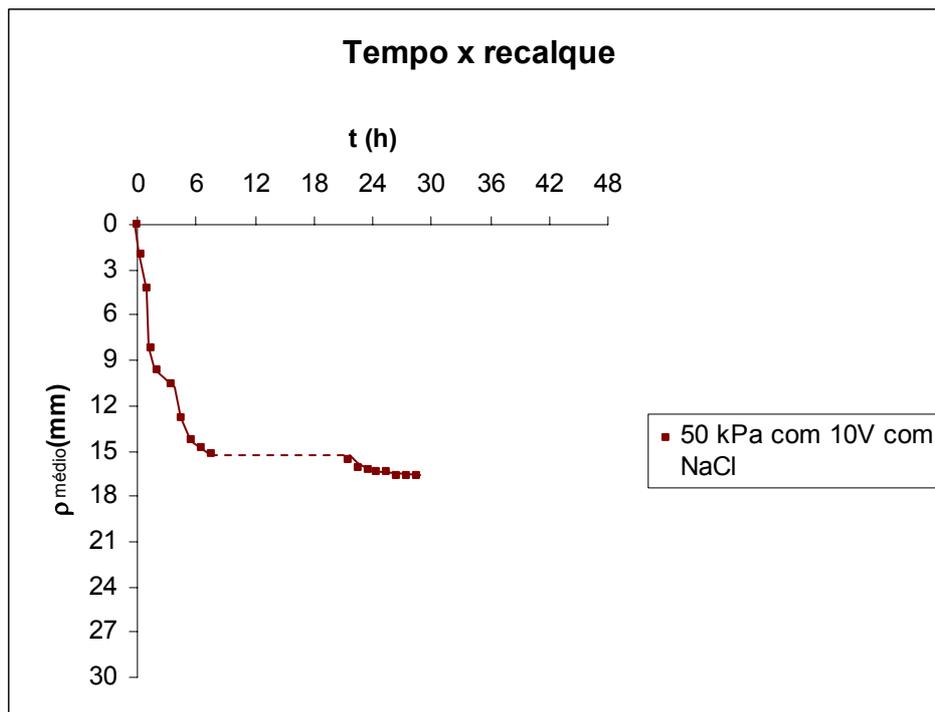


Figura 5.15 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 04

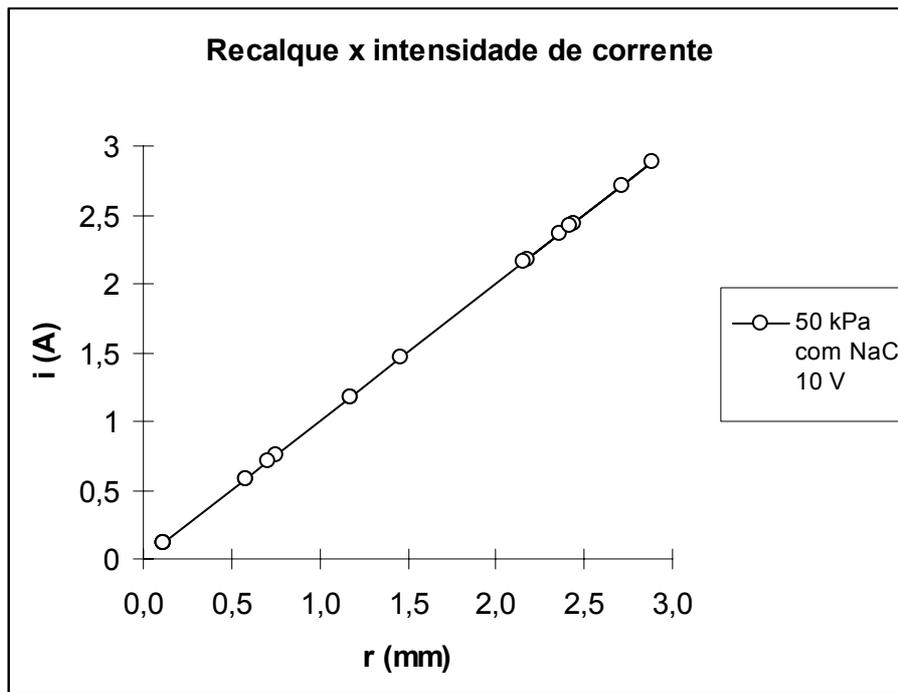


Figura 5.16 – Gráfico recalque x intensidade de corrente

Observa-se que o pico de corrente ocorre em 2,89 A que corresponde a 11,97 mm de recalque e a 4,5 horas de ensaio e a partir daí a corrente começa a decrescer até a estabilização dos extensômetros. O estado dos eletrodos no final do ensaio pode ser observado na Figura 5.17.



Figura 5.17 – Comparação entre os eletrodos

Nota-se claramente a formação de um composto verde provavelmente um sal de cobre no ânodo, conforme as Equações 5.3 e 5.4. O que não acontece no eletrodo negativo (cátodo).

Segundo Nascimento (2005), para entender como a corrosão eletroquímica do eletrodo acontece, faz-se uma analogia entre o processo de eletro-osmose e da pilha eletrolítica. Na pilha eletrolítica ocorre uma reação de oxi-redução gerada pela energia elétrica inserida no sistema; o ânodo se oxida (ocorrendo a corrosão) e o cátodo se reduz pela aceitação dos elétrons liberados pelo ânodo. Analogamente, o solo saturado funciona como solução eletrolítica existente na pilha e os eletrodos de cobre são os eletrodos da pilha eletrolítica, a bateria é a fonte de alimentação usada na eletro-osmose, que atua como uma bomba de elétrons empurrando-os de um eletrodo ao outro. Na célula eletro-osmótica, a presença acentuada de sais na simulação da água do mar, faz do solo saturado um eletrólito. A velocidade de corrosão é acentuada pela presença do NaCl (cloreto de sódio ou sal de cozinha) na água.

No ânodo, os íons Cl^- são oxidados a $\text{Cl}_2(\text{g})$ e no cátodo, as moléculas de H_2O são reduzidas a $\text{H}_2(\text{g})$ e a íons OH^- . As equações 5.1 e 5.2 mostram a decomposição e a oxidação do cloreto de sódio.



O gás cloro, presente no ânodo, reage com o cobre resultando em cloreto de cobre. Conforme a Equação 5.3.



Este sal é de coloração verde, que provavelmente devem ser o material encontrado no ânodo nos ensaios. Outra hipótese é que, com a eletrólise da água, o oxigênio sai em forma gasosa no ânodo oxidando o cobre presente no meio, formando hidróxido de cobre que também é uma substância esverdeada, como se pode observar na Figura 5.18 e na Equação 5.4. Os produtos de corrosão nos processos eletroquímicos, na maioria dos casos, são resultantes da formação de compostos insolúveis entre o íon de metal e o íon hidroxila, sendo geralmente um hidróxido de metal corroído ou óxido hidratado do metal. O cobre perde elétrons para a água salina, enquanto na região é formada uma mistura de hidróxido de cobre que constitui a corrosão.

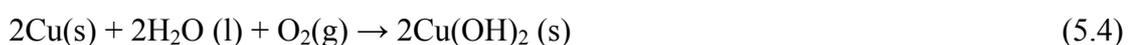




Figura 5.18– Reação apresentada pelo ânodo.

Estas reações podem ocorrer de forma isolada ou em conjunto formando a substância esverdeada, indicando que os gases dissolvidos através da eletrólise e da redução do cloro podem acelerar a corrosão do eletrodo.

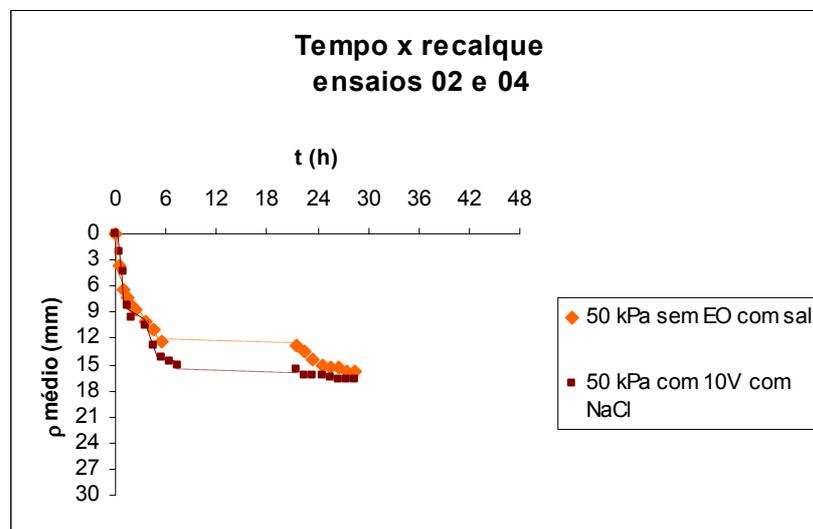


Figura 5.19 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 04

A Figura 5.19, mostra a comparação entre as curvas tempo x recalque dos ensaios com e sem EO. Observa-se que além da diminuição no valor do recalque, não ocorreu um decréscimo do tempo de consolidação, provavelmente causada pela corrosão eletroquímica do eletrodo.

5.2.5 ENSAIO 05

Os valores encontrados neste ensaio são mostrados nas Tabelas 5.10 e 5.11 e nas Figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23, a seguir. . A altura inicial da amostra na célula era de 30,4 cm e a final foi de 25,3 cm.. A partir da corrente de 0,01 A, ocorre a quebra do ânodo e a fonte de alimentação elétrica é desligada, assim devido a impossibilidade de troca dos eletrodos.

Tabela 5.10 – Leituras obtidas no ensaio 05

Δt (h)	hora	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	V (V)	i (A)
0	11:20	0	0	0	0,0	15	2,59
0,5	11:50	2,4	2,2	2,2	2,3	15	0,55
1	12:20	3,4	3,1	3,1	3,2	15	0,36
1,5	12:50	4,3	3,9	4,9	4,4	15	0,3
2	13:20	5,3	4,9	4,9	5,0	15	0,46
3	14:20	5,7	6,2	6,3	6,1	15	0,45
4	15:20	6,7	7,1	7,3	7,0	15	0,42
5	16:20	8,3	7,7	7,9	8,0	15	0,42
6	17:20	9,2	8,5	8,8	8,9	15	0,41
22	09:20	12,7	11,7	12,3	12,2	15	0,33
22,67	09:40	13,2	13,1	13,7	13,3	15	0,01

Tabela 5.11 – Parâmetros obtidos do ensaio 05

Grandeza	Unidade	
Resistência (R)	167,65	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,304	m
Área da amostra (A)	0,0616	m ²
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	0,29	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	0,57	A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	1,88	mSi/cm
Coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	3,42E-09	m ² /V.s
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	1,16E-5	cm ³ /A.s
Consumo de energia elétrica (Pu)	10,40	kWh/m ³
Quantidade de água retirada	0,0042	m ³
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	2,19	kPa
Custo	3,21	R\$/m ³

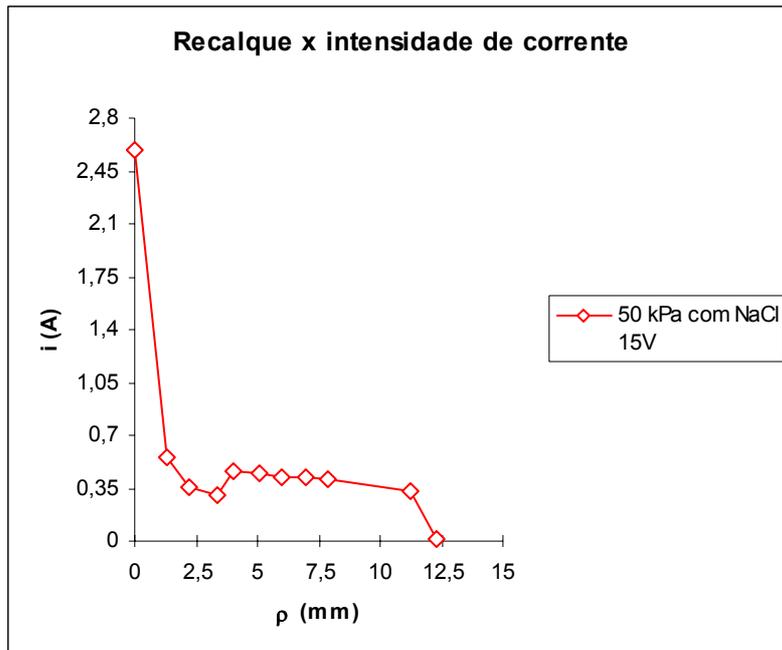


Figura 5.20 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 05

Observa-se nas Figuras 5.20 e 5.22 que não houve um pico de corrente durante o ensaio, que esta decresce ao longo do tempo até se anular no momento em que o fio de cobre usado no eletrodo se rompe.

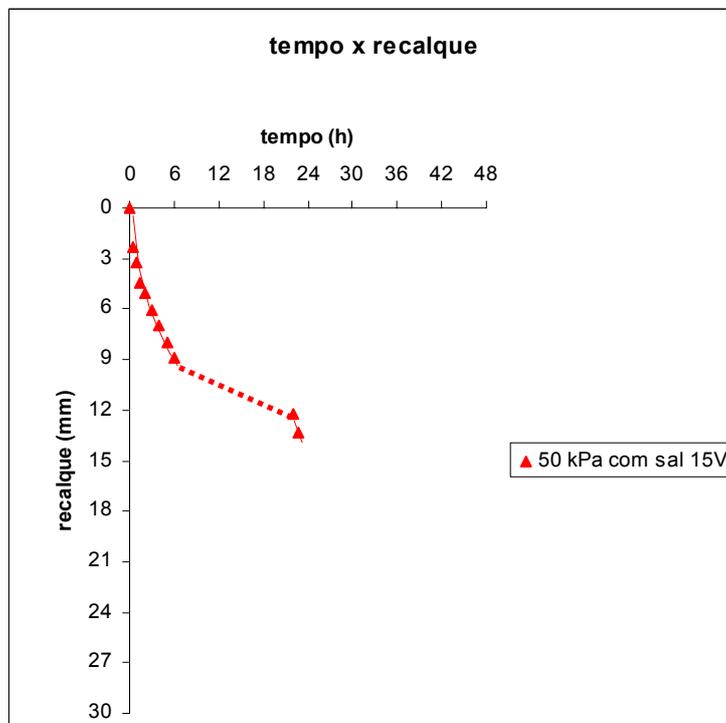


Figura 5.21 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 05

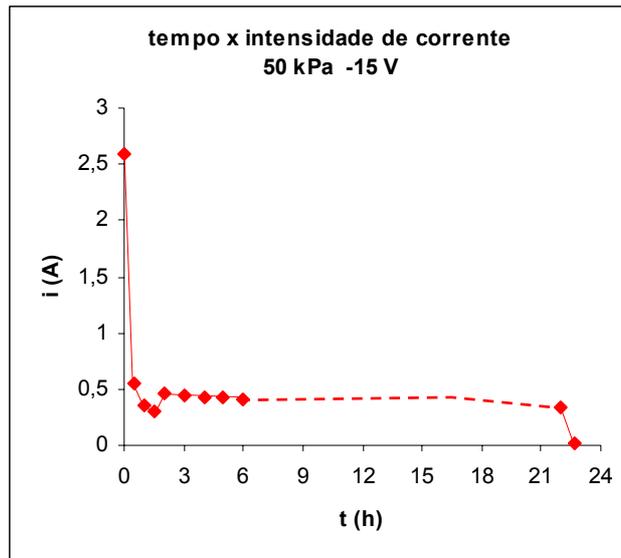


Figura 5.22 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 05

Este ensaio durou 22 horas e 40 minutos e teve como fator interessante o rompimento do ânodo durante sua realização, o que nos levou a aumentar o diâmetro do fio de cobre de 4 mm para 6 mm. A resistência não drenada inicial é, medida pelo Vane test, igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final é de 2,19 kPa, correspondendo a um aumento de 20,3% em relação a resistência inicial.

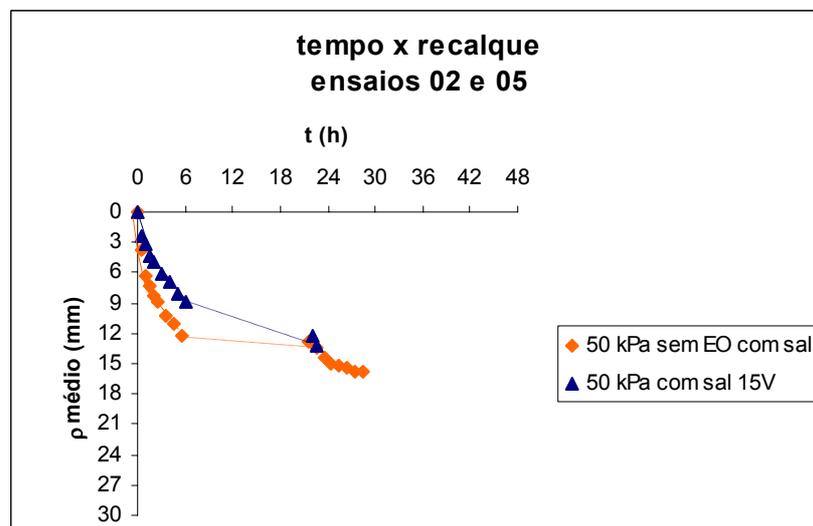


Figura 5.23 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 05

Na Figura 5.23, pode-se observar que o tempo necessário para a estabilização dos extensômetros é 20,5% menor com o uso de EO. Apesar do aumento da resistência não drenada, este ensaio teve recalques menores que o ensaio sem EO.

5.2.6 ENSAIO 06

Os resultados encontrados são mostrados nas Tabelas 5.12 e 5.13 e nas Figuras abaixo.

Tabela 5.12 – Resultados obtidos no ensaio 06

Δt (h)	hora	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	V (V)	i (A)
0	13:00	0	0	0	0	25	3,71
0,5	13:30	2,9	2,8	2,9	2,8	25	1,69
1	14:00	3,7	3,7	3,8	3,7	25	0,74
1,5	14:30	6,9	5,9	6,0	6,3	25	1,74
2	15:00	7,5	8,4	6,5	7,5	25	1,48
3	16:00	10,2	11,1	10,2	10,5	25	0,95
4	17:00	11,3	12,3	11,4	11,7	25	0,48
20	09:00	17,8	18,4	16,8	17,7	25	0,29
21	10:00	18,8	18,6	18,0	18,5	25	0,16
22	11:00	19,7	19,6	19,1	19,5	25	0,07
23	12:00	20,9	20,7	20,1	20,6	25	0,07
25	14:00	24,4	24,0	23,5	24,0	25	0,07
26	15:00	24,6	24,3	23,8	24,2	25	0,1
27	16:00	24,9	24,8	24,4	24,7	25	0,07
28	17:00	24,9	25,1	24,5	24,8	25	0,06
44	09:00	28,3	27,8	24,5	26,9	25	0,07
45	10:00	29,4	29,1	24,5	27,7	25	0,08
45,5	10:30	29,4	29,1	24,5	27,7	25	0,06

Tabela 5.13 – Parâmetros obtidos no ensaio 06

Grandeza	Unidade	
Resistência (R)	199,39	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,3425	m
Área da amostra (A)	0,0616	m ²
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	0,28	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	0,66	A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	1,47	mSi/cm
Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	1,38E-09	m ² /V.s
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	4,94E-06	cm ³ /A.s
Consumo de energia elétrica (Pu)	35,61	kWh/m ³
Quantidade de água retirada	0,0051	m ³
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	0,97	kPa
Custo	10,98	R\$/m ³

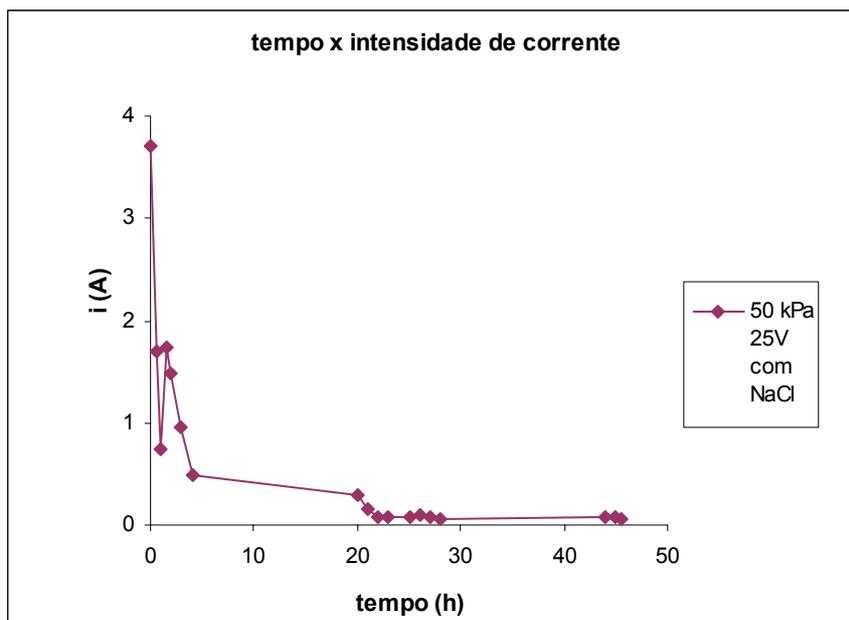


Figura 5.24 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 06

A intensidade de corrente cai rapidamente nos instantes iniciais do ensaio, como pode ser observado na Figura 5.24. Estas diferenças de intensidade de corrente são devidas às variações ocorridas na resistência do sistema solo-água, já que a diferença de potencial elétrico é mantida constante.

A resistência não drenada final é de 2,19 kPa, correspondendo a um aumento de 20,3% em relação a resistência inicial. Comparando-se ao resultado obtido pelo ensaio 01, podemos observar um aumento da resistência final da ordem de 13,7%.

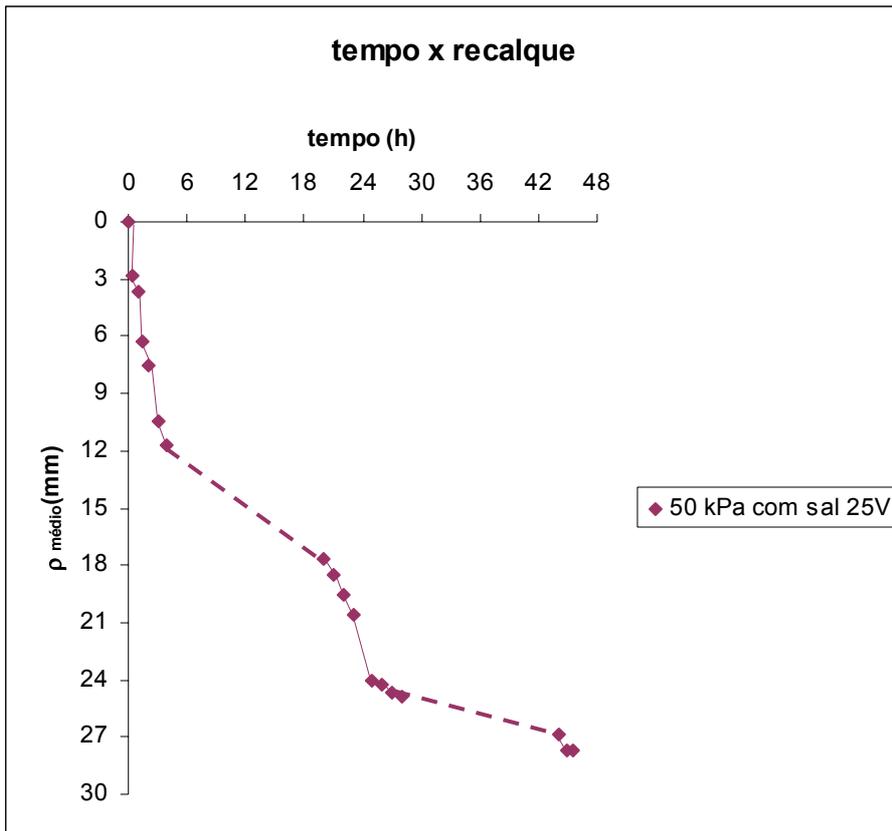


Figura 5.25 - Gráfico tempo x recalque do ensaio 06

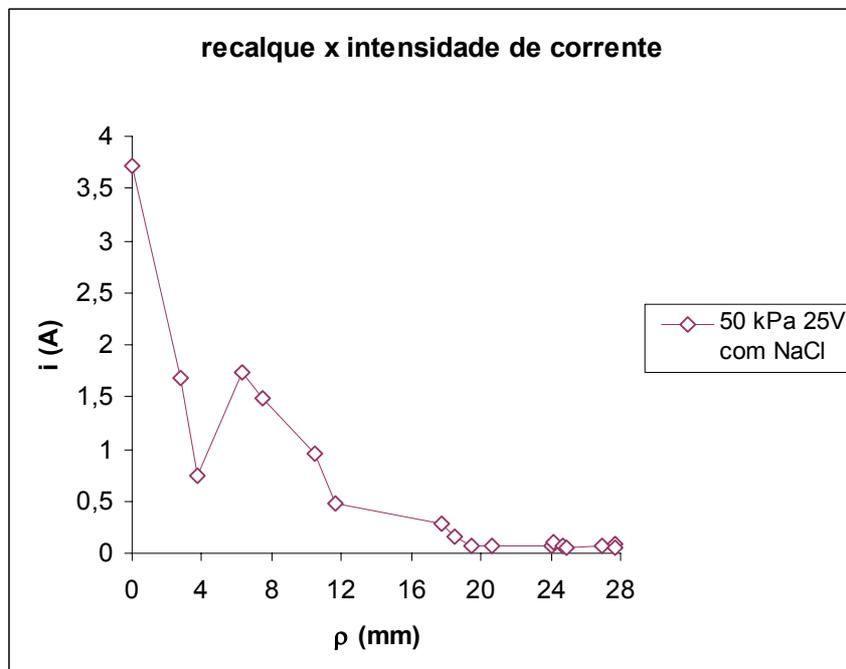


Figura 5.26 – Gráfico recalque x intensidade de corrente

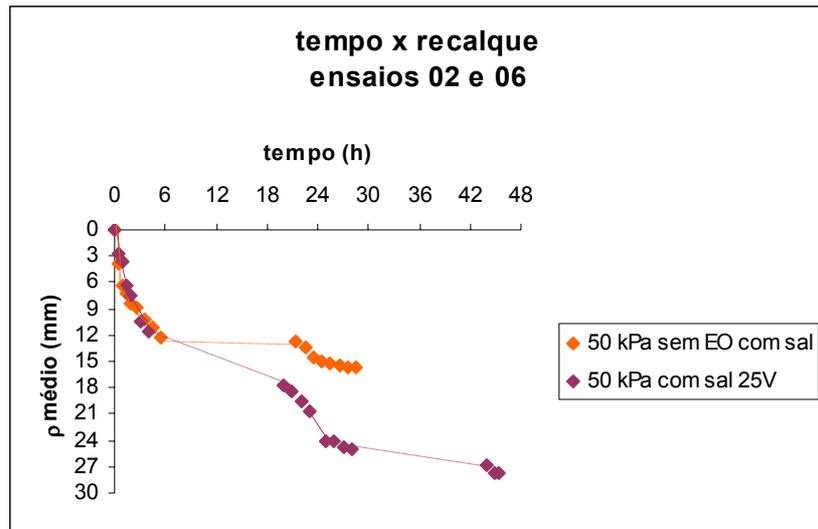


Figura 5.27 – Gráfico comparativo entre os ensaios 02 e 06

Analisando o gráfico da Figura 5.27, verificamos que o tempo de consolidação foi aumentado em 59,6 % de 28 horas e 30 minutos para 45 horas e 30 minutos, embora o recalque tenha aumentado em 86,5% de 14,85 mm para 27,7 mm. O tempo de consolidação provavelmente foi aumentado devido ao aumento de resistência do novo eletrodo.

5.2.7 ENSAIO 07

Este ensaio foi realizado em 12/04/07, sendo o ensaio realizado sem eletro-osmose, com a carga de 100 kPa com a adição de NaCl.

Os valores encontrados são mostrados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resultados obtidos no ensaio 07

Δt (h)	hora	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)
0	14:30	0	0,0	0,0	0
0,5	15:00	9,9	9,9	2,9	9,9
1	15:30	13,6	13,6	7,9	13,6
1,5	16:00	16,6	16,5	7,9	16,5
2	16:30	17,3	17,2	13,6	17,3
23,5	14:00	29,6	29,0	13,6	29,3
22,5	15:00	29,6	30,0	13,6	29,8
25,5	16:00	29,6	30,0	13,6	29,8
26,5	17:00	29,6	30,0	14,4	29,8

Os resultados de recalque do extensômetro 3 (ρ_3) foram descartados devido à discrepância dos resultados. O ensaio levou 26 horas e 30 minutos para atingir a estabilização dos extensômetros.

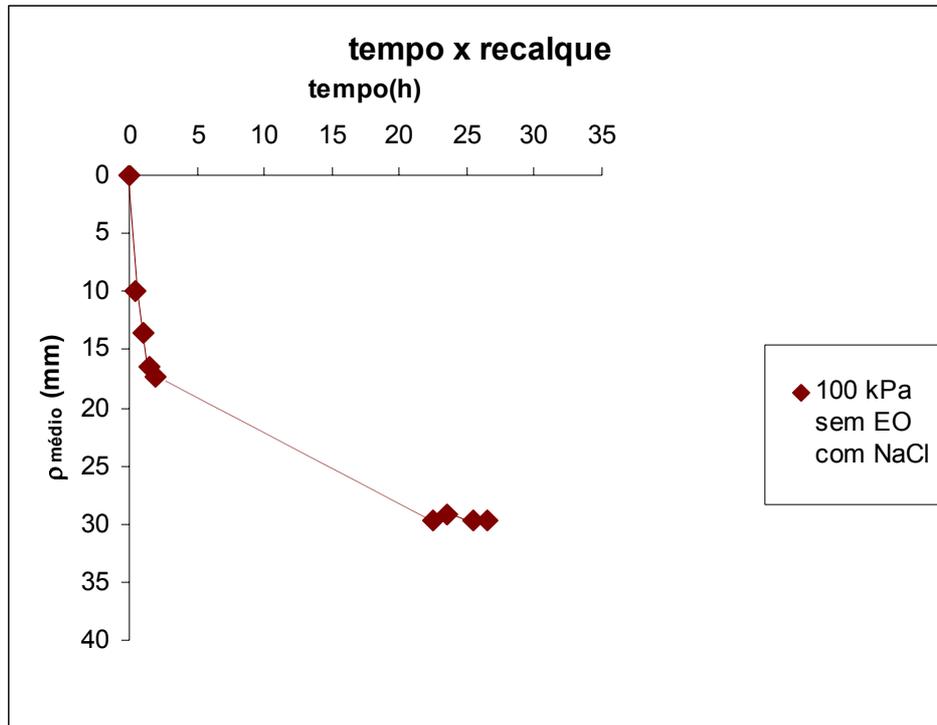


Figura 5.28 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 07

A resistência não drenada inicial do ensaio é 1,82 kPa e a resistência final é de 3,4 kPa, correspondendo a um aumento de 86,8% em relação a resistência inicial.

5.2.8 ENSAIO 08

Este ensaio foi realizado com a aplicação de uma diferença de potencial de 10 V a uma carga aplicada de 100 kPa ao solos preparado com água tratada sem a adição de NaCl. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.15 e 5.16 e nas Figuras 5.29, 5.30 e 5.31

Tabela 5.15 – Resultados encontrados no ensaio 08

Δt (h)	hora	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	V (V)	i (mA)
0	11:00	0,0	0,0	0,0	0,0	10	5,3
0,5	11:30	0,8	0,2	3,1	1,3	10	4,7
1	12:00	4,1	1,6	3,6	3,1	10	4,6
1,5	12:30	4,8	1,8	6,2	4,3	10	3,7
2	13:00	6,7	4,4	6,8	6,0	10	3,5
3	14:00	9,1	7,3	7,6	8,0	10	3,5
4	15:00	10,6	9,3	8,8	9,6	10	3,5
5	16:00	14,3	11,1	9,5	11,6	10	3,5
22	09:00	23,5	11,1	10,3	15,0	10	3,5
23	10:00	24,9	11,8	10,3	15,7	10	3,5
24	11:00	26,6	12,3	10,6	16,5	10	3,5
25	12:00	28,0	12,8	10,5	17,1	10	3,5
26	13:00	30,6	13,0	10,6	18,1	10	3,5
27	14:00	30,6	13,0	10,6	18,1	10	3,5
28	15:00	30,6	13,0	10,6	18,1	10	3,5

Os valores de corrente eram muito baixos, da ordem de miliamperes (mA), sendo lidos com o uso de um multímetro marca Minipa modelo ET-1001.

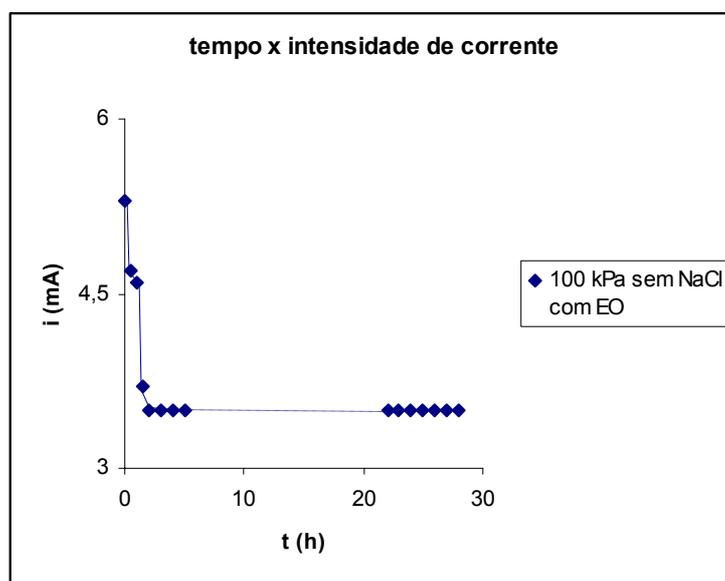


Figura 5.29 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 08

Nota-se, na Figura 5.29, o decréscimo da corrente e uma estabilização da mesma praticamente na primeira uma hora e meia de ensaio, apesar da falta de leitura após a segunda hora, e que a corrente é praticamente nula, ou seja da ordem de miliAmperes.

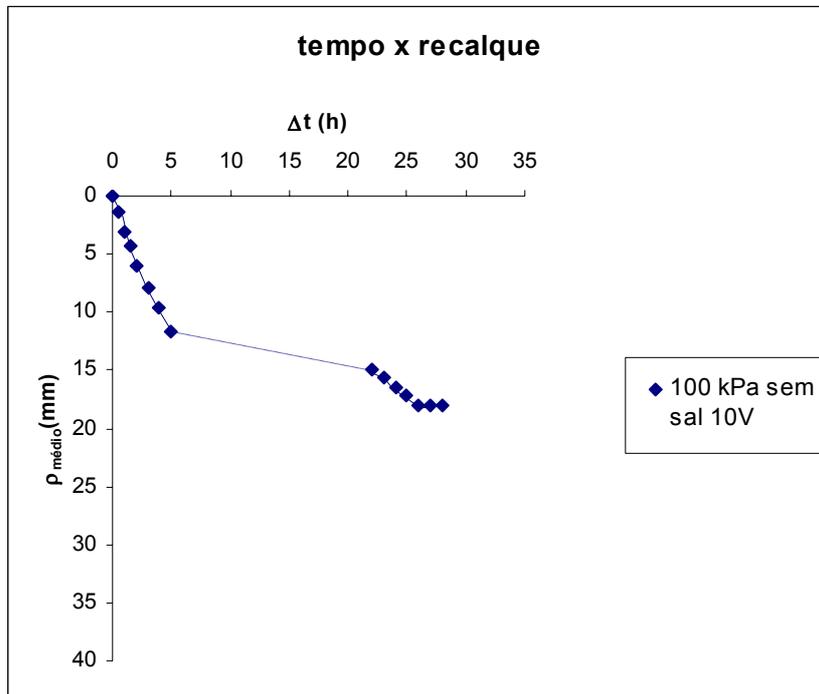


Figura 5.30 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 08

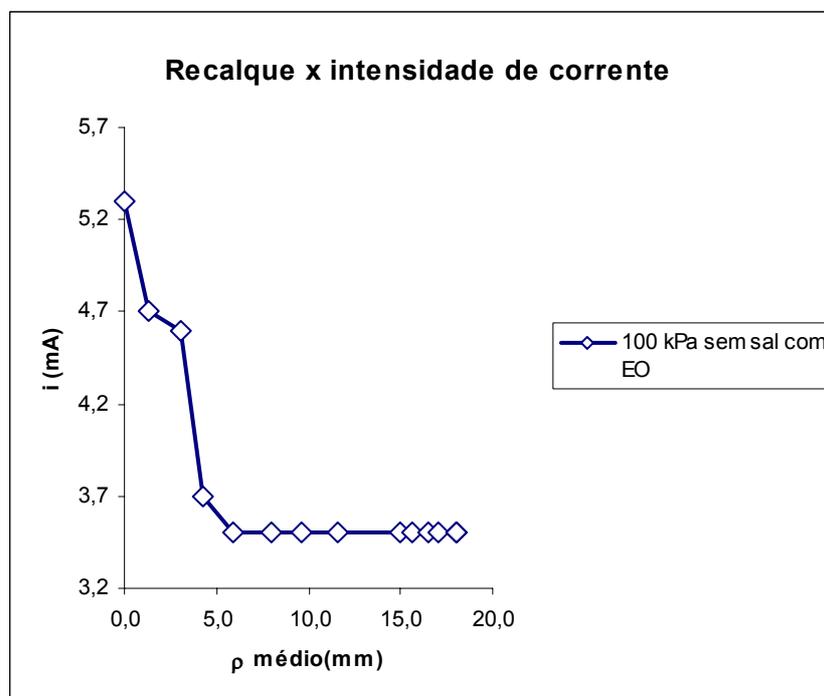


Figura 5.31 - Gráfico recalque x intensidade de corrente

Tabela 5.16 – Parâmetros obtidos no ensaio 08

Grandeza	Unidade	
Resistência (R)	2687,98	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,3245	m
Área da amostra (A)	0,0616	m^2
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	19,6	$\mu Si/cm$
Intensidade de corrente elétrica (i)	3,8	mA
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	19,9	$\mu Si/cm$
Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	5,42E-09	$m^2/V.s$
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	2,77E-04	$cm^3/A.s$
Consumo de energia elétrica (Pu)	0,053	kWh/m^3
Quantidade de água retirada	0,00519	m^3
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	3,4	kPa
Custo	0,02	$R\$/m^3$

A resistência não drenada inicial é, medida pelo Vane test, igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final é de 3,4 kPa. Comparando-se ao resultado obtido pelo ensaio 07, podemos observar que os valores são iguais.

5.2.9 ENSAIO 09

Este ensaio começou a ser realizado em 22/05/07 com a preparação da mostra e no dia seguinte com a aplicação de voltagem de 5 V a uma carga aplicada de 100 kPa. A duração deste ensaio foi de 30 horas quando ocorreu a estabilização dos extensômetros. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.17 e 5.18 e nas Figuras 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35.

Tabela 5.17 – Resultados encontrados no ensaio 09

hora	Δt (h)	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	V (V)	i (A)
14:50	0	0,0	0,0	0,0	0,0	5	0,82
15:20	0,5	8,5	9,1	8,4	8,6	5	0,61
15:50	1	14,7	14,7	14,4	14,6	5	0,54
16:20	1,5	18,4	17,1	18,1	17,9	5	0,52
16:50	2	22,7	21,9	22,4	22,3	5	0,44
08:50	18	31,4	27,8	31,9	30,4	5	0,66
09:50	19	32,6	28,6	33,0	31,4	5	0,48
10:50	20	33,7	29,4	33,2	32,1	5	0,29
11:50	21	33,8	30,2	33,3	32,4	5	0,23
12:50	22	33,8	30,2	33,3	32,4	5	0,23
13:50	23	33,9	30,2	33,3	32,5	5	0,44
14:50	24	33,9	30,2	33,3	32,5	5	0,18
15:50	25	36,8	30,2	33,3	33,4	5	0,58
16:50	26	36,8	30,2	33,3	33,4	5	0,41
17:00	27	37,3	33,1	39,2	36,5	5	0,06
09:00	28	40,4	35,9	39,2	38,5	5	0,07
10:00	29	41,6	37,2	39,2	39,3	5	0,08
10:30	30	41,6	37,2	39,2	39,3	5	0,06

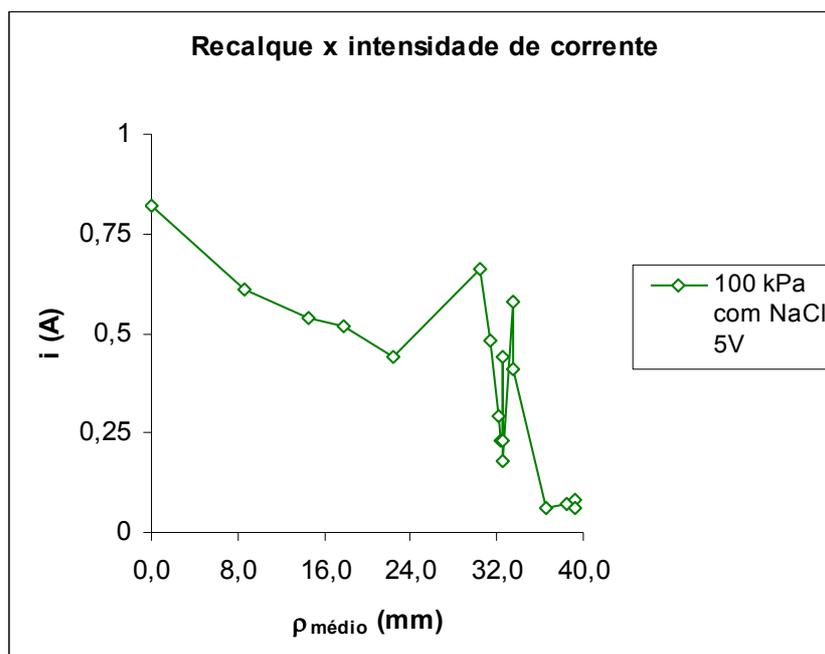


Figura 5.32 – Gráfico recalque x corrente do ensaio 09

Nota-se, nas Figuras 5.32 e 5.33 o decréscimo da corrente e uma oscilação da mesma após cerca de 18 horas de ensaio até as 26 horas de ensaio quando a corrente começa a cair, evidenciando a desagregação do ânodo. A variação da corrente com o tempo ocorre pela variação da resistência equivalente do circuito, já que a diferença de potencial aplicada entre os eletrodos é constante.

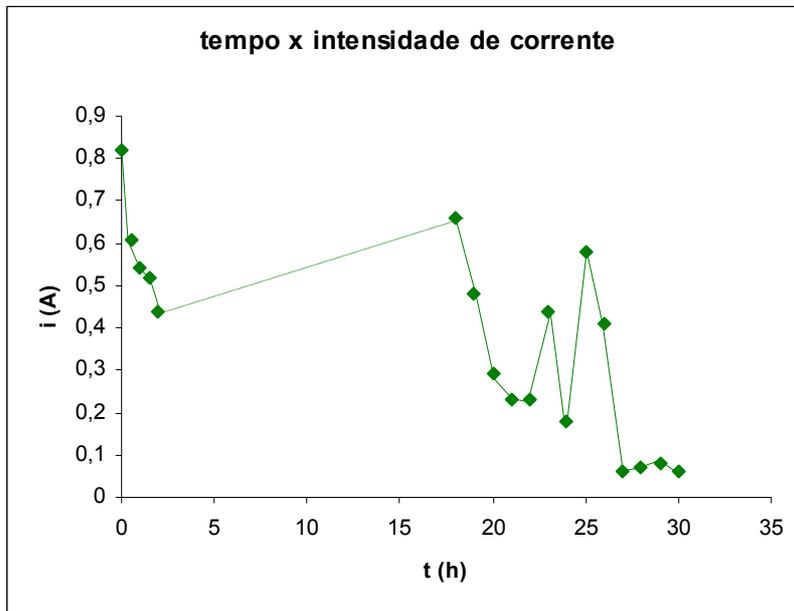


Figura 5.33 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 09

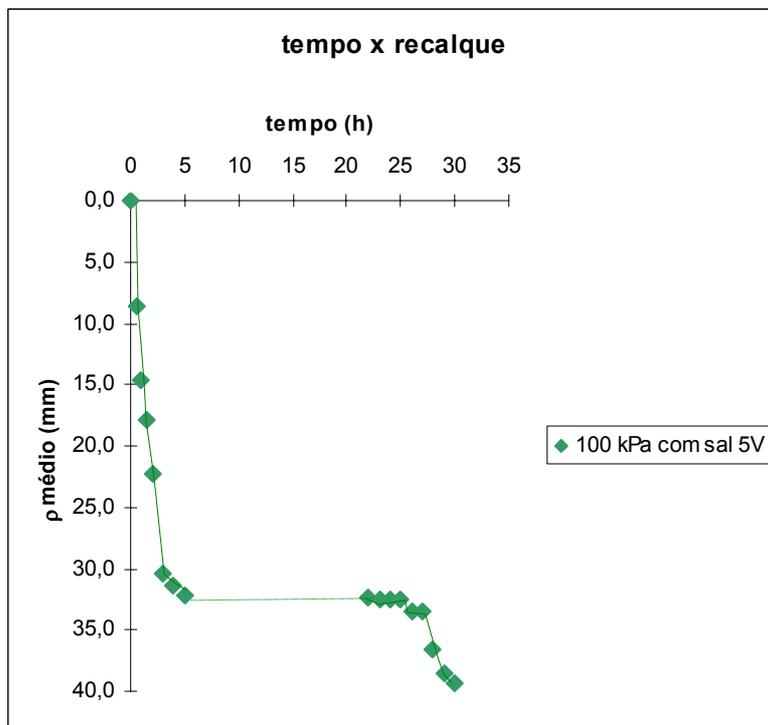


Figura 5.34 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 09

Tabela 5.18 – Parâmetros obtidos no ensaio 09

Grandeza		Unidade
Resistência (R)	26,88	Ω
comprimento da amostra (L)	0,3325	m
Área da amostra (A)	0,0616	m ²
condutividade elétrica do solo (σ_e)	2,01	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	0,37	A
condutividade elétrica aparente (κ_a)	4,02	mSi/cm
coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	9,58E-09	m ² /V.s
eficiência eletro-osmótica (κ_i)	4,77E-06	cm ³ /A.s
Consumo de energia elétrica (Pu)	2,73	kWh/m ³
Quantidade de água retirada	0,0048	m ³
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	3,77	kPa
Custo	0,84	R\$/m ³

A resistência não drenada final é de 3,77 kPa, correspondendo a um aumento de 107,1% em relação a resistência inicial (1,82 kPa). Comparando-se ao resultado obtido pelo ensaio 06 (sem EO), podemos observar um aumento da resistência final da ordem de 10,9%.

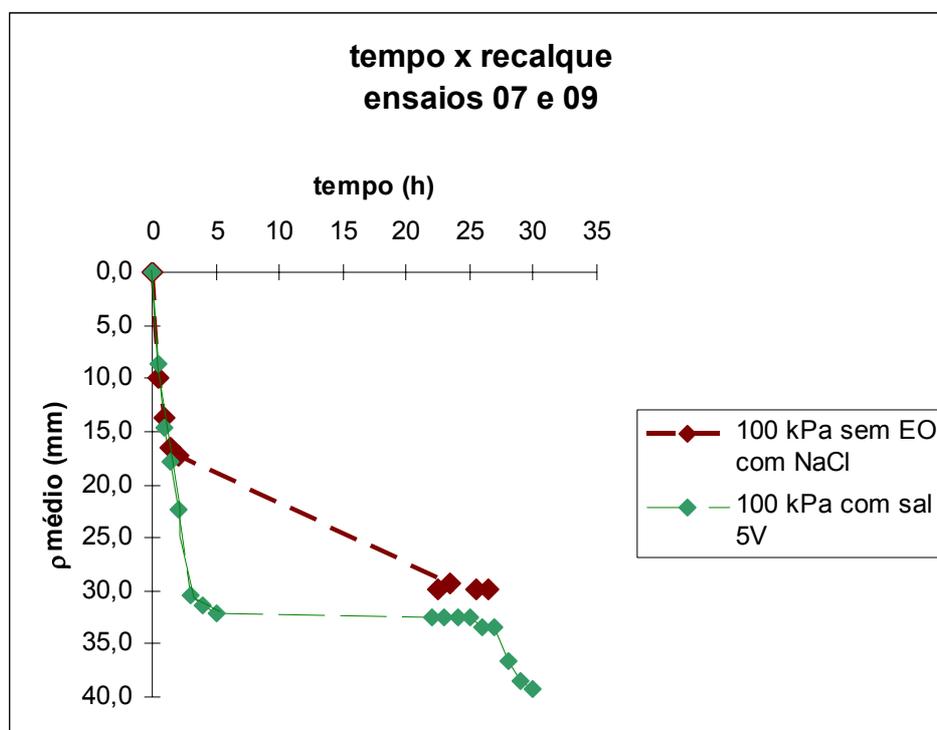


Figura 5.35 – Gráfico comparativo dos ensaios 07 e 09

Talvez pelo fato da corrente que percorreu a amostra ser pequena, mas a consolidação se deu em 30 horas em relação às 26 horas e meia do ensaio sem EO. No entanto, em relação a este temos como favorável o aumento da resistência não drenada. Conta também, o fato de que o eletrodo desagrega-se durante o ensaio, o que caso não ocorresse provavelmente seria um fator de aceleração do tempo de ensaio. Observa-se também o aumento no recalque entre os dois ensaios, que é finalidade da pesquisa.

5.2.10 ENSAIO 10

O tempo de realização do ensaio foi de 22 horas e trinta minutos e os resultados obtidos podem ser vistos nas Tabelas 5.19 e 5.20 e nas Figuras 5.36, 5.37, 5.39 e 5.40.

Tabela 5.19 – Resultados do ensaio 10

Δt (h)	hora	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	V (V)	i (A)
0	09:30	0,0	0,0	0,0	0,0	10	2,89
0,5	10:00	2,3	2,7	2,0	2,3	10	1,08
1	10:30	4,8	6,1	5,5	5,8	10	1,22
1,5	11:00	6,0	7,9	7,0	7,4	10	1,2
2	11:30	7,6	10,1	9,3	9,7	10	1,04
5,5	15:00	8,6	11,4	10,6	11,0	10	0,29
6,5	16:00	11,6	13,6	13,9	13,7	10	0,19
7,5	17:00	21,7	26,4	24,9	25,6	10	0,16
8,5	18:00	23,9	27,5	27,0	27,3	10	0,07
9,5	19:00	25,5	30,1	29,5	29,8	10	0,07
22,5	08:00	26,6	32,1	31,3	31,7	10	0,01

Verifica-se na Tabela que o eletrodo começa a se decompor após a segunda de ensaio e que ele se rompe após 22 horas e 30 minutos de aplicação da diferença de potencial na massa de solo.

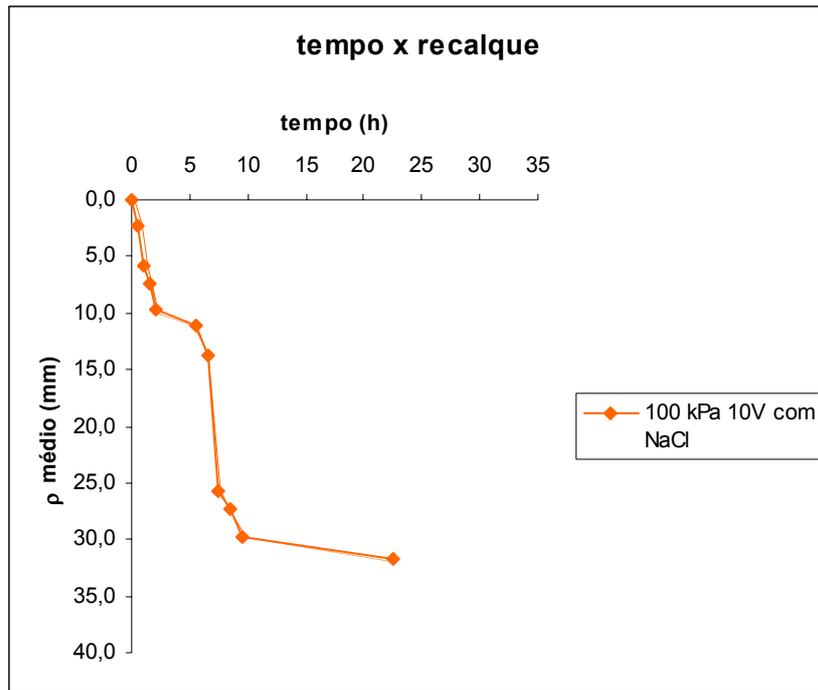


Figura 5.36 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 10

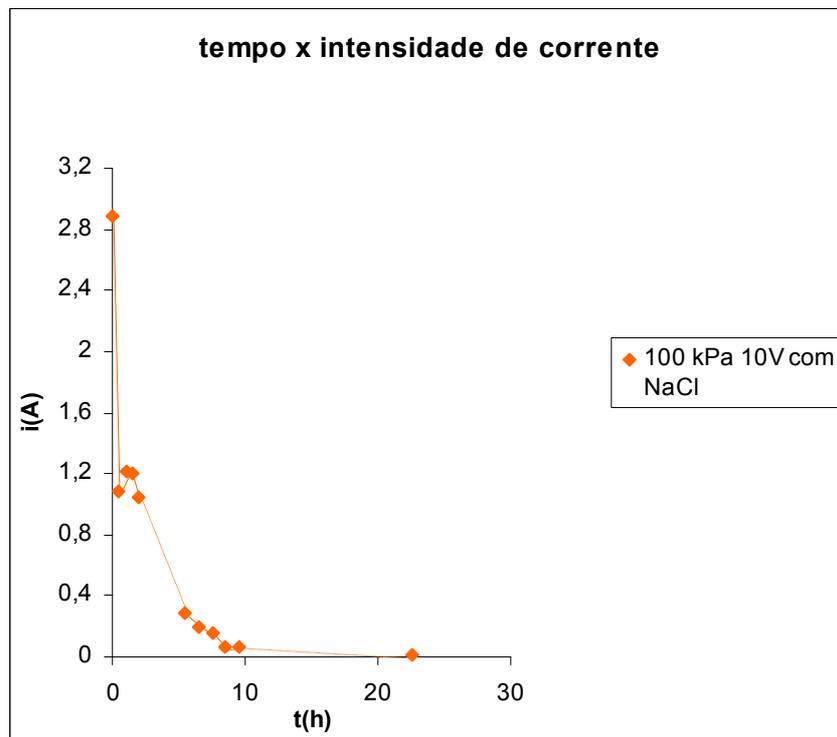


Figura 5.37 – Gráfico tempo x intensidade de corrente do ensaio 10

Percebe-se no gráfico que a corrente decresce nos primeiros 30 minutos de ensaio, sobe um pouco na hora seguinte, passando a decrescer novamente até praticamente se anular com a quebra do ânodo, como se observa na Figura 5.38



Figura 5.38 – Ânodo completamente desagregado

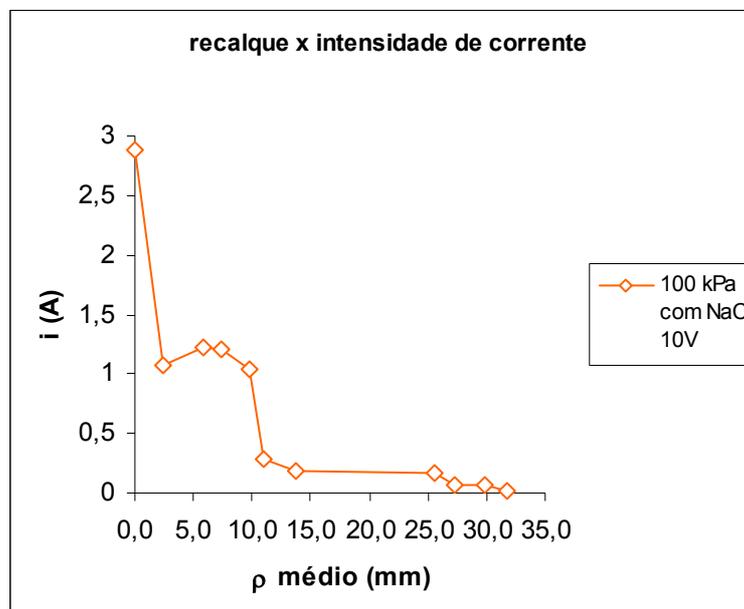


Figura 5.39 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 10

Tabela 5.20 – Parâmetros obtidos no ensaio 10

Grandeza		Unidade
Resistência (R)	142,86	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,3325	m
Área da amostra (A)	0,0616	m ²
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	0,38	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	0,75	A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	4,03	mSi/cm
Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	6,98E-09	m ² /V.s
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	1,85E-05	cm ³ /A.s
Consumo de energia elétrica (Pu)	8,21	kWh/m ³
Quantidade de água retirada	0,0052	m ³
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	3,89	kPa
Custo	2,53	R\$/m ³

Como houve o rompimento do eletrodo, a resistência média é elevada. O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica é coerente com os valores encontrados por Mitchell (1976) variando no intervalo de 1×10^{-8} a 1×10^{-9} m²/V.s.

A resistência não drenada final é de 3,89 kPa, sendo a resistência não drenada inicial igual a 1,82 kPa correspondendo, em relação a resistência inicial, a um aumento de 113,7% e a um aumento em relação a resistência final do ensaio 07 de 14,4%. O tempo de realização do ensaio é 11,3%, menor do que o ensaio 07.

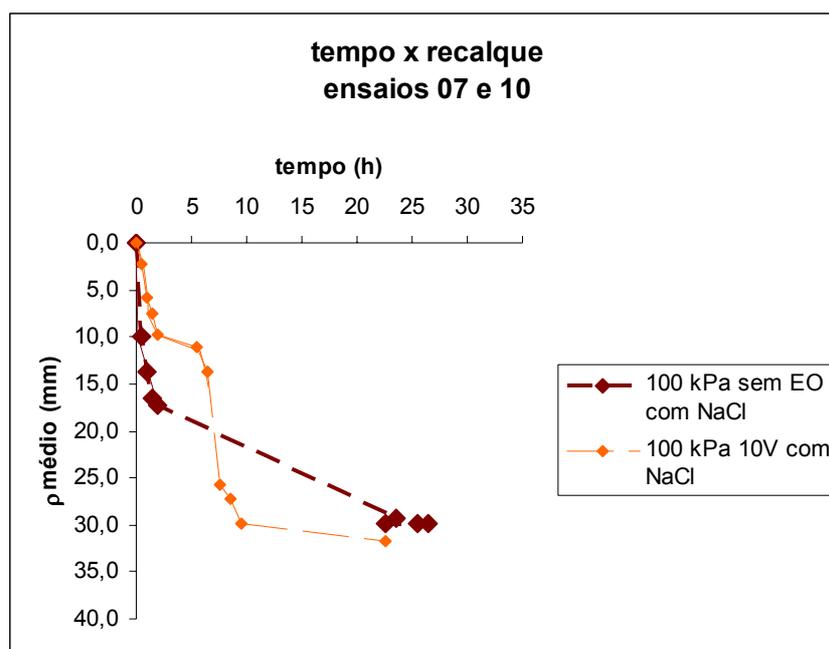


Figura 5.40– Gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 10

5.2.11 ENSAIO 11

Este ensaio foi realizado em 28/05/07 quando a fonte foi ligada. A carga aplicada foi de 100 kPa e a voltagem de 15 V. A duração foi de 23 horas e trinta minutos.

Novamente se observa que a corrente decresce na primeira uma hora e meia de ensaio, mantendo-se constante entre duas horas e meia e dezoito horas e meia, passando a cair novamente até se estabilizarem os extensômetros.

Tabela 5.21 – Resultados do ensaio 11

Δt (h)	hora	ρ 1 (mm)	ρ 2 (mm)	ρ 3 (mm)	ρ médio (mm)	U (V)	i (A)
0	14:30	0,0	0,0	0,0	0,0	15	4,82
0,5	15:00	9,9	9,9	8,7	9,3	15	3,43
1	15:30	13,6	13,6	11,7	12,6	15	2,27
1,5	16:00	16,6	16,5	16,6	16,6	15	2,03
2,5	17:00	17,3	17,2	16,6	16,9	15	1,32
18,5	09:00	29,6	29,0	22,3	25,6	15	0,48
19,5	10:00	29,6	30,0	22,3	26,1	15	0,25
20,5	11:00	30,5	30,9	22,3	26,6	15	0,03
21,5	12:00	31,6	32,0	23,2	27,6	15	0,01
23,5	14:00	35,8	34,0	23,2	28,6	15	0,01

Pode-se perceber que por volta de 14:00 do dia 29/05/07 (23 horas e 30 minutos de ensaio), o eletrodo (+) rompe-se.

Pela Figura 5.41, pode-se perceber que a intensidade de corrente tem seu valor máximo, no recalque inicial e decresce até que o ânodo se rompe atingindo seu valor mínimo de 0,01 A.

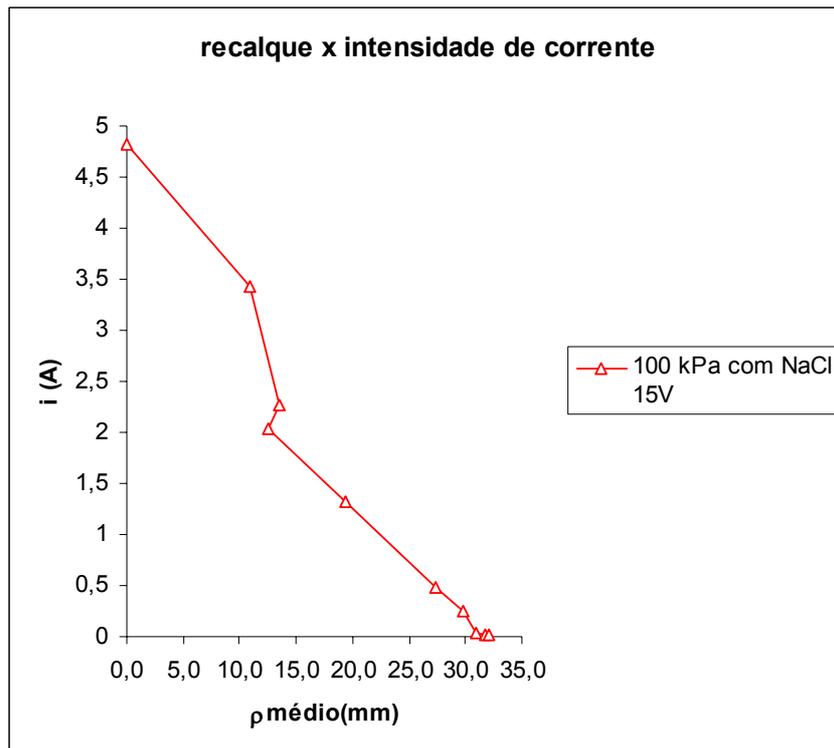


Figura 5.41 – Gráfico recalque x intensidade de corrente do ensaio 11

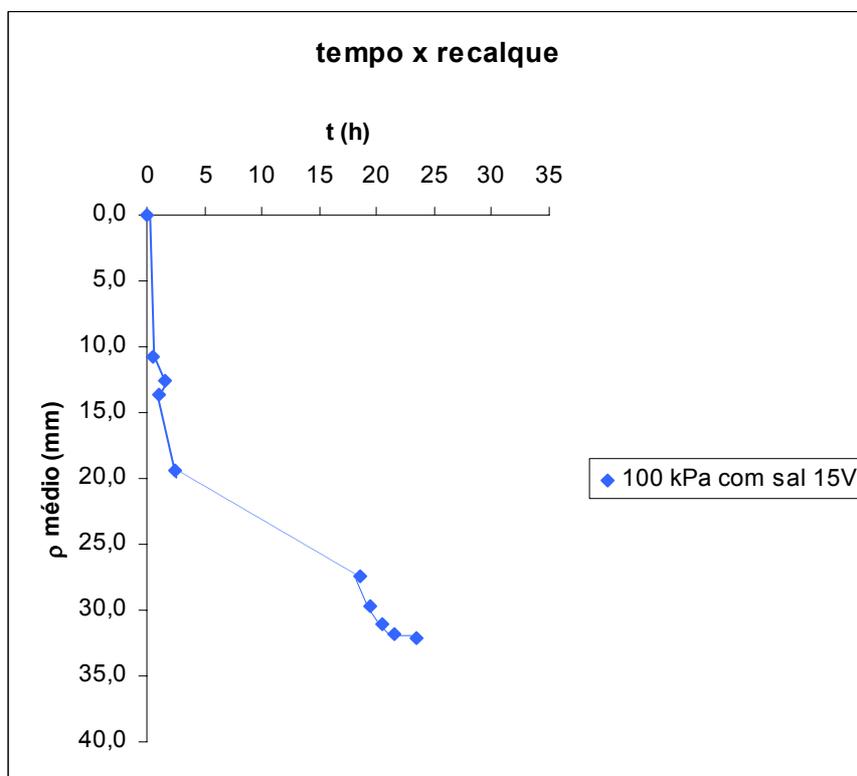


Figura 5.42– Gráfico tempo x recalque do ensaio 11

Tabela 5.22 – Parâmetros encontrados no ensaio 11

Grandeza	Unidade	
Resistência (R)	212,72	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,3305	m
Área da amostra (A)	0,0616	m^2
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	0,25	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	1,63	A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	5,8	mSi/cm
Coefficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	3,41E-09	$m^2/V.s$
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	1,35E-05	$cm^3/A.s$
Consumo de energia elétrica (Pu)	0,70	kWh/m^3
Quantidade de água retirada	0,0040	m^3
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	4,01	kPa
Custo	0,22	$R\$/m^3$

A resistência não drenada inicial é, medida pelo Vane test, igual a 1,82 kPa e a resistência não drenada final é de 4,01 kPa, correspondendo a um aumento de 120,3% em relação a resistência inicial.

Comparando-se ao resultado obtido pelo ensaio 07, podemos observar um aumento da resistência final da ordem de 17,9%.

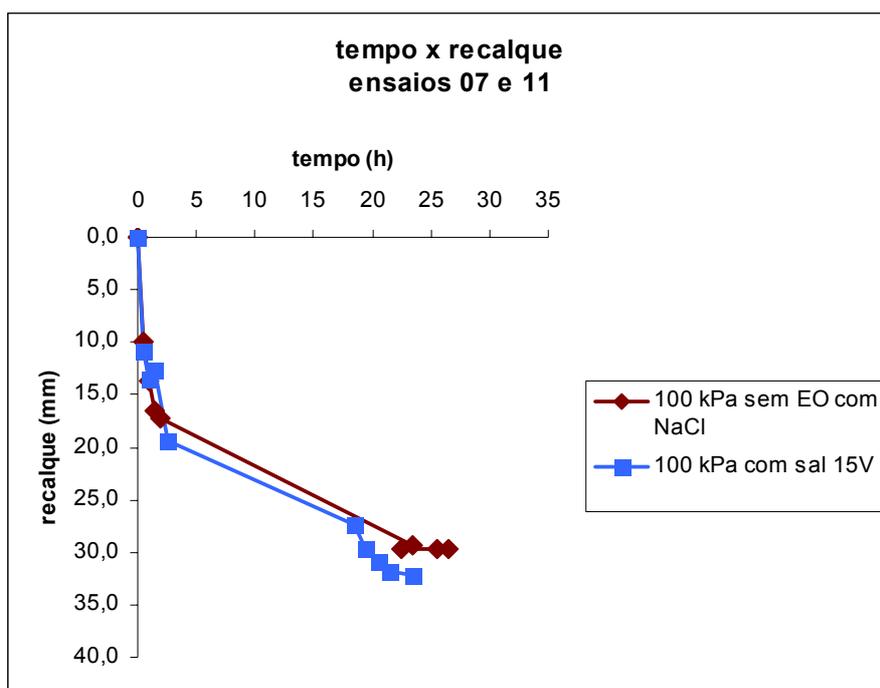


Figura 5.43– Gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 11

Comparando-se os ensaios 07 e 11 percebe-se que, graficamente, eles são semelhantes. O tempo para consolidação do ensaio 11 é 3 horas menor que o ensaio 06, uma diminuição de tempo de 11,3%, sendo os recalques do ensaio 11 da ordem de 4,8% maiores que os do ensaio 07.

5.2.12 ENSAIO 12

Este ensaio foi realizado em 30/05/07 quando a fonte foi ligada. A carga aplicada foi de 100 kPa e a voltagem de 25 V. A duração foi de 7 horas e trinta minutos.

Observa-se que a corrente decresce na primeira hora e meia de ensaio, e após isso aumentou e decresceu para 0,07 A e a tensão caiu, evidenciando um cheiro forte de “queimado” no eletrodo (-) o que levou ao desligamento da fonte. Ao desmontar o ensaio e analisar os eletrodos, confirmou-se que o eletrodo estava completamente desagregado.

Tabela 5.23 – Resultados obtidos no ensaio12

Δt (h)	hora	ρ_1 (mm)	ρ_2 (mm)	ρ_3 (mm)	$\rho_{\text{médio}}$ (mm)	V (V)	i (A)
0	09:30	0,0	0,0	0,0	0,0	25	6,74
0,5	10:00	9,7	8,6	8,5	8,5	25	5,77
1	10:30	16,5	14,3	14,3	14,3	25	3,34
1,5	11:00	20,8	20,8	17,7	19,2	25	3,02
2	11:30	26,2	25,5	18,8	22,2	0,08	8,34
2,5	12:00	27,0	26,3	19,7	23,0	0,02	0,77
3,5	13:00	31,4	30,9	19,8	25,3	0,01	0,77
4,5	14:00	30,9	31,0	20,0	25,5	0,01	0,77
5,5	15:00	33,2	31,0	20,0	25,5	0,01	0,43
6,5	16:00	36,3	31,0	20,0	25,5	0,01	0,43
7,5	17:00	36,3	31,0	20,0	25,5	0,01	0,07

Tabela 5.24 – Parâmetros encontrados no ensaio 12

Grandeza		Unidade
Resistência (R)	2,19	Ω
Comprimento da amostra (L)	0,331	m
Área da amostra (A)	0,0616	m^2
Condutividade elétrica do solo (σ_e)	24,57	mSi/cm
Intensidade de corrente elétrica (i)	2,77	A
Condutividade elétrica aparente (κ_a)	5,9	mSi/cm
Coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (κ_e)	6,02E-08	$m^2/V.s$
Eficiência eletro-osmótica (κ_i)	2,45E-06	$cm^3/A.s$
Consumo de energia elétrica (Pu)	25,46	kWh/ m^3
Quantidade de água retirada	0,0046	m^3
Resistência não-drenada inicial (Su_0)	1,82	kPa
Resistência não-drenada final (Su_f)	4,5	kPa
Custo	6,66	R\$

O consumo de energia elétrica neste ensaio foi superior a todos os outros já realizados, apesar do tempo de realização ser menor e a quantidade de água ser uma das maiores. Ocorreu a degradação do ânodo logo nas primeiras horas. O ensaio continuou até que um forte cheiro vindo do cátodo forçou o encerramento do experimento. A diferença de potencial começou a decrescer na segunda hora de ensaio e a intensidade de corrente aumentou e decresceu até o valor de 0,77 A.

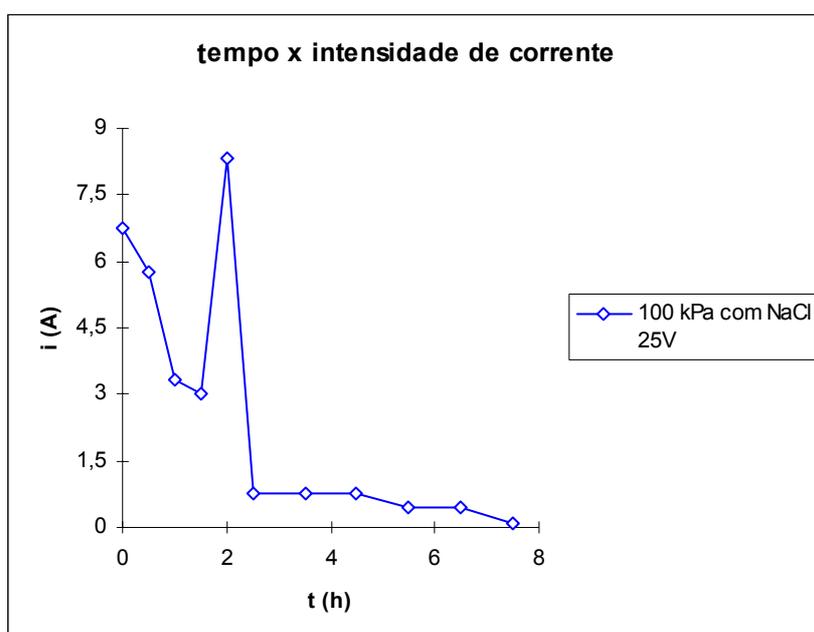


Figura 5.44– Gráfico recalque x corrente do ensaio 12

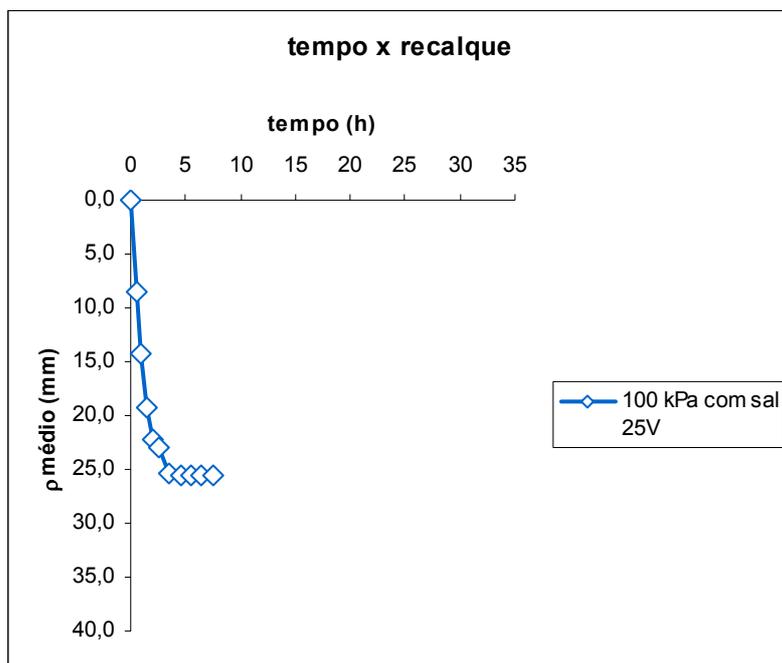


Figura 5.45 – Gráfico tempo x recalque do ensaio 12

Isto evidencia que o diâmetro do fio de cobre usado como eletrodo para este nível de diferença de potencial deve ser ainda maior, para que a reação de oxi-redução dos eletrodos seja retardada, já que não há, na célula eletro-osmótica, a possibilidade de troca do eletrodo.

A resistência não drenada final é, medida pelo Vane test, igual a 4,5 kPa, correspondendo a um aumento de 147,3% em relação a resistência inicial. Comparando-se ao resultado obtido pelo ensaio 07, observaremos um aumento da resistência final da ordem de 17,9%.

A Figura 5.46 mostra o gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 12.

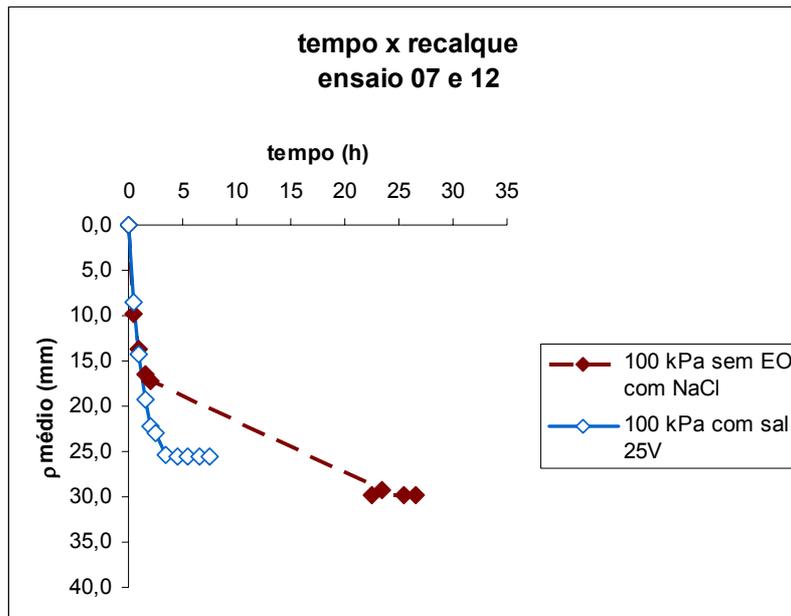


Figura 5.46 – Gráfico comparativo entre os ensaios 07 e 12

Caso o eletrodo não se rompesse, provavelmente este ensaio seguiria como o ensaio de 15 V, pois a tendência dele era seguir próximo à curva do ensaio 07, apesar disso só poder ser comprovado com o aumento do diâmetro do eletrodo, o que não foi possível pela falta de tempo e pela dificuldade em se encontrar o cobre no diâmetro maior.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS

5.3.1 ENSAIOS COM 50 kPa

Quanto à comparação de tempo de consolidação e recalque obtido, podemos observar na Figura 5.47 que o ensaio com a carga de 50 kPa sem EO com NaCl, apresenta um recalque menor e também um tempo grande para que essa consolidação aconteça.

Observa-se também, que no ensaio 01 (50 kPa sem NaCl e com EO a uma diferença de potencial de 10 V) é apresentada uma consolidação muito pequena devido a corrente que

passa pela massa de solo ser da ordem de 4 mA, não sendo propícia para a aplicação da técnica; quando se acrescenta NaCl na água percebe-se que a corrente sofre um aumento significativo passando a ser da ordem de 1,34 A, sendo mais favorável ao uso da técnica, como podemos observar na Figura 5.50 e que o recalque sofre um aumento considerável. Sendo o melhor resultado o obtido com os ensaios 03 e 06, que geraram um aumento de 20,33% na resistência não drenada (S_u), conforme se pode verificar na Figura 5.51. Espera-se que, nos ensaios de campo, essa tendência se comprove.

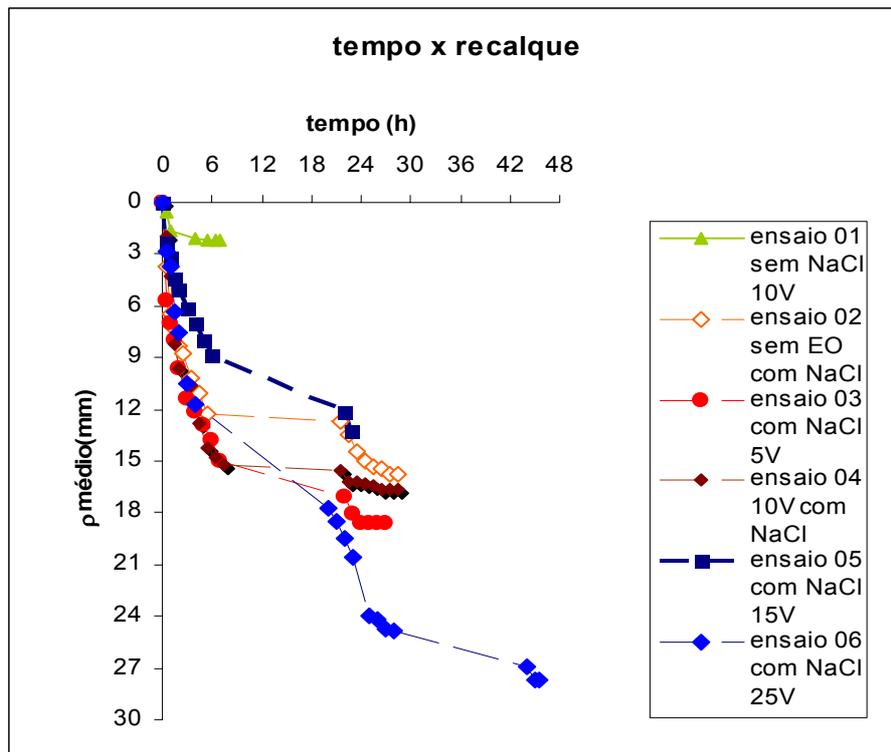


Figura 5.47 – Comparação tempo x recalque obtidos nos ensaios com 50 kPa

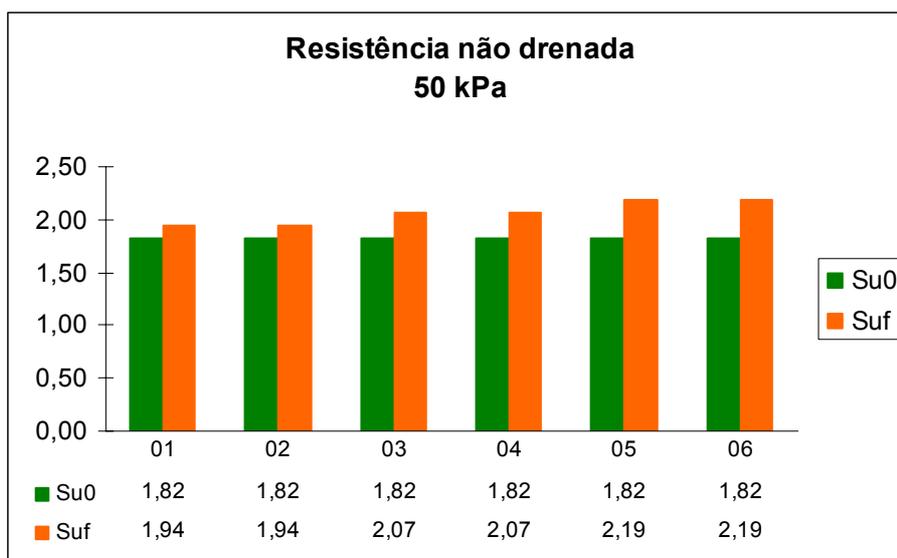


Figura 5.48 – Variação da Su na carga de 50 kPa

Na Figura 5.48 a legenda 1 refere-se ao ensaio 01, a 2 ao ensaio 02, e assim sucessivamente até a legenda 6 que refere-se ao ensaio 06.

Em consulta ao site da CEB (Companhia Energética de Brasília), no link orientação ao cliente → tarifas → Tarifas do Grupo A convencional - Grupo B e Taxas de Serviço, encontramos o valor médio de valor de 1kWh igual a R\$ 0,3083639 e usamos este valor para calcular o custo do processo por unidade de volume (m^3). Os custos de eletricidade no ensaio são mostrados na Tabela 5.25 e que também se mostra a energia elétrica consumida para a realização do ensaio. O menor valor encontrado, em negrito na tabela, refere-se ao ensaio sem a adição de NaCl.

Tabela 5.25 Energia elétrica e custos dos ensaios – 50kPa

Ensaio	Carga (kPa)	V (V)	Pu (kWh/ m^3)	Custo (R\$/ m^3)
01	50	10	0,0167	0,005
03	50	5	9,104	2,81
04	50	10	19,62	6,05
05	50	15	10,40	3,21
06	50	25	35,61	10,98

5.3.2 ENSAIOS COM 100 kPa

Nos ensaios com carga de 100 kPa, analisando a Figura 5.49, nota-se que os ensaios com NaCl e diferença de potencial de 15 V e com NaCl sem EO têm comportamento similar, as curvas são parecidas embora a curva do ensaio com NaCl tem consolidação um pouco maior que o ensaio sem NaCl.

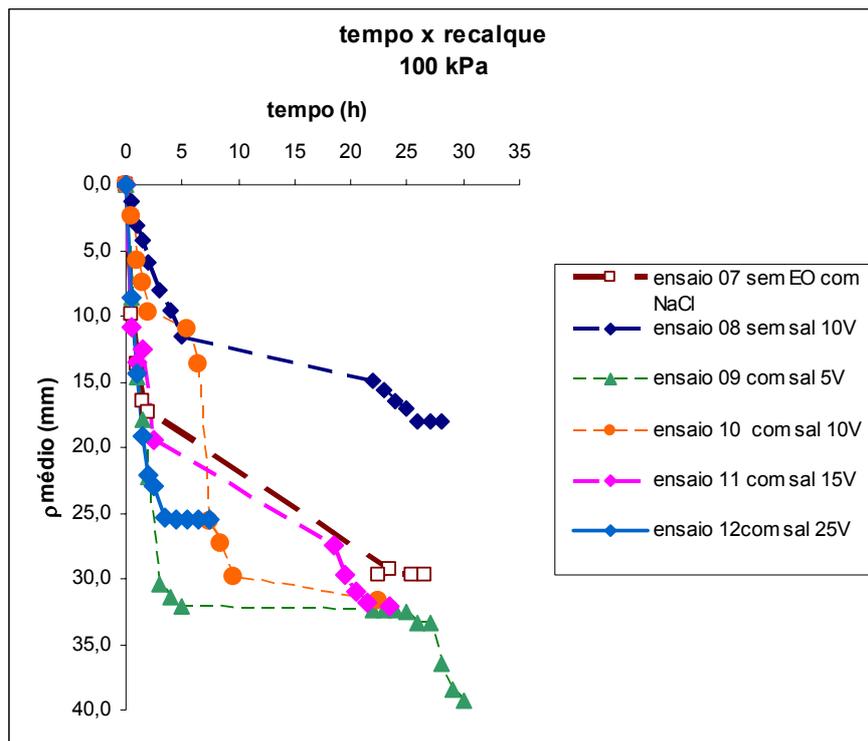


Figura 5.49 - Comparação tempo x recalque obtidos nos ensaios com 100 kPa

A Tabela 5.26 apresenta os resultados dos custos e o consumo de energia elétrica gastos para a realização dos ensaios de carga 100 kPa e indicando também a energia elétrica consumida para a realização do ensaio. O menor valor encontrado (em negrito, na tabela) refere-se ao ensaio sem NaCl, onde a resistência não se alterou muito em relação ao ensaio sem EO, neste sentido sugere-se que a melhor voltagem a ser usada em termos de custo-benefício é a de 10 V, pelo fato da resistência final ser uma das maiores, o tempo de consolidação ser 15,1% menor que sem a EO e o custo ser de R\$2,53 por m³ de solo tratado. O ensaio com diferença de potencial de 25 V foi realizado em pouco tempo pelo rompimento do ânodo e pela falta de um fio de cobre de diâmetro maior ser encontrada nas casas especializadas.

Tabela 5.26 - Energia elétrica e custos dos ensaios – 100kPa

Ensaio	V (V)	Pu (kWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
08	10	0,053	0,02
09	5	2,73	0,84
10	10	8,21	2,53
11	15	0,70	0,22
12	25	25,46	6,66

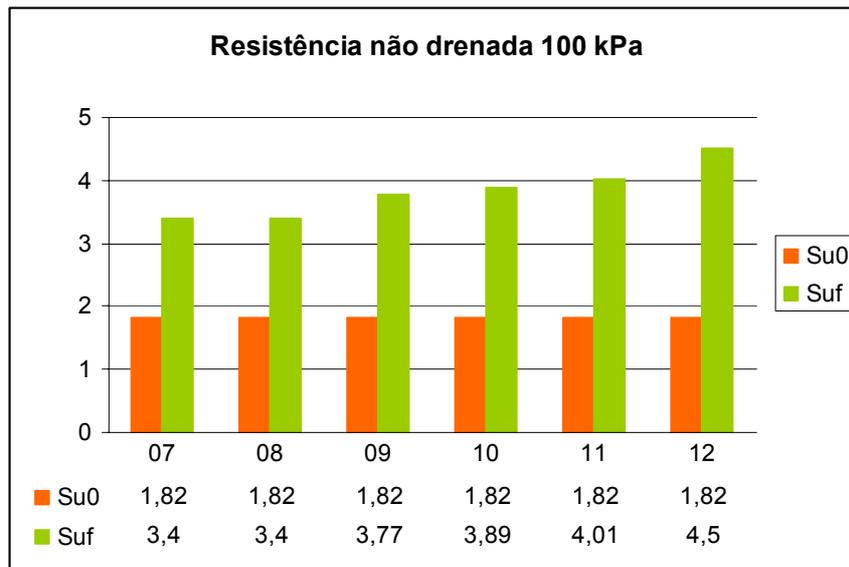


Figura 5.50 - Variação da Su na carga de 100 kPa

Na Figura 5.50, percebe-se que os ensaios sem EO (ensaio 07) e sem NaCl com EO (ensaio 08) na carga de 100kPa tem variação igual da resistência não drenada (S_u) inicial e final de 86,8%, enquanto que na variação de 5V a variação atinge 107,1% e 10 V o aumento foi de 113,7% e nos ensaios 10 e 11 (15 e 25 V), o aumento na S_u foi de 120,3% e 147,3 respectivamente.

No campo, espera-se que a aplicação destas mesmas tensões e cargas produzam resultados similares aos encontrados em laboratório com relação ao aumento da resistência do solo e na aceleração de sua consolidação.

5.3.3 RESULTADOS FINAIS

Os valores mostrados nas Tabelas 5.27 e 5.28 (mostradas no apêndice A) apresentam os resultados finais dos ensaios realizados. A corrente exibida na Tabela é a média de todas as correntes encontradas durante cada ensaio, a resistência é encontrada usando-se a Lei de Ohm e depois se calculando a média. Q_e é a quantidade de água retirada no ensaio, em m^3 , calculada através da variação de umidade. Os outros valores foram encontrados usando-se as equações 2.5 a 2.9 do capítulo 2.

Nos ensaios com carga de 100 kPa, analisando a Figura 5.49 do item anterior, nota-se que os ensaios com NaCl (ensaios 09, 10, 11 e 12) e sem NaCl sem EO (ensaio 07) têm comportamento similar, as curvas são parecidas embora a curva do ensaio com NaCl tem consolidação maior que o ensaio sem NaCl. O ensaio sem NaCl e com EO (ensaio 08) tem um recalque menor que os ensaios com a adição do sal. A diferença de potencial aplicada influenciou na aceleração do recalque, provavelmente pode-se dizer que quanto maior a voltagem aplicada é maior a consolidação conseguida no solo.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

Os ensaios de condutividade mostram que na amostra ensaiada, com umidade em torno do limite de liquidez, a condutividade elétrica aumenta e ocorre um decréscimo do pH. Com o aumento da salinidade ocorre aumento da condutividade do solo e uma diminuição do pH. Nota-se que quando a corrente elétrica atravessa a massa de solo de um eletrodo para o outro, a água contida no solo migra parcialmente do ânodo para o cátodo. Esse movimento é devido a carga negativa que as partículas das argilas carregam. Quando se aplica a diferença de potencial, ocorre a eletrólise da água, o que pode ser observado pela formação de bolhas de ar no cátodo pela saída de gás hidrogênio. A corrente decresce ao longo do ensaio devido à corrosão eletroquímica que ocorre no ânodo.

Em diferenças de potencial elevadas, ocorreu a aceleração do processo de corrosão eletroquímica no ânodo, configurando-se pela produção de um sal verde provocando a quebra do eletrodo de cobre, o que, para minimizar, poderia se aumentar o diâmetro do fio. Nos ensaios realizados sem a adição de NaCl e com o uso de EO, a consolidação apresentada é muito pequena devido a corrente que passa pela massa de solo ser da ordem de miliamperes (mA), não sendo propícia para a aplicação da técnica; O acréscimo de sal causa um aumento significativo na corrente, passando a ser da ordem de amperes (A), tornando-se mais favorável ao uso da técnica, além de, na maioria dos ensaios ainda ocorrer um aumento significativo dos recalques.

Ocorre também aumento significativo das resistências não drenadas (S_u) finais com a aplicação da técnica, provando que a técnica é muito eficiente no aumento deste parâmetro. Os recalques foram cerca de 20% maiores com o uso de eletro-osmose do que os recalques sem o uso da técnica, uma exceção são os ensaios 01, 05 e 08. No ensaio 05 houve o rompimento do ânodo e isso causou o recalque menor que o esperado. Já nos ensaios 01 e 08, trata-se de ensaio realizado sem a adição de sal à água, onde a técnica é ineficiente.

Quanto aos custos, muito embora tenham sido estimados de forma aproximada, nota-se que os valores mais baixos ocorreram nos ensaios sem sal, porque a intensidade de corrente era muito baixa, não sendo viável seu uso, pois não traz grandes acréscimos de resistência e aumentos de recalques.

Através da ao site da CEB (Companhia Energética de Brasília) foi possível fazer uma estimativa dos custos com a realização do ensaio e tentar estendê-lo ao que pode ser feito no campo. O valor mais baixo encontrado nos ensaios com carga de 50 kPa (Tabela 5.23) refere-se ao ensaio sem NaCl (ensaio 01), onde a resistência não se alterou muito em relação ao ensaio sem EO (ensaio 02), neste sentido supõe-se que a melhor voltagem a ser usada em termos de custo-benefício é a de 5 V, pelo fato de a resistência final ser uma das maiores com aumento de 13,7% em relação a resistência não drenada final do ensaio sem EO, o tempo de consolidação ser 5,3% menor que sem a EO e o custo ser de R\$ 2,81 por m³ de solo tratado, muito embora este valor deva ser testado em campo. Nos ensaios com carga de 100 kPa a diferença de potencial aplicada influenciou na aceleração do recalque, provavelmente pode-se dizer que quanto maior a voltagem aplicada é maior a consolidação conseguida no solo. Mas, apesar disso, existem empecilhos com o eletrodo que se rompe facilmente sob esta diferença de potencial.

Os valores em negrito nas Tabelas 5.27 e 5.28 (ensaios 01 e 08) representam os ensaios com eletro-osmose sem o uso de NaCl, nota-se que a corrente elétrica é muito pequena, percebendo-se claramente que a adição de NaCl aumenta a corrente elétrica e, conseqüentemente, a ação da técnica de eletro-osmose no solo. Também nota-se que os ensaios sem eletro-osmose na carga de 50kPa têm variação pequena da resistência não drenada (S_u) inicial e final de 6,59%, enquanto que nas variações de 5V e 10 V (ensaios 02 e 03) com NaCl e com EO (no gráfico da Figura 5.51, itens 3 e 4) o aumento foi de 13,74% e nos ensaios 04 e 05 (15 e 25 V) que correspondem aos itens 5 e 6 da Figura 5.51, o aumento na S_u foi de 20,33%. No campo, espera-se que a aplicação destas mesmas diferenças de potencial e cargas produzam resultados similares aos encontrados em laboratório no aumento da resistência do solo e na aceleração de sua consolidação.

Os valores de κ_e e κ_i são coerentes com os já encontrados na literatura. O coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica está situado nos limites encontrados por Mitchell (1976) e os valores da eficiência eletro-osmótica nos limites de Acar *et al* (1995).

No campo, espera-se que a aplicação destas mesmas diferenças de potencial e cargas produzam um resultado similar ao encontrado em laboratório com relação ao aumento da resistência do solo e na aceleração de sua consolidação.

Acredita-se que a corrosão apresentada no extensômetro, no ensaio 03, se deva a alguma reação química entre a liga do extensômetro e a mistura solo-água-NaCl combinada com a eletricidade e, também devido ao fato da fonte ter ficado ligada o tempo todo de ensaio.

6.2 SUGESTÕES

Através dos resultados obtidos nesta pesquisa, podem-se fazer as seguintes sugestões:

1. Realizar ensaios com as cargas de 10 kPa e 25 kPa com variação de tensão de 5 a 30V com adição de sal nas variações de 5, 10,20 e 33 g/l e com o uso de polaridade reversa;
2. Realizar estudos com eletrodos diferentes e diâmetros maiores para encontrar o mais conveniente para o uso da técnica de acordo com a relação custo-benefício para evitar a corrosão eletroquímica;
3. Testar os resultados obtidos com a célula eletro-osmótica em ensaios de campo com o uso de caixas e piscinas experimentais, de modo a avaliar a eficácia da técnica em ensaios de campo;
4. Avaliar a variação de pH com o aumento da salinidade durante a realização do ensaio e analisar sua influência no processo;
5. Automatizar as medidas de recalque e aplicação de carga;
6. Analisar outros solos para avaliar a eficiência do processo em relação às características geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (1984). Solo – Análise granulométrica - Método de ensaio, NBR 7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 8p.

Abdel-Meguid, M.; El Naggar, M.H.; Shang, J.Q. (1999). Axial response of piles inelectrically treated clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 418-429.

Acar, Y.B., Gale, R.J., Alshawabkeh, A.N., Marks, R.E., Puppala, S., Bricka, M. & Parker, R.A. (1995). Electrokinetic remediation: Basics and technology status. *Journal of Hazardous Materials*, 40. 117- 137

Acar, Y.B., Alshawabkeh, A.N. & Parker, R.A. (1997). Theoretical and Experimental Modeling of Multi-Species Transport in Soils, EPA/600/R-97/054. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati. OH 45268. 290 p.

Ballou, E.V. (1955). “Electroosmotic Flow in Homoionic Kaolinite.” *Journal of Colloid Science* 10(5): 450-460.

Bergado, D.T., Balasubramaniam, A.S., Patawaran, M.A.B. & Kwunpreuk, W. (2000). Electro-osmotic consolidation of soft Bangkok clay with prefabricated vertical drains, *Ground Improvement*, 4:153-163.

Casagrande, L., (1949), *Electro-Osmosis in Soils*, *Geotechnique*, Vol. 1, No. 3, p.159-177.

CEB. (http://www.ceb.com.br/CebNovo/Ceb/Ceb/area.cfm?id_area=57&nivel=2). Acessado em 26/06/2007

Chew, S.H.; Karunatatne, G.P.; Kuma V.M.; Lim,L.H.; Toh, M.L.; Hee, A.M. (2004). A field trial for soft clay consolidation using electric vertical drains. *Geotextiles and Geomembranes*, 22: 17 – 35.

Cunha, R.P. (1988). Análise da ruptura de um aterro sanitário sobre a argila mole do Caju. Dissertação de Mestrado. COPPE-UFRJ. 241 p.

Deotti, L.O.G. (2005). Controle de PH na Técnica de Biorremediação Eletrocínética. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ. 126 p.

Esrig, M.I. (1968). Pore pressure, consolidation and electrokinetics. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* 94 (SM4), 899 – 922.

Finno, R. J., Chung, J., Feldkamp,J.R. (1996) Coefficient of Permeability from Ac Electro-osmosis Experiments. I: Theory. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 122, N° 5, 346-354.

Finno, R. J., Chung, K., Yin, J., Feldkamp,J.R. (1996) Coefficient of Permeability from Ac Electro-osmosis Experiments. II: Results. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 122, N° 5, 355-364

Gray, D.H. & Mitchell, J.K. (1967). Fundamental aspects of electro osmosis in soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE* 93 (SM 3), 875 – 879.

Hamed, J., Acar, Y.B., and Gale, R.J. (1991). Pb(II) removal from kaolinite using electrokinetics. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 117, N° 2, 241-271.

Hamed, J. T. and Badra, A. Influence of current density and pH on electrokinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 55 (1997) 279-294

Hamir, R.B., Jones, C.J.F.P. & Clarke, B.G. (2001). Electrically conductive geosynthetics for consolidation and reinforced soil, *Geotextiles and Geomembranes*. 19: 455–482.

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.

Huang, C.P., Cha, D., Chang, J., Quiang, Z., Sung, M. & Chiang, Y. (1999). *Electrochemical Processes for In-situ Treatment of Contaminated Soils*. Department of Civil and Environmental Engineering University of Delaware. Newark, Delaware 19716. 111 p.

Lamont-Black, J. (2001). EKG: the next generation of geosynthetics. *Ground Engineering*, 22 - 23.

Lo, K.Y.; Incullet, I.I.; Ho, K.S. (1991a). "Electroosmotic Strengthening of Soft Sensitive Clays." *Canadian Geotechnical Journal* 28: 62-73.

Lo, K.Y.; Ho, K.S.; Incullet, I.I. (1991b). "Field Test of Electroosmotic Strengthening of Soft Sensitive Clay." *Canadian Geotechnical Journal* 28: 74-83.

Karunaratne, G.P., Chew, S.H., Lim, L.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*. Nice, France, n: 1043-1046.

Micic, S.; Shang, J.Q.; Lo, K.Y.; Lee, Y.N.; Lee, S.W. (2001). Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current. *Canadian Geotechnical Journal* 38: 287-302.

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: J Wiley. 435 p.

Monterroso, B. M.R. (2002). *Estudo da eletro-osmose em solos residuais desenvolvimento de equipamento e metodologia de ensaio*. Dissertação de Mestrado. PUC/Rio, Rio de Janeiro, RJ.96 p.

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.

Napier, J., (1846), *Phil. Mag.*, Vol. 29, No 10.

Pamukcu, S.,(1997) "Electro-Chemical Technologies for In-Situ Restoration of Contaminated Subsurface Soils". <http://www.ejge.com/1997/Ppr9704/Abs9704.htm>. Consulted in 15/12/2006.

Quincke, G., (1861) Pogg. Ann. Physik, Vol. 113, 513.

Reuss, F.F. (1809), "Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique." Mémoires de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou, Vol. 2, 327-337.

Schmid, G. (1950), Zur electrochemie feinporiger kapillarsystemen. Zhurnal fur Electrochemie, Vol 54, 424-434.

Schmid, G., (1951). Zur electrochemie feinporiger kapillarsystemen. Zhurnal fur Electrochemie, Vol. 55, 684-694.

Schmidt, C.A.B. (2004). Aplicação de Técnica Eletrocinética em Laboratório a Dois Tipos de Solos Argilosos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ. 336 p.

Shang, J.Q. (1997) Zeta potential and electroosmotic permeability of clay soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol 34, 627-631.

Shang, J.Q., Lo, K.Y., Incullet, I.I. (1995) Polarization and conduction of clay water electrolyte systems. Journal of the Geotechnical Engineering Division ASCE 121, N° 3, 243-248.

Smoluchowski, N. von, (1921), Handbuch der Elektricität und des Magnetismus, Barth, J.A. ed., Leipzig, Germany, Vol. 2, 366-428.

Spiegler, K.S. (1958), "Transport processes in ionic membranes" Transactions of the Faraday Society, Vol. 54. Part 9, 1408-1428.

Stern, O., Z. Electrochemistry, 30, 508 (1981)

Wan, T.Y., and Mitchell, J.K. (1976). Electro-Osmotic Consolidation of Soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division 102 (GT5), 473-491.

Waxman, M.H., and Smits, L.J.M., (1967), "Electrical Conductivities in Oil Bearing Shaly Sands," Soc. of Petroleum Engineers, Proc. of 42nd Annual Fall Mtg., Houston, Tx., SPE-1863-A, pp. V-145-V-160.

Yeung, A.T., (1994). Electro-kinetic flow process in porous media and their applications. Advances in Porous Media 2, pp. 307-393.

APÊNDICE A

Tabela 5.27 – Resultados finais dos ensaios com carga 50 kPa

Ensaio	V (V)	$i_{m\acute{e}dia}$ (A)	R (Ω)	Q_e (m ³)	σ_e (mSi/cm)	κ_a (Si/cm)	κ_e (m ² /V.s)	κ_i (cm/A.s)	Su_0 (kPa)	Su_f (kPa)	tempo (h)	Pu (kWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
01	10	0,00411	2494,64	0,0008	0,018	0,019	1,93E-08	0,02	1,82	1,94	7	0,0167	0,005
02	0	0	0	0,0018	0	0	0	0	1,82	1,94	28,5	0	-
03	5	1,33	4,42	0,0020	11,76	13,81	9,24E-09	29,9	1,82	2,07	27	9,104	2,81
04	10	1,34	26,57	0,0036	1,92	6,83	5,72E-09	23,9	1,82	2,07	28,5	19,62	6,05
05	15	0,57	167,65	0,0042	0,29	1,88	3,42E-09	11,01	1,82	2,19	22,67	10,40	3,21
06	25	0,66	199,39	0,0044	0,28	1,47	1,38E-09	21,33	1,82	2,19	45,5	35,61	10,98

Tabela 5.28 – Resultados finais dos ensaios com carga 100 kPa

Ensaio	V (V)	$i_{m\acute{e}dia}$ (A)	R (Ω)	Q_e (m ³)	σ_e (mSi/cm)	κ_a (mSi/cm)	κ_e (m ² /V.s)	κ_i (cm/A.s)	Su_0 (kPa)	Su_f (kPa)	tempo (h)	Pu (kWh/m ³)	Custo (R\$/m ³)
07	0	0,00000	0	0,0044	0	0	0,00E+00	0	1,82	3,4	26,5	0	-
08	10	0,0038	2687,98	0,0048	19,6	19,9	5,42E-09	0,0735	1,82	3,4	28	0,053	0,02
09	5	0,37	26,88	0,0048	2,01	4,02	9,58E-09	8,39	1,82	3,77	30	2,73	0,84
10	10	0,75	142,86	0,0052	0,38	4,03	6,98E-09	11,55	1,82	3,89	22,5	8,21	2,53
11	15	1,63	212,72	0,0040	0,25	5,82	3,41E-09	34,13	1,82	4,01	23,5	0,70	0,22
12	25	2,77	2,19	0,0045	24,57	5,94	6,02E-08	9,88	1,82	4,5	7,5	25,46	6,66

Tarifas do Grupo B

Consumo		ICMS	R\$/kWh
B1 - Res. Baixa Renda até 50 kWh	Até 30 kWh	Isento	0,0902929
	De 31 a 50 kWh	Isento	0,1547893
B1 - Residencial Baixa Renda 51 a 200 kWh	Até 30 kWh	12%	0,1035810
	De 31 a 80 kWh	12%	0,1775692
	De 81 a 100 kWh	12%	0,1784277
	De 101 a 180 kWh	12%	0,2676845
	De 181 a 200 kWh	12%	0,2973877
B1 - Residencial até 50 kWh		Isento	0,2667628
B1 - Residencial de 51 a 200 kWh		12%	0,3060215
B1 - Residencial de 201 a 300 kWh		17%	0,3260125
B1 - Residencial de 301 a 500 kWh		21%	0,3439895
B1 - Residencial acima de 500 kWh		25%	0,3640647

Consumo (Alíquota do ICMS)	Até 50 kWh(0%)	51 a 200 (12%)	201 acima (17%)
B2 - Rural	0,1607013	0,1843512	0,1963940
B2 - Cooperativa de eletrificação rural	0,1096643	0,1258032	0,1340214
B2 - Madrugada - irrigação (redução de 67%)		0,0608359	0,0648100
B3 - Serviço de Saneamento (redução de 15%)		0,2621093	0,2792317
B4a - Iluminação Pública (entrega no poste)		0,1515820	0,1614841
B4b - Iluminação Pública (entrega na lâmpada)		0,1663232	0,1771883
Consumo (Alíquota do ICMS)	Até 200 (12%)	201 a 1000 (17%)	1001 acima (21%)
B3 - Comercial/Industrial	0,3083639	0,3285079	0,3466225
Consumo (Alíquota do ICMS)	Até 200 (12%)	201 a 500 (17%)	501 acima (25%)
B3 - Poder Público	0,3083639	0,3285079	0,3668514

Tarifas do Grupo A - Convencional

Consumo (Alíquota do ICMS)	Até 200 (12%)		201 acima (17%)			
	R\$/kW	R\$/kWh	R\$/kW	R\$/kWh		
A4 - Rural (redução de 10%)	21,1147902	0,1464348	22,4941207	0,1560007		
A4 - Madrugada (redução de 80%)	-	0,0325410	-	0,0346668		
A4 - Cooperativa (redução de 50%)	11,7304390	0,0813527	12,4967337	0,0866671		
A4 - Saneamento (redução de 15%)	20,9112092	0,1450233	22,2772406	0,1544969		
A4 - CELG (sem ICMS)	13,7374385	0,0385503				
A4 - Comercial/Indust/P.Público	24,6014226	0,1706156				
A4 - Residencial	23,4608780	0,1627054				
AS - Comercial/Indust/P.Público	36,3502575	0,1785749				
AS - Residencial	34,6578366	0,1702967				
Consumo (Alíquota do ICMS)	201 a 1000 (17%)		1001 acima (21%)			
A4 - Comercial/Industrial	26,2085184	0,1817611	27,6537082	0,1917838		
AS - Comercial/Industrial	38,7248497	0,1902403	40,8602150	0,2007306		
Consumo (Alíquota do ICMS)	201 a 500 (17%)		501 acima (25%)			
A4 - Poder Público	26,2085184	0,1817611	29,2675809	0,2029763		
AS - Poder Público	38,7248497	0,1902403	43,2448205	0,2124452		
Consumo (ICMS)	201 a 300 (17%)		301 a 500 (21%)		501 acima (25%)	
A4 - Residencial	24,9934674	0,1733342	26,3716570	0,1828921	27,9107090	0,1935658
AS - Residencial	36,9218709	0,1814214	38,9578163	0,1914254	41,2313977	0,2025970

Taxas de Serviço

Serviços (em R\$)	Mono	Bi	Tri	Grupo A
Vistoria	3,48	4,98	9,96	29,90
Aferição de medidor	4,48	7,47	9,96	49,85
Verificação nível de tensão	4,48	7,47	8,97	49,85
Religação normal	3,97	5,47	16,43	49,85
Religação de urgência	19,93	29,90	49,85	99,69
Segunda via	1,48	1,48	1,48	2,98

Legislação Vigente

Pis/Pasep (1,15%) + Cofins (5,31%)	=	6,46
Resolução nº 456/2000 da Aneel - Critérios para fornecimento de energia		
Desconto p/ serviços de saneamento: Decreto 62.724, de 23.12.88		
Tarifa da Madrugada: Portaria 105/92-DNAEE, de 03.04.92		
ICMS: Lei 7, de 29.12.88; Decreto 16.102, 30.11.94; Lei 987, 18.12.95		
Tarifas de Energia: Resolução 368/2006-ANEEL, de 22.08.2006		
Taxas de Serviços: Resolução 368/2006-ANEEL, de 22.08.2006		
Tarifa CEB/CELG: Resolução 179/2005-ANEEL, de 24.08.2005		
CIP: Decreto GDF Nº 24324 de 29.12.2003		
ENCAPEME: Resolução 496/2003-ANEEL, de 26.09.2003		