



APLICAÇÃO DA ELETROCINÉTICA EM UM SOLO TROPICAL: ANÁLISE DA  
INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA SOBRE O FLUXO ELETRO-OSMÓTICO

Juliana Fernandes dos Santos Garcia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Maria Claudia Barbosa

Rio de Janeiro  
Junho de 2017

APLICAÇÃO DA ELETROKINÉTICA EM UM SOLO TROPICAL: ANÁLISE DA  
INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA SOBRE O FLUXO ELETRO-OSMÓTICO

Juliana Fernandes dos Santos Garcia

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

---

Profª Maria Claudia Barbosa, D.Sc.

---

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

---

Dr. Luiz Carlos Bertolino, Ph.D.

---

Profª Celina Aída Bittencourt Schmidt, D.Sc.

---

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira e Castro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JUNHO DE 2017

Garcia, Juliana Fernandes dos Santos

Aplicação da eletrocinética em um solo tropical: análise da influência da mineralogia sobre o fluxo eletro-osmótico/Juliana Fernandes dos Santos Garcia – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVI, 126 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadora: Maria Claudia Barbosa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 99-116.

1. Eletrocinética. 2. Solos Tropicais. 3. Eletro-osmose.  
I. Barbosa, Maria Claudia. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

Ao meu marido Carlos  
Rosemberg e aos meus pais  
Lourival e Rosangela.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu marido Carlos Rosemberg, por todo amor, companheirismo e por não medir esforços para que eu consiga realizar todos os meus sonhos.

Aos meus pais Lourival e Rosangela, ao meu irmão Gabriel e ao meu avô Oswaldo pelo incentivo e amor incondicional.

À minha orientadora Professora Maria Claudia Barbosa pela oportunidade, apoio, ensinamentos e pelo respeito.

Ao Centro de Tecnologia Mineral, em especial, aos pesquisadores Luiz Carlos Bertolino e Vitor Brandão e ao técnico Josimar Firmino pelo auxílio nas análises de Difractometria de Raios-X.

À Embrapa Solos, em especial à aluna Shirley Oliveira por compartilhar seus conhecimentos e possibilitar a realização da Capacidade de Troca Catiônica do meu solo.

À Maria da Glória Marcondes, pelas muitas conversas, ajudas e análises realizadas no Laboratório de Química. Obrigada por toda dedicação e por preparar o Yuri para dar continuidade ao seu excelentíssimo trabalho. Ao Yuri por toda ajuda, todas as análises e por toda dedicação e disponibilidade de sempre.

A todos do Laboratório de Geotecnia, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho. Em especial, aos técnicos Luiz Almeida, Luiz Carlos de Oliveira e ao Sérgio Iório. À secretária Alice e principalmente à Andreia, por serem sempre tão solícitas.

Aos queridos alunos e amigos da geotecnia, pela ajuda, por compartilharem conhecimento e por estarem sempre presentes durante estes dois anos, em especial, à Carla Fabris, por ter compartilhado parte do seu conhecimento e material de eletrocinética. À Camila Coelho, que além de compartilhar conhecimento esteve sempre disposta a ajudar. À Glorinha, por ter dividido tantos momentos, dificuldades e aprendizados, além das caronas irrecusáveis para Niterói. Ao Alex por “cuidar” do meu adensamento por muitas vezes. À Clarisse, Lorena e Marcelo.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos para o desenvolvimento da pesquisa.

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

## APLICAÇÃO DA ELETROKINÉTICA EM UM SOLO TROPICAL: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA SOBRE O FLUXO ELETRO-OSMÓTICO

Juliana Fernandes dos Santos Garcia

Junho/2017

Orientadora: Maria Claudia Barbosa

Programa: Engenharia Civil

A técnica eletrocinética foi aplicada em um solo caulínico, proveniente de Rondônia. Foram reconstituídas em laboratório amostras homogeneizadas e menos rígidas a partir de amostras indeformadas e então preparada uma mistura para realização do presente estudo. A mistura utilizada neste estudo se mostrou representativa dos solos originais. Os experimentos foram conduzidos em célula eletrocinética unidimensional com condições de drenagem do tipo anodo e catodo abertos. Foram utilizadas três soluções para homogeneização e para abastecimento dos tanques e reservatórios da célula eletrocinética com diferentes pHs. Além dos ensaios eletrocinéticos foram medidas as propriedades térmicas do solo e realizada a curva de retenção do mesmo através do Hyprop. Os resultados indicaram que a estrutura do influenciou o comportamento do solo durante os ensaios eletrocinéticos. Os valores de resistividade elétrica foram bem menores quando comparado com resultados para solos estruturados. Em relação aos parâmetros geotécnicos, as amostras apresentaram limites de liquidez e plasticidade inferiores ao valor sem a adição da técnica. O pH das soluções utilizadas teve influência sobre o fluxo eletro-osmótico, não somente em sua magnitude mas também na sua direção.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ELECTROKINETICS APPLIED TO A TROPICAL SOIL: ANALYSIS OF THE  
INFLUENCE OF SOIL MINERALOGY ON ELECTROOSMOTIC FLOW

Juliana Fernandes dos Santos Garcia

June/2017

Advisor: Maria Claudia Barbosa

Department: Civil Engineering

The electrokinetic technique was applied in a kaolinite soil, from the State of Rondônia. Homogenized and less rigid samples were reconstituted from the laboratory from unsaturated samples and a mixture was then prepared for carrying out the present study. The mixture used in this study was representative of the original soils. The experiments were conducted in a one - dimensional electrokinetic cell with open anode and cathode drainage conditions. Three solutions were used to homogenize and to supply the tanks and reservoirs of the electrokinetic cell with different pHs. In addition to the electrokinetic tests, the thermal properties of the soil were measured and the retention curve was determined with Hyprop equipment. The results indicated that the structure influenced the soil behavior during the electrokinetic tests. The values of electrical resistivity were much lower when compared to results for structured soils. Regarding the geotechnical parameters, the samples presented liquidity and plasticity limits lower than the value without the addition of the technique. The pH of the solutions used had influence on the electroosmotic flow, not only in its magnitude but also in its direction.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS .....	2
1.2. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS .....	2
<b>2. FUNDAMENTOS.....</b>	<b>4</b>
2.1. SOLOS TROPICAIS .....	4
2.1.1. Caulinita.....	5
2.2. TEORIA DA DUPLA CAMADA .....	6
2.2.1. Potencial Zeta.....	8
2.3. ELETROCINÉTICA .....	9
2.3.1. Eletro-osmose .....	9
2.4. PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS.....	13
2.4.1. Condutividade Térmica .....	13
2.4.2. Calor Específico .....	15
2.4.3. Resistividade Térmica.....	16
2.4.4. Difusividade Térmica .....	16
2.5. PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO .....	17
2.5.1. Condutividade Hidráulica .....	17
2.5.2. A Curva de Retenção de Água (CRA) .....	17
<b>3. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>20</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
4.1. SOLO ESTUDADO .....	29
4.2. SOLUÇÕES UTILIZADAS.....	30
4.3. PLANO DE ENSAIOS .....	32
4.4. MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE ELETROCINÉTICA.....	32
4.5. CÉLULA ELETROCINÉTICA .....	37
4.6. MEDIDOR DE PROPRIEDADES TÉRMICAS.....	43
4.7. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM HYPROP.....	47
4.8. ENSAIOS REALIZADOS ANTES DO ENSAIO ELETROCINÉTICO .....	48
4.8.1. Índices Físicos e Matéria Orgânica .....	48
4.8.2. Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	50
4.8.3. Ataque Sulfúrico e pH.....	50
4.8.4. Ponto de Carga Zero (PCZ) .....	51
4.8.5. Capacidade Tampão .....	53



4.8.6	Difração de Raios-X (DRX) .....	53
4.9	ENSAIOS REALIZADOS APÓS ENSAIO DE ELETROCINÉTICA .....	56
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
5.1	ENSAIOS REALIZADOS ANTES DA ELETROCINÉTICA. ....	60
5.1.1	Caracterização - Índices Físicos e Matéria Orgânica .....	60
5.1.2	Difração de Raios-X (DRX) .....	62
5.1.3	Ataque Sulfúrico e pH.....	66
5.1.4	Capacidade de Troca de Cátions (CTC).....	67
5.1.5	Ponto de Carga Zero (PCZ) .....	67
5.1.6	Capacidade Tampão .....	69
5.2	ENSAIOS ELETROCINÉTICOS .....	71
5.2.1	Parâmetros medidos .....	71
5.2.2	Parâmetros elétricos calculados .....	77
5.3	ENSAIOS REALIZADOS APÓS ENSAIO ELETROCINÉTICO .....	83
5.3.1	Teores de Umidade .....	83
5.3.2	pH e condutividade elétrica específica .....	84
5.3.3	Limites de Atterberg.....	86
5.4	PROPRIEDADES TÉRMICAS .....	89
5.5	CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NOS SOLOS .....	90
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>96</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	98
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO I – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA AMOSTRA EM</b>	
	<b>LABORATÓRIO.....</b>	<b>117</b>
	<b>ANEXO II – LEITURA DO PH E CÁLCULOS PARA O PONTO DE CARGA</b>	
	<b>ZERO .....</b>	<b>125</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> - Estrutura de uma camada de caulinita; (a) atômica; (b) simbólica.....	6
<b>Figura 2.2</b> - Distribuição de carga na água adjacente à superfície da partícula.....	7
<b>Figura 2.3</b> - Representação esquemática do potencial Zeta em uma partícula carregada.....	8
<b>Figura 2.4</b> - Representação gráfica da eletro-osmose.....	10
<b>Figura 2.5</b> - Características e relações entre os vários modelos que descrevem eletro-osmose. ....	11
<b>Figura 2.6</b> - Curva de retenção típica e principais componentes.....	18
<b>Figura 4.1</b> - Pesagem do solo seco para moldagem do corpo de prova .....	33
<b>Figura 4.2</b> - Pesagem da água deionizada para moldagem do corpo de prova .....	33
<b>Figura 4.3</b> - Homogeneização da mistura com água inicial .....	34
<b>Figura 4.4</b> - Célula de moldagem – colarinho, topo, tubo da amostra, base e tirantes de metal.....	35
<b>Figura 4.5</b> – Adensamento.....	36
<b>Figura 4.6</b> - Célula montada - a) encaixe do disco perfurado no eletrodo DSA®; b) célula eletrocinética montada .....	37
<b>Figura 4.7</b> - Dimensões da célula eletrocinética .....	38
<b>Figura 4.8</b> - Eletrodos de DSA® do Laboratório de Geotecnia, COPPE-UFRJ.....	38
<b>Figura 4.9</b> - Posição dos eletrodos: A - Contato da haste com a solução nos tanques .....	39
<b>Figura 4.10</b> - Isolante utilizado nos eletrodos .....	39
<b>Figura 4.11</b> - Teste do Eletrodo por imersão em soluções com diferentes pH.....	40
<b>Figura 4.12</b> - Bombas Peristálticas .....	40
<b>Figura 4.13</b> - Fonte de alimentação digital.....	41
<b>Figura 4.14</b> - Esquema Geral – Célula Eletrocinética.....	42
<b>Figura 4.15</b> - Equipamento eletrocinético em funcionamento.....	43
<b>Figura 4.16</b> - Medidor de Propriedades Térmicas KD2 .....	44
<b>Figura 4.17</b> - Medição das propriedades térmicas: aparato cilíndrico para corpo de prova (a), corpo de prova solo seco (b), corpo de prova solo adensado (c), conjunto de medição. ....	46
<b>Figura 4.18</b> – Dimensões do aparato para medição das propriedades térmicas .....	47
<b>Figura 4.19</b> – Representação esquemática do HYPROP.....	48
<b>Figura 4.20</b> - Floculação durante sedimentação sem defloculante .....	49
<b>Figura 4.21</b> – Adição das soluções diferentes concentrações para determinação do PCZ.....	52

<b>Figura 4.22</b> - Material separado para DRX .....	53
Figura 4.23 - Material após lavagem, secagem em estufa de 40°C e destorroamento. .....	54
<b>Figura 4.24</b> - Amostras após agitação .....	54
<b>Figura 4.25</b> - Recolhimento do líquido por sifonação (Amostra A – Agregados Cinza) .....	55
<b>Figura 4.26</b> - Lâminas orientadas preparadas para análises deDRX .....	56
<b>Figura 4.27</b> - Extrusão da amostra após ensaio eletrocinético .....	57
<b>Figura 4.28</b> - Esquema de fatiamento do solo para ensaios pós EK.....	58
<b>Figura 4.29</b> - Separação das amostras pós EK: a) Gabarito para corte; b) Amostras separadas e embaladas .....	58
<b>Figura 4.30</b> - Pistão utilizado para extração do líquido intersticial do solo .....	59
<b>Figura 5.1</b> - Curva granulométrica da mistura fabricada em laboratório.....	61
<b>Figura 5.2</b> – Difrátogramas de Raios-X da amostra A1 (Agregados Cinza) – a) Amostra Integral b) Fração Fina .....	64
<b>Figura 5.3</b> - Difrátogramas de Raios-X da amostra B1 (Agregados Vermelho) – a) Amostra Integral b) Fração Fina .....	64
<b>Figura 5.4</b> - Difrátogramas de Raios-X da fração fina da amostra C1 (Agregados Amarelos) – a) Amostra Integral b) Fração Fina .....	65
<b>Figura 5.5</b> - Difrátogramas de Raios-X da amostra D1 (Mistura) – a) Amostra Integral b) Fração Fina .....	65
<b>Figura 5.6</b> – Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ) .....	68
<b>Figura 5.7</b> – Ponto de Carga Zero determinado – Dados de saída PESN .....	69
<b>Figura 5.8</b> - Capacidade Tampão .....	70
<b>Figura 5.9</b> - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com água deionizada (pH=5,96)....	73
<b>Figura 5.10</b> - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com solução fabricada (pH = 6,68) .....	74
<b>Figura 5.11</b> - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com solução fabricada (pH = 4,91) .....	74
<b>Figura 5.12</b> - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com solução fabricada (pH = 6,68) e tensão aplicada de 15V .....	75
<b>Figura 5.13</b> - Volume eletro-osmótico - Catodo – Ensaio com diferentes soluções e mesma ddp aplicada.....	75
<b>Figura 5.14</b> - Volume eletro-osmótico - Anodo - Ensaio com diferentes soluções e mesma ddp aplicada.....	76
<b>Figura 5.15</b> - Volume eletro-osmótico - Catodo - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68) e diferentes ddps .....	76

<b>Figura 5.16</b> - Volume eletro-osmótico - Anodo - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68) e diferentes ddps .....	77
<b>Figura 5.17</b> - Parâmetros elétricos - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68) e tensão aplicada de 15V .....	78
<b>Figura 5.18</b> - Parâmetros elétricos - Ensaio com água deionizada (pH=5,96) .....	79
<b>Figura 5.19</b> - Parâmetros elétricos - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68).....	79
<b>Figura 5.20</b> - Parâmetros elétricos - Ensaio com solução fabricada (pH=4,91).....	80
<b>Figura 5.21</b> - Teores de umidade pós EK – Ensaio com diferentes soluções .....	84
<b>Figura 5.22</b> - Variação do pH pós EK- Ensaio com diferentes soluções .....	85
<b>Figura 5.23</b> - Variação da CEE pós EK- Ensaio com diferentes soluções.....	86
<b>Figura 5.24</b> - Limites de liquidez Pós EK - Ensaio com diferentes soluções .....	87
<b>Figura 5.25</b> - Limites de plasticidade Pós EK - Ensaio com diferentes soluções .....	88
<b>Figura 5.26</b> - Índices de plasticidade Pós EK - Ensaio com diferentes soluções .....	88
<b>Figura 5.27</b> - Gráfico ensaio HYPROP .....	93
<b>Figura 5.28</b> – Saídas do Hyprop: conteúdo de água inicial (%), porosidade e densidade aparente seca ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).....	93
<b>Figura 5.29</b> - Resultados dos dados de $\theta(\text{pF})$ , $K(\text{pF})$ e $K(\theta)$ , ajustados pelo modelo de van Genuchten-Mualem (1980).....	94
<b>Figura 5.30</b> - Resultados dos dados de $\theta(\text{pF})$ , $K(\text{pF})$ e $K(\theta)$ , ajustados pelo modelo de Fredlund e Xing (1994). .....	94
<b>Figura 5.31</b> -Parâmetros das funções e resultados estatísticos, ajustados pelo modelo de van Genuchten-Mualem (1980).....	95
<b>Figura 5.32</b> - Parâmetros das funções e resultados estatísticos, ajustados pelo modelo de Fredlund e Xing (1994). .....	95

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> - Condutividade Térmica de materiais distintos .....	14
<b>Tabela 2.2</b> - Condutividade Térmica de solos.....	15
<b>Tabela 3.1</b> - Publicações pertinentes ao tema estudado para diferentes tipos de solos .....	21
<b>Tabela 3.2</b> – Revisão da literatura: tipos de eletrodos .....	22
<b>Tabela 4.1</b> – Descrição das amostras utilizadas na mistura depois da retirada dos amostradores e análise táctil-visual.....	30
<b>Tabela 4.2</b> - Análise química das soluções utilizadas nos ensaios eletrocinéticos.....	31
<b>Tabela 4.3</b> - Plano de ensaios eletrocinéticos.....	32
<b>Tabela 4.4</b> - Plano de Ensaios Pré e Pós EK.....	32
<b>Tabela 4.5</b> - Cargas e período de aplicação .....	36
<b>Tabela 5.1</b> - Índices Físicos .....	60
<b>Tabela 5.2</b> - Composição Granulométrica (NBR ABNT 6502:1995) .....	60
<b>Tabela 5.3</b> - Matéria Orgânica das Frações e Mistura .....	61
<b>Tabela 5.4</b> - Parâmetros físicos dos corpos de prova.....	62
<b>Tabela 5.5</b> - Ataque Sulfúrico e pH .....	66
<b>Tabela 5.6</b> - Capacidade de Troca de Cátions da Mistura.....	67
<b>Tabela 5.7</b> - Resumo das principais condições utilizadas e observações durante a eletrocinética.....	81
<b>Tabela 5.8</b> – Resumo das principais condições utilizadas e observações durante a eletrocinética encontrados por Fabris (2016) .....	82
<b>Tabela 5.9</b> - Resultados: Propriedades Térmicas .....	90

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área da seção transversal, Ampère
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEE	Condutividade Elétrica Específica
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
COPPETEC	Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
CRA	Curva de Retenção de Água
$d_f$	Deslocamento horizontal na ruptura
DRX	Difração de raios X
E	Potencial elétrico
e	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
EDTA	Ácido etilenodiamino tetra-acético
Eh	Potencial Redox
EK	Eletrocinética
$G_s$	Densidade real dos grãos
H	Altura
I	Corrente elétrica
$i_e$	Gradiente elétrico
IP	Índice de Plasticidade
j	Densidade de corrente
$k_e$	Coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica
$k_h$	Coeficiente de permeabilidade hidráulica
$k_i$	Eficiência da eletro-osmose
$K_i$	Relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
L	Comprimento, Dimensão de espaço
$m_v$	Coeficiente de variação volumétrica do solo

n	Porosidade
NA	Nível d'água
NBR	Norma Brasileira
pH	Potencial hidrogeniônico
pH <sub>0</sub>	Ponto de carga zero
pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	pH do solo em água
pH <sub>KCl</sub>	pH do solo em KCl
Q <sub>e</sub>	Vazão eletro-osmótica
R	Resistência elétrica
S	Grau de saturação, Siemens
S <sub>u</sub>	Resistência não drenada
t	Tempo
u	Poropressão
v	Velocidade
V	Volt
Valor S	Soma de cátions trocáveis
Valor T	Capacidade de troca de cátions
W	Watt
W <sub>0</sub>	Teor de umidade inicial
W <sub>L</sub>	Limite de liquidez
W <sub>P</sub>	Limite de plasticidade
γ <sub>d</sub>	Peso específico aparente seco
γ <sub>n</sub>	Peso específico natural
γ <sub>nadot</sub>	Peso específico natural adotado
γ <sub>ncalc</sub>	Peso específico natural calculado
γ <sub>sat</sub>	Peso específico saturado
γ <sub>w</sub>	Peso específico da água
ΔP	Perda ao fogo
ε	Energia por unidade de volume
ζ	Potencial Zeta
η	Viscosidade do fluido
ρ	Resistividade elétrica
σ	Tensão normal e condutividade elétrica específica do solo
K <sub>s</sub>	Condutividade hidráulica saturada
σ' <sub>v0</sub>	Tensão efetiva de campo

$h$	Carga de pressão hidráulica
$k$	Condutividade hidráulica
$\theta$	Conteúdo volumétrico de água
$\Omega$	Ohm



## 1. INTRODUÇÃO

O fenômeno eletrocinético designa um conjunto de efeitos quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada através de uma massa úmida de solo, entre eletrodos inseridos no solo, no qual cátions migram em direção ao eletrodo negativo (catodo) e ânions migram em direção ao eletrodo positivo (anodo).

Diversos trabalhos foram realizados utilizando a técnica, tendo em vista sua eficiência e viabilidade econômica, sendo aplicada em vários campos da engenharia, incluindo o processo de adensamento de solos com baixa condutividade hidráulica (HU, 2012; ZHOU, 2013) a desidratação de lamas (FOURIE, 2007; MAHMOUD, 2010), a remediação de solos (ALSHAWABKEH, 1996; SILVEIRA, 2009; LIMA, 2013), e também como consequência em sistemas de aterramento elétrico (VILLAS, 2003; REZENDE, 2015).

Há seis fenômenos que normalmente são agrupados em problemas eletrocinéticos: eletroforese, eletromigração, eletro-osmose, potencial de sedimentação, potencial de escoamento e reações eletroquímicas. Porém, os fenômenos mais utilizados incluem a eletromigração, a eletroforese e a eletro-osmose, sendo esta última a mais significativa para a melhoria dos solos. Todos os fenômenos eletrocinéticos envolvem uma diferença de potencial elétrico, partículas com superfícies carregadas e uma fase líquida.

A eletro-osmose é o movimento ou fluxo de água, em geral do anodo para o catodo, sob a ação de um campo elétrico. Durante o fenômeno eletro-osmótico, há um acúmulo de água nas imediações do catodo e o ressecamento no anodo, resultante do fluxo radial divergente de umidade. Junto deste processo, existe o aquecimento e a perda de umidade devido ao gradiente térmico. Além de diversos outros fenômenos complexos, como: troca iônica, decomposição de minerais, oxidação, redução, mudanças na microestrutura, etc.

Os solos estudados são os tropicais, considerados mais complexos por apresentarem peculiaridades decorrentes da propriedade de carga de superfície variável com o pH ambiente dos minerais dominantes, do tipo 1:1 como a caulinita. Possuem comportamentos bastante variáveis de região para região, uma vez que seus parâmetros, além de dependerem de fatores tais como a composição da rocha mãe, dependem também das condições de intemperismo existentes, como temperatura e intensidade de precipitação. Quando submetidos aos fenômenos eletrocinéticos, como a eletro-osmose, o seu comportamento pode se tornar mais complexo do que de solos

cuja fração fina é constituída predominantemente por argilominerais do tipo 2:1 como a illita, que apresentam carga de superfície permanente.

Objetivando uma melhor compreensão do comportamento do solo durante o fenômeno eletrocinético, o estudo procura analisar a influência da mineralogia, da estrutura e das alterações de pH sobre a direção do fluxo eletro-osmótico e também seu comportamento térmico e hidráulico, já que a maioria das bibliografias existentes trata da aplicação da eletro-osmose em solos cujo comportamento é bastante diferente do estudado. A influência da estrutura é analisada pela comparação com os resultados obtidos por FABRIS (2016) em amostras indeformadas do mesmo solo.

### 1.1. OBJETIVOS

O objeto principal desta pesquisa é reconstituir em laboratório amostras homogeneizadas e menos rígidas a partir de amostras indeformadas coletadas com amostrador Denison em Triunfo, RO e analisar a influência da mineralogia, da estrutura e das alterações do pH sobre o fenômeno da eletro-osmose, dentre outros efeitos durante a aplicação da técnica eletrocinética. Como objetivo secundário será analisado o comportamento térmico e hidráulico do solo.

### 1.2. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O Capítulo 2 aborda as características dos solos tropicais cauliniticos, dos principais fundamentos da eletrocinética (Teoria da Dupla Camada e o Potencial Zeta) e das propriedades térmicas e hidráulicas do solo (resistividade térmica, difusividade térmica e a curva de retenção de água nos solos).

O Capítulo 3 apresenta o estado da arte do tema escolhido para esta dissertação.

O Capítulo 4 engloba a metodologia e os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios de laboratório. Apresenta o plano de ensaio, os solos estudados, as soluções utilizadas, os procedimentos de moldagem dos corpos de prova e a metodologia utilizada nos ensaios eletrocinéticos. Além disso, o capítulo aborda a metodologia utilizada em outros ensaios realizados antes e após os ensaios eletrocinéticos.

O Capítulo 5 apresenta os resultados experimentais, englobando não apenas os resultados dos ensaios eletrocinéticos, mas também dos ensaios realizados antes e após a eletrocinética, como por exemplo resultados da caracterização física, química e mineralógica do solo.

As conclusões do trabalho são apresentadas no Capítulo 7, bem como as sugestões para pesquisas futuras.

## 2. FUNDAMENTOS

### 2.1. SOLOS TROPICAIS

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

O caráter anfótero de certos solos foi demonstrado por Mattson em 1927. Contudo, como a observação desse autor não foi confirmada para a grande maioria dos solos do clima tropical, o assunto não mereceu maiores atenções (RAIJ, 1973).

Durante muito tempo as pesquisas estarem voltadas para os minerais de cargas permanentes (de solos europeus e americanos de clima temperado), com o passar dos anos e com o crescimento tecnológico os conhecimentos acerca da ciência do solo tomaram uma dimensão global. Atualmente diversos estudos são realizados com os solos de clima tropical (UEHARA, 1978).

Os solos tropicais apresentam elevado grau de intemperização, com mineralogia da fração argila dominada por minerais de argila do tipo 1:1 e óxidos de ferro e alumínio (MONIZ, 1975; FONTES & WEED, 1991).

Dentre os atributos eletroquímicos dos solos intemperizados das regiões tropicais, merecem destaque o ponto de efeito salino nulo e a capacidade de troca aniônica, cujas magnitudes estão diretamente associadas ao estágio de desenvolvimento desses solos.

Os óxidos de ferro estão intimamente vinculados aos fenômenos de estruturação e agregação do solo. Sua associação com a caulinita e, algumas vezes, com a gibsitita em Latossolos brasileiros proporciona uma estrutura em que as partículas de argila estão altamente agregadas, podendo se comportar como partículas de areia (FONTES M., 1992).

A participação dos óxidos de ferro na constituição de um solo pode conferir, portanto, propriedades físicas desejáveis de maior permeabilidade à água e maior resistência à erosão, comparado a outros solos de mineralogia similar, mas com menores teores

desses minerais. Esses mesmos óxidos ainda influenciam outras propriedades do solo, como a cor e a retenção de íons.

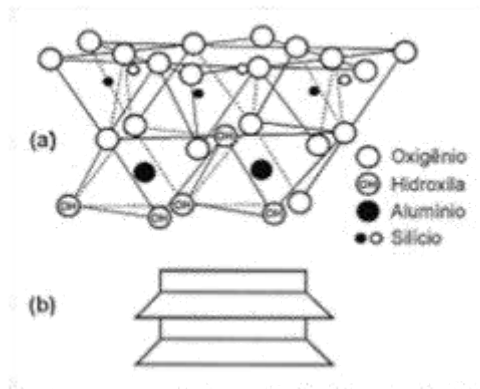
A gibsita representa quase que exclusivamente o único óxido de alumínio cristalino presente em solos das regiões tropicais e está íntima e diretamente associada à intensidade do intemperismo. Apesar de tratada com menor frequência em relação principalmente aos óxidos de ferro, no que diz respeito à adsorção aniônica, a gibsita pode exercer importante e determinante influência nesse fenômeno, principalmente em solos onde se apresenta com maior expressão (KER J. , 1995).

Esse tipo de solo, por apresentar propriedades físico-químicas características de minerais em estágio avançado de intemperização, como a caulinita, goethita, gibsita, a hematita e outros óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, apresentam comportamento diferenciado (BARBOSA, 2012). Esse comportamento é responsável pela inversão do fluxo eletro-osmótico observado em estudos precedentes e também registrado por Velten et al., 2012.

#### 2.1.1. Caulinita

A caulinita tem sido verificada na fração argila de solos formados a partir de diferentes materiais e eras geológicas (Jeans et al., 2001). Esse argilomineral é tido como predominante em frações finas de solos equatoriais e tropicais, assim como em solos subtropicais. Ela apresenta estrutura laminar, formada pela união de uma camada de tetraedros de silício ligada a uma camada de octaedros de alumínio.

A ligação entre as camadas duplas é feita por forças de Van der Waals e por pontes de hidrogênio bastante resistentes, o que lhes confere uma estrutura rígida e estável em presença de água. A Figura 2.1 apresenta a estrutura de uma camada de caulinita.



**Figura 2.1** - Estrutura de uma camada de caulinita; (a) atômica; (b) simbólica.

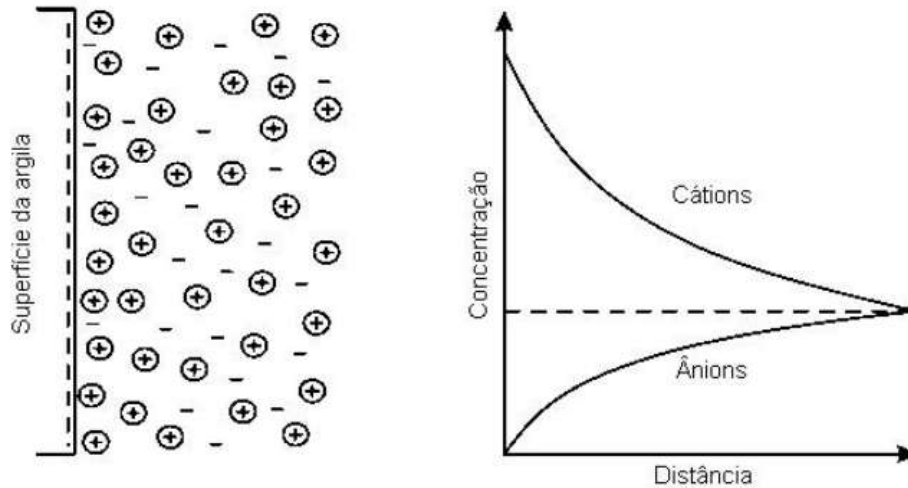
(PINTO, 2000)

Com relação às suas características estruturais, a caulinita possui carga elétrica e poder de retenção de água fraca, em comparação com os minerais dos outros grupos; praticamente não apresenta expansibilidade e torna-se plástica para teor de umidade relativamente baixo.

## 2.2 TEORIA DA DUPLA CAMADA

De acordo com Mitchell (1976), a maioria das superfícies das partículas do solo é carregada negativamente devido à substituição isomórfica e à presença de quebras de ligações nas bordas das partículas. Íons de carga positiva são atraídos pelo campo elétrico formado e tendem a permanecer na vizinhança dessa superfície.

As forças de difusão tendem a trazer estes cátions de volta à solução em equilíbrio, onde sua concentração é menor. Com a ação concomitante destas duas forças opostas, uma distribuição espacial de cátions numa "camada difusa" é estabelecida, na qual a concentração deles aumenta em direção à superfície, partindo de um valor igual àquele na solução para um valor maior, determinado, principalmente, pela magnitude da carga superficial (UEHARA & GILMAN, 1981). A concentração de cátions decresce com a distância à superfície da partícula e a concentração de ânions cresce, conforme distribuição mostrada na Figura 2.2.



**Figura 2.2** - Distribuição de carga na água adjacente à superfície da partícula  
(MITCHELL, 1976)

A superfície eletronegativa e a distribuição de cargas adjacentes na água formam a chamada Dupla Camada Difusa (DCD), que incorpora o balanço entre as forças de atração dos íons pela superfície das partículas e o gradiente de concentração de íons causando sua difusão a partir da superfície da argila. Para que exista o equilíbrio desse campo surge um potencial elétrico. O campo elétrico da dupla camada age como uma espécie de membrana semipermeável que permite trocas com os íons em solução (MITCHELL, 1976).

Várias teorias foram propostas para a descrição da distribuição de íons adjacentes a superfícies carregadas em coloides, como a teoria de Gouy-Chapman e a teoria de Stern.

A teoria de Gouy-Chapman descreve a distribuição de íons próximos à superfície carregada dos coloides, relacionando a carga com o potencial elétrico na superfície.

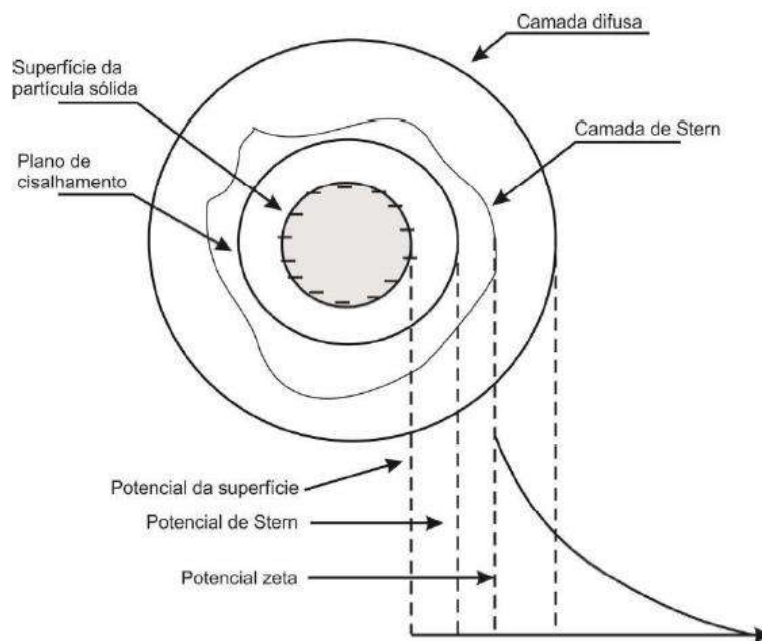
Embora muito utilizada, esta teoria faz uma série de considerações simplificadoras, como por exemplo o fato dos íons serem considerados cargas pontuais e poderem aproximar-se de forma não definida da superfície carregada, esta teoria não é adequada para situações em que a concentração salina é alta (RAIJ, 1971) ou quando são utilizados valores maiores do que 150 mV. (UEHARA & GILLMAN, 1981).

Stern introduziu correções no Modelo de Gouy-Chapman, principalmente levando em conta o tamanho finito dos íons (RAIJ, 1986), ou seja, eles não poderiam se aproximar da superfície além de certa distância (UEHARA & GILLMAN, 1981).

Nesta teoria estabeleceu-se a existência de duas camadas, a camada Stern, formada por cátions fortemente aderidos à superfície da partícula, considerados imóveis, e a essa camada Stern se seguiria outra camada composta pelos outros íons, estendendo-se até a solução intersticial, chamada de Dupla Camada Difusa. Quanto maior o tamanho dos íons, maior a espessura da camada Stern.

### 2.2.1 Potencial Zeta

O potencial Zeta é o potencial elétrico na interface entre as partes fixa e móvel da dupla camada difusa do solo e, portanto, é um potencial que representa o status de carga da superfície do solo. Está localizado a uma distância pequena e desconhecida da superfície das partículas (MITCHELL E SOGA, 2005). A Figura 2.3 representa esquematicamente o potencial Zeta em uma partícula carregada, bem como a camada difusa e a camada e potencial de Stern.



**Figura 2.3** - Representação esquemática do potencial Zeta em uma partícula carregada

(KAYA e YUKSELEN, 2005)



Normalmente o Potencial Zeta tende a ser negativo, porém esse potencial é função de diversas variáveis como o tipo de mineral de argila, as espécies iônicas presentes, a força iônica, a temperatura e o pH no qual a carga líquida da partícula é zero, definido como Ponto de Carga Zero (PCZ). Quando o pH do solo é superior ao PCZ, o Potencial Zeta do solo é negativo e quando o pH do solo é inferior ao PCZ, o Potencial Zeta se torna positivo (YEUNG *et al.*, 1997).

O PCZ é o parâmetro mais importante para a descrição das propriedades decorrentes da dupla camada elétrica de interfaces reversíveis. Com ele é possível determinar o potencial da dupla camada elétrica e então determinar a distribuição de cargas elétricas de solos.

Existem latossolos que podem apresentar PCZ baixo, entre 3,6 e 4,6 (SPOSITO, 1989). Dentre os minerais a caulinita apresenta o menor valor do PCZ (4,6), comparado à gibsitita (5,1) e à goethita (6,4) (VARADACHARI; CHATTOPADHYAY, 1981).

## 2.3 ELETROCINÉTICA

Os fenômenos eletrocinéticos no solo envolvem o movimento relativo de eletricidade, superfícies carregadas e fase líquida, em um sistema onde partículas carregadas são equilibradas por cátions móveis, ou dupla camada difusa (MITCHELL, 1976).

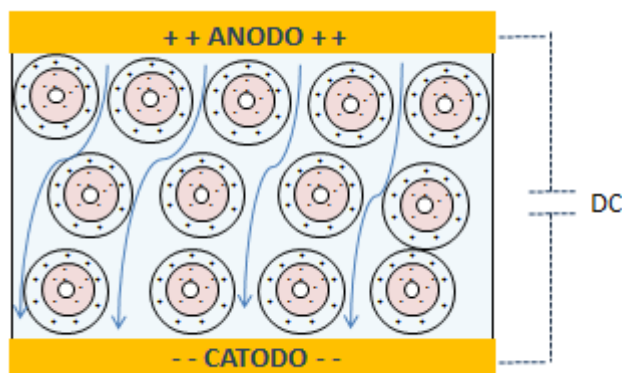
Quando da aplicação de um campo elétrico em solos argilosos, a dupla camada difusa promove o surgimento de diversos fenômenos eletrocinéticos conhecidos como eletro-osmose, eletroforese e eletromigração, sendo a eletro-osmose, do ponto de vista da geotecnia tradicional, o mecanismo eletrocinético mais importante.

### 2.3.1 Eletro-osmose

A eletro-osmose ocorre quando um potencial elétrico é aplicado através de uma massa úmida de solo, e cátions são atraídos para o catodo e ânions para o anodo. À medida que os íons se locomovem, eles carregam consigo sua água de hidratação, exercendo um arraste na água do entorno, denominado eletro-osmose.

Em solos carregados negativamente, esse arraste é predominante na direção do catodo, já que existem mais cátions livres. A magnitude do fluxo eletro-osmótico depende do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica e do gradiente de tensão elétrica aplicada

(MITCHELL & SOGA, 2005). A Figura 2.4 representa graficamente o fluxo eletro-osmótico.



**Figura 2.4** - Representação gráfica da eletro-osmose.

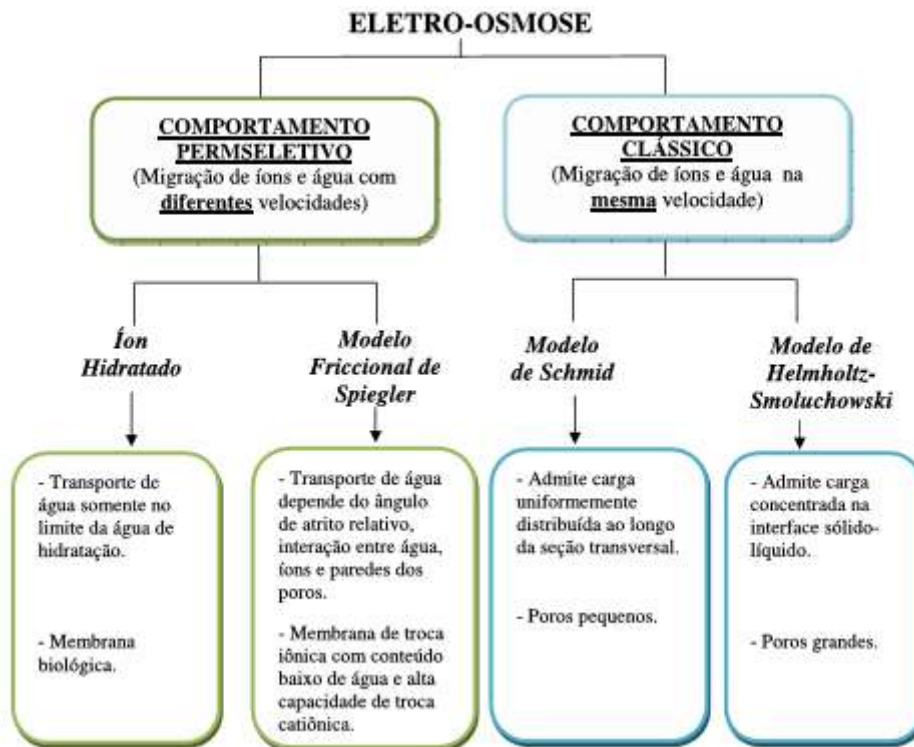
(Adaptado de MAHMOUD, 2010)

A eletro-osmose foi estudada inicialmente por Reuss, em 1809, ao observar que quando um campo elétrico é aplicado através de um meio úmido poroso, o líquido pode se deslocar por esse meio.

Em 1949, Leo Casagrande publicou na *Géotechnique* e demonstrou que aplicando a eletrocinética em solos com umidades elevadas, o acréscimo na tensão efetiva no solo devido ao fluxo eletro-osmótico aumenta sua resistência ao cisalhamento, fornecendo assim uma base teórica para a aplicação do procedimento visando o adensamento de solos finos. A partir da década de 1930, a eletro-osmose foi utilizada em diversas aplicações de campo para melhorar os parâmetros de resistência de solos finos (CASAGRANDE, 1953).

Como já dito anteriormente, quando se aplica um gradiente de voltagem ocorrem diversas reações eletroquímicas (difusão, troca iônica, precipitação, desenvolvimento de gradiente de pH, oxidação, redução, adsorção física e química) e essas reações podem beneficiar o solo e também prejudicar o processo eletro-osmótico.

Algumas teorias foram desenvolvidas para descrever a evolução do fluxo de água por eletro-osmose, incluindo a teoria de Helmholtz-Smoluchowski, teoria de Schmid, modelo friccional de Spiegler e a teoria de hidratação do íon. As descrições dessas teorias foram apresentadas em Gray e Mitchell (1967) e Mitchell (1993) e suas principais diferenças são resumidamente apresentadas na Figura 2.5.



**Figura 2.5** - Características e relações entre os vários modelos que descrevem eletro-osmose.

(MITCHELL, 1993)

De acordo com Mitchell e Soga (2005), a teoria de Helmholtz está entre as mais antigas e mais utilizadas, esta teoria é descrita segunda a equação 2.1, a qual permite calcular a quantidade de líquido removido de um solo saturado ( $Q_e$ ,  $L^3.T^{-1}$ ) quando submetido à aplicação de uma diferença de potencial. Este modelo descreve o deslocamento de um fluido em um tubo capilar.

$$Q_e = \frac{\zeta \cdot D}{\eta \cdot n} \cdot \frac{\Delta E}{\Delta L} \cdot A \quad (2.1)$$

onde:

$Q_e$  = quantidade de líquido removido de um solo saturado ( $L^3.T^{-1}$ )

$\zeta$  = Potencial Zeta (V)

$D$  = permitividade elétrica do fluido (Farad. $L^{-1}$ )

$\eta$  = viscosidade do fluido (F.T. $L^{-2}$ )

$n$  = porosidade

$\Delta E$  = diferença de potencial aplicada (V)

$\Delta L$  = comprimento do canal por onde ocorre o fluxo (L) ou a distância entre os eletrodos

A = área da seção transversal, normal à direção do fluxo (L<sup>2</sup>).

O fluxo eletro-osmótico, pode ainda ser descrito pela equação de Darcy (Equação 2.2):

$$Q_e = k_e \cdot i_e \cdot A \quad (2.2)$$

onde:

$i_e$  = gradiente elétrico  $\Delta E/\Delta L$  (V.L<sup>-1</sup>)

$k_e$  = coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (L<sup>2</sup>.V<sup>-1</sup>.T<sup>-1</sup>)

Sendo assim, a partir das duas equações 2.1 e 2.2 pode-se definir o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (Equação 2.3).

$$k_e = \zeta \cdot D / \eta \cdot n \quad (2.3)$$

Pode-se considerar que mesmo em diferentes tipos de solo,  $k_e$  não varia muito. Mitchell e Soga (2005) consideram o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica entre  $1 \times 10^{-9}$  a  $1 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s.V, já Casagrande (1949) na ordem de  $5 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s.V

Durante a eletrocinética, ocorrem reações eletroquímicas e o pH das regiões próximas aos eletrodos muda consideravelmente devido à eletrólise da água, ocorrendo a oxidação da água no anodo, tornando-o mais ácido, e a redução no catodo, tornando-o mais alcalino. Sendo assim, os íons hidrogênio migram do anodo para o catodo (frente ácida), enquanto as hidroxilas migram do catodo para o anodo (frente básica).

A adsorção de íons H<sup>+</sup> à superfície dos minerais de argila comprime a dupla camada e resulta em valores menores de potencial elétrico. Inversamente, a adsorção de íons OH<sup>-</sup> aumenta a dupla camada difusa e, conseqüentemente, o potencial elétrico na superfície das argilas. Por conta deste efeito, as variações de pH no solo influenciam o potencial elétrico e, por conseguinte, a magnitude da permeabilidade eletro-osmótica.

## 2.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

Estudos sobre influência da temperatura nas propriedades do solo originaram-se na década de 50 e até hoje o tema vem sendo estudado.

As propriedades térmicas do solo são importantes em muitas aplicações, agrícolas, de engenharia e meteorológicas. Elas são, em grande parte, dependentes da fração volumétrica de água, de sólidos e de ar no solo. Essas frações volumétricas são altamente variáveis no tempo e no espaço, principalmente perto da superfície do solo.

Atualmente, sabe-se que as informações relativas às propriedades térmicas do solo são de grande importância para o desenvolvimento de projetos de instalação de redes subterrâneas de transmissão de energia elétrica, por exemplo. Os projetos de aterramento devem ser projetados para permitir a dissipação do calor gerado ao longo dos cabos, evitando seu superaquecimento. Alguns projetos de remediação também necessitam do conhecimento das propriedades térmicas do solo, como por exemplo aqueles que envolvem a técnica de dessorção térmica.

Sabe-se que os parâmetros térmicos dos solos sofrem influência de uma série de fatores como teor de umidade, grau de saturação, concentração de sais e temperatura, uma boa compreensão é necessária de como essas variações afetam as propriedades térmicas, por isso a importância de se estudar o comportamento das propriedades térmicas de um solo rico em óxidos de ferro e alumínio quando submetidos à técnica eletrocinética.

As principais propriedades térmicas dos solos são condutividade térmica, difusividade térmica e calor específico, e serão apresentadas nos itens seguintes.

### 2.4.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é a propriedade essencial que controla o fluxo de calor. É definida como a quantidade de calor que é transferida em uma unidade de tempo através de uma seção transversal unitária, devido a um gradiente de temperatura imposto na direção do fluxo. Sua definição é dada pela equação 2.4.

$$\lambda = \frac{q}{A.(T_2 - T_1)l} \quad (2.4)$$

onde:

$\lambda$  = condutividade térmica (W/m/°K)

A = área da seção transversal (m<sup>2</sup>)

q = fluxo de calor (W ou J/s)

$T_2 - T_1$  = gradiente de temperatura (K ou °C)

l = distância percorrida (m)

Os valores de condutividade térmica de diversos materiais como ar, água, gelo, granito, dentre outros são conhecidos, e apresentado por diversos autores como os valores da Tabela 2.1, apresentados por Mitchell, 1993.

**Tabela 2.1** - Condutividade Térmica de materiais distintos

<b>Material</b>	<b>Condutividade Térmica W/m.°K</b>
Ar	0,024
Água	0,60
Gelo	2,25
Granito	2,76
Folhelho	1,56
Cobre	389
Valores médios de solos	0,25 – 2,9 (~1,7)
Quartzo	8,4
Matéria Orgânica	0,25

(modificado de MITCHELL, 1993)

Dos valores apresentados na Tabela 2.1, nota-se que para solos a condutividade térmica varia de 0,25 W/m°K a 2,9 W/m°K, com um valor médio de 1,7 W/m°K. Nota-se ainda que a condutividade térmica da água é maior do que a do ar, sendo assim, solos saturados apresentam condutividade térmica maior do que solos secos.

Para solos, os valores tabelados de condutividade térmica não levam em consideração a influência de uma série de fatores como textura, composição mineralógica, teor de umidade, densidade e temperatura, apenas levando em consideração sua classificação granulométrica. Porém alguns estudos mostram a influência do grau de saturação, da umidade, concentração de sais e temperatura com os valores de condutividade térmica,

como apresentado por Kersten (1949), Reno e Winterkorn (1967), Johansen (1975), Farouki (1986), Oliveira Júnior (1993), Abu-Hamdeh (2003) e Duarte (2004).

Alguns valores típicos de condutividade térmica foram apresentados por Hukseflux Thermal Sensors, 2016, levando em consideração o grau de saturação de alguns solos, conforme descritos na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Condutividade Térmica de solos

<b>Material</b>	<b>Condutividade Térmica W/m.°K</b>
Solos em Geral	0,15 - 4,00
Solos Saturados	0,60 – 4,00
Areia Seca	0,15 – 0,25
Areia Úmida	0,25 – 2,00
Areia Saturada	2,00 – 4,00
Argila de Seca a Úmida	0,15 – 1,80
Argila Saturada	0,60 - 2,50
Solo Orgânico	0,15 – 2,00

(HUKSEFLUX THERMAL SENSORS, 2016)

Em relação aos métodos existentes para medir condutividade térmica dos solos existe o método de fluxo de calor permanente e o método de fluxo de calor transiente.

Neste trabalho, adotamos o método transiente já que o permanente não é indicado para solos não saturados devido à imposição de um gradiente de temperatura constante, podendo ocorrer mudanças no teor de umidade e conseqüentemente mudanças nas propriedades térmicas. Segundo Farouki (1986), o método transiente é um método mais versátil, rápido e o mais indicado para solos.

#### 2.4.2 Calor Específico

Define-se o calor específico como a capacidade térmica por unidade de massa do corpo. Em outras palavras, o calor específico representa a quantidade de energia necessária para elevar de 1 °C a temperatura de 1 g da substância considerada. O calor específico é função da temperatura, crescendo linearmente quando a temperatura cresce, principalmente para solos de granulometria grossa. A terceira lei da termodinâmica diz que o calor específico de qualquer material deve se aproximar de zero quando a temperatura se aproxima do zero absoluto.

### 2.4.3 Resistividade Térmica

A resistividade térmica (R) é calculada como o inverso da condutividade térmica e pode ser definida como a resistência apresentada pelo solo ao fluxo de calor.

Segundo Brandon (1989) a resistividade térmica pode ser influenciada pelos seguintes fatores:

- 1) mineralogia – depende dos minerais constituintes (feldspato e quartzo apresentam uma maior condutividade térmica, conseqüentemente areias apresentam maiores condutividades térmicas)
- 2) peso específico aparente seco – quanto maior, maior a condutividade térmica, relacionado com o contato entre os grãos.
- 3) distribuição granulométrica – solos bem graduados conduzem o calor melhor que solos uniformes (relação com o índice de vazios)
- 4) quantidade de água na compactação- solos compactados úmidos e posteriormente secados para uma baixa umidade apresentam maior condutividade térmica que aqueles compactados a baixa umidade.
- 5) temperatura – todos os minerais cristalinos no solo mostram um decréscimo na condutividade térmica com um aumento da temperatura. Entretanto, a condutividade térmica da água aumenta significativamente com o aumento de temperatura, e a condutividade térmica de poros saturados com ar aumenta com o aumento de temperatura.

### 2.4.4 Difusividade Térmica

A difusividade térmica (D) é a relação entre a condutividade térmica e o calor específico, é uma medida da capacidade de um material para transmitir uma perturbação térmica. É inversamente proporcional à capacidade de aquecimento volumétrico, ou seja, quanto menor a energia necessária para fazer variar a temperatura de um determinado volume de solo, mais rápido o solo vai sofrer essa variação.

A difusividade térmica é também uma função da umidade, da densidade e da composição do solo. Ela aumenta com o aumento da umidade, até atingir um valor máximo. A partir daí o aumento do conteúdo de água não aumenta a condutividade



térmica na mesma proporção da capacidade térmica volumétrica e, por conseguinte, a difusividade térmica decresce.

A equação 2.5 define a difusividade térmica:

$$D = \frac{\lambda}{c} \quad (2.5)$$

onde:

D = difusividade térmica (m<sup>2</sup>/s)

$\lambda$  = condutividade térmica (W/m/°K)

C = calor específico(cal/cm°C)

## 2.5 PROPRIEDADES HIDRÁULICAS DO SOLO

### 2.5.1 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é uma das propriedades físicas mais importantes que governam o movimento da água nos poros do solo. Este parâmetro hidráulico é definido como sendo a capacidade de um solo em transportar água através de seus vazios, podendo ser determinado para a condição saturada ou para a condição não saturada.

A condutividade hidráulica é uma propriedade do conjunto solo e fluido, destacando alguns fatores que afetam na sua determinação, como por exemplo: a estrutura do solo, geometria e distribuição dos poros, temperatura, densidade e viscosidade do fluido.

A determinação da condutividade hidráulica saturada e da condutividade hidráulica não saturada pode ser feita por meio de ensaios de campo ou de laboratório, e ainda por meio de métodos indiretos. Nos meios porosos não saturados, a condutividade hidráulica varia com a quantidade de água presente nos seus vazios, ou seja, com seu grau de saturação (S).

### 2.5.2 A Curva de Retenção de Água (CRA)

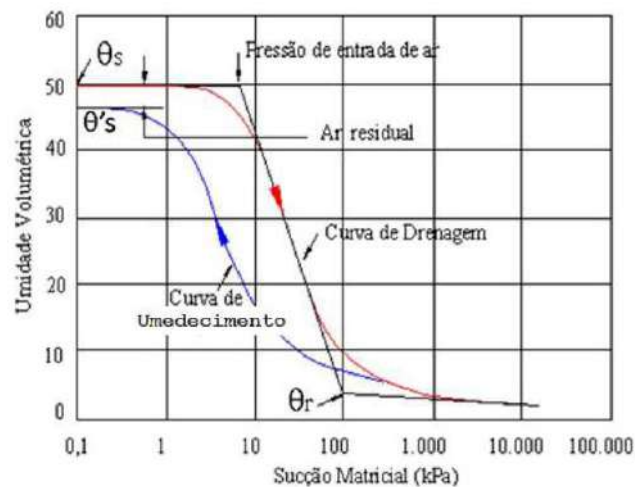
Denomina-se curva de condutividade hidráulica a representação gráfica da função que relaciona a condutividade hidráulica do solo não saturado com o seu correspondente

conteúdo de água (grau de saturação ou umidade volumétrica) ou poropressão (ou sucção mátrica) para uma porosidade específica.

A expressão gráfica da relação constitutiva entre o teor de umidade (gravimétrico ou volumétrico) do solo e a sucção é chamada de curva característica de sucção ou de retenção de água, que também pode ser expressa em termos do grau de saturação do solo. Considerando a sucção, a curva pode ser em função da sucção mátrica ou da sucção total (LOPES, 2006).

O conhecimento da CRA do solo é fundamental para analisar o comportamento dos solos não saturados. A CRA tem sido usada para a previsão e quantificação de diversos parâmetros de grande interesse na solução dos problemas geotécnicos, como a condutividade hidráulica, e parâmetros de resistência ao cisalhamento. Isto é atrativo à prática dos projetos, já que ensaios que quantificam estas propriedades podem ser muitas vezes onerosos e demorados para serem obtidos em laboratório (GUIMARÃES, 2013).

A Figura 2.6 representa a curva de retenção típica e seus principais componentes.



**Figura 2.6** - Curva de retenção típica e principais componentes

(GUIMARÃES, 2013).

Sendo:

- 1)  $\theta_s$  é o teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de drenagem;

- 2)  $\theta'_s$  é o teor de umidade volumétrica de saturação obtida pelo processo de umedecimento;
- 3)  $(\theta_s - \theta'_s)$  é o conteúdo de ar residual entre os processos de drenagem e umedecimento;
- 4)  $\theta_r$  é o teor de umidade volumétrica residual;

A pressão de entrada de ar ( $\psi_a$ ) representa o diferencial de pressões entre a água e o ar necessário para causar a drenagem do maior poro do solo. O teor de umidade residual ( $\theta_r$ ) é o conteúdo de umidade a partir do qual é necessária uma grande variação de sucção para remover mais água do solo, ou, o valor de umidade a partir do qual aumentos de sucção não produzem variações significativas no conteúdo de umidade. Existem diferentes critérios para definir estes valores. O critério recomendado por Fredlund (1994) é determiná-los a partir do traçado de tangentes à curva.

As características que distinguem as curvas de retenção dependem de vários fatores como a estrutura do solo, teor de umidade inicial ou de moldagem, índice de vazios, tipo de solo, textura, mineralogia, histórico de tensões e método de compactação. Estes fatores podem interferir na forma da curva de diferentes maneiras, dependendo do tipo de solo.

Para estimar a retenção de água no solo e também a condutividade hidráulica, uma série de metodologias foram criadas ao longo dos anos. Uma abordagem direta para a função de retenção de água no solo é medir uma série de pares de teor de água ( $\theta$ ) e de pressão ( $h$ ), e em seguida, ajustar os dados a uma função específica. Dentre as técnicas diretas estão o Funil de Buchner, células de pressão, extratores de placa de pressão, mesas de sucção, e muitas outras abordagens como revisto por Dane e Hopmans (2002), e Bittelli e Flury (2009), e dentre as funções analíticas de ajuste estão as de Brooks e Corey (1964), Van Genuchten (1980), Fredlund e Xing (1994), Kosugi (1996), ou Assouline et al. (1998). (Apud COELHO, 2016)

### 3. ESTADO DA ARTE

A técnica eletrocinética foi iniciada por Casagrande na década de 1940 para fins de melhoria geotécnica, mas não teve um bom desenvolvimento em grande escala, especialmente nas aplicações de campo. A partir da década de 1980, começou a ser estudada e aplicada também para fins de remediação de solo. Desde então, a maioria dos estudos desenvolvidos foi em escala de bancada, mas também existem alguns estudos em escala piloto e atualmente empresas especializadas na técnica a disponibilizam comercialmente no mercado, inclusive no Brasil, mas são poucas.

Possivelmente, a principal razão para o uso ainda restrito da técnica na prática é que se conhece pouco sobre as alterações físico-químicas e eletroquímicas do solo durante a sua aplicação, apesar da grande quantidade de estudos publicados, bem como os custos com energia, perda da eficiência com o passar do tempo e corrosão dos eletrodos.

A eletro-osmose foi primeiramente relatada por Reuss, em 1809 e Quincke em 1861, e a partir daí vários pesquisadores estudaram diferentes aspectos da eletro-osmose como: Helmholtz 1879; Perrin 1904; Smoluchowski 1921; Casagrande 1948; Veder 1981; Pamukcu *et al.* 1997 e Shang 1998 (MALEKZADEH *et al.*, 2016).

Apesar de pouco utilizada é uma técnica inovadora com grande potencial, pois pode ser utilizada para diferentes tipos de solos e para diferentes aplicações como melhoria geotécnica, estabilização, descontaminação de solos (sozinha ou combinada com outras técnicas), dessalinização, desidratação de lamas, entre outras. Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas publicações pertinentes ao tema estudado para diferentes tipos de solos, englobando diferentes aplicações.

Diversos fatores influenciam o comportamento e eficiência da eletrocinética. O tipo de eletrodo, por exemplo, tem papel importante e é uma variável que vem sendo modificada nos estudos com o passar dos anos. Existe uma grande variedade de materiais disponíveis, porém deve-se analisar o seu custo-benefício. A Tabela 3.1 apresenta as publicações pertinentes ao tema e a Tabela 3.2 os tipos de eletrodos relatados na literatura até hoje bem como suas vantagens e limitações.

**Tabela 3.1** - Publicações pertinentes ao tema estudado para diferentes tipos de solos

<b>Autor /Ano</b>	<b>Material utilizado</b>	<b>Objetivo de estudo</b>
Abdullah and Al-Abadi (2010)	Solo natural com predomínio de montmorilonita (expansivo)	Estabilização Eletrocinética
Adamson et al. (1967)	Solo natural com predomínio de montmorilonita (expansivo)	Desidratação Eletrocinética
Asavadorneja e Glawe (2005)	Solo argiloso	Estabilização Eletrocinética
Bjerrum et al. (1967)	Argila sensível norueguesa	Estabilização Eletrocinética
Carmo (2016)	Solo argiloso contaminado com óleo e cru e óleo diesel	Remediação Eletrocinética
Castello Branco (1978)	Solos naturais tropicais residuais (4 tipos)	Estabilização Eletrocinética
Castro (2010)	Solo argiloso contaminado com óleo e cru	Remediação Eletrocinética
Chappell and Burton (1975)	Solo silto argiloso	Estabilização Eletrocinética
Chen and Murdoch (1997)	Solo silto argiloso	
Chien et al. (2009)	Caulinita e argila silicatada	Estabilização Eletrocinética
Deotti (2005)	Solo argiloso formado sobre uma matriz calcária, contaminado por hidrocarbonetos de petróleo	Biorremediação Eletrocinética: controle do Ph
Fabris (2016)	Solo natural tropical caulínítico (silo argiloso) e caulim tratado	Análise da variação de parâmetros geotécnicos
Fetzer (1967)	Solo silto argiloso	Estabilização Eletrocinética
Fourie and Jones (2010)	Rejeitos de minério e lama dragada	Desidratação de Rejeitos
Fourier et al. (2007)	Rejeitos de minério e lama dragada	Desidratação de Rejeitos
Glendinning et al. (2005)	Solo argiloso	Estabilização Eletrocinética
Jayasekera and Hall (2007)	Solos salinos sódicos coletados de duas regiões da Austrália	Modificação de solos afetados por sais
Jeyakanthan et al. (2011)	Solo argiloso	Estabilização Eletrocinética
Kalumba et al. (2009)	Solo argiloso	Desidratação de Solos
Kamarudin et al. (2010)	Solo tropical residual	Estabilização Eletrocinética
Liaki et al. (2010)	Solo natural caulínítico (solo argiloso)	Análise de efeitos físico-químico
Lima (2013)	Caulim tratado e solo fabricado (bentonita + areia)	Modelagem Numérico-Experimental do transporte de íons por eletrocinética
Loch et al. (2010)	Solo argiloso	Efeitos da eletro-osmose
Long and George (1967)	Solo argiloso	Estabilização Eletrocinética
Micic et al. (2001)	Argila marinha de alta salinidade	Melhoria de parâmetros geotécnicos
Miller et al. (1999)	Lodo de efluente	Desidratação Eletrocinética
Reddy et al. (2006)	Sedimento dragado contaminado	Desidratação de sedimentos dragados
Schmidt (2004)	Solo fabricado (caulim + bentonita) e solo natural caulínítico (silo argiloso)	Biorremediação Eletrocinética: viabilidade do transporte de nutrientes e aceptores de elétrons
Shang (1997)	Solo argiloso	Sedimentação Eletrocinética
Shang and Dunlap (1996)	Solo argiloso (argila mole)	Melhoria de parâmetros geotécnicos
Silveira (2009)	Solo argiloso contaminado com óleo de produção	Remediação Eletrocinética
Mohamedelhassan and Shang (2001)	Sedimento dragado contaminado com metais pesados	Sedimentação Eletrocinética

**Tabela 3.2 – Revisão da literatura: tipos de eletrodos**  
(Adaptado de MALEKZADEH et al, 2016)

<b>Tipo de Eletrodo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Limitações</b>	<b>Autores</b>
<b>DSA®</b>	Praticamente livre de corrosão e consequente liberação de íons indesejáveis no solo, leve, baixa expansão e contração térmica.	Alto Custo	Carmo (2016), Cravo (2016), Fabris (2016), Silva (2016), Lee (2016),
<b>Titânio</b>	Resistência a corrosão, leve e baixa expansão e contração térmica.	Alto custo	Rozas and Castellote (2012), Kamarudin et al. (2010).
<b>Cobre</b>	Baixa taxa de desgaste.	Vida útil pequena, pode causar contaminação no solo, produção de gás hidrogênio no catodo.	Yukawa et al. (1976), Jeyakanthan et al. (2011), Lee et al. (2002), Lockhart (1983), Lo et al. (1991a, b)
<b>Prata</b>	Boa condutividade elétrica e integridade estrutural.	Alto custo e pode reagir com minerais de argila e sal.	Ballou (1955), Olsen (1972), Laursen and Jensen (1993)
<b>Grafite</b>	Elevado ponto de fusão.	Menor resistência mecânica, o acabamento de grafite pode não ser tão adequado como deveria ser, a qualidade varia, perda de potência mais elevada na interface solo-eletrodo, menos eficiente	Reddy et al. (2006), Mohamedelhassan and Shang (2001a, b), Schmit (2004), Yuan and Weng (2003), Yang et al., (2010), Abdullah and Al-Abadi (2010), Kim et al. (2011)
<b>Alumínio</b>	Resistente a alta corrente CC, leve e fácil de moldar, bom condutor de eletricidade.	Reage com íons de hidrogênio e causa mudanças na composição do solo. Não ambientalmente amigável e uma fonte de contaminação	Adamson et al. (1967), Casagrande (1949)
<b>Aço</b>	Bom condutor de eletricidade	Alta taxa de corrosão em presença de solos salinizados.	Bjerrum et al. (1967), Shang and Lo (1997), Shang (1997), Lockhart and Stickland (1984), Lefebvre and Burnotte (2002) Micic et al. (2001), Burnotte et al. (2004a, b), Muraoka et al. (2011), Jayasekera and Hall (2007)
<b>Aço Inoxidável</b>	Fácil de limpar, altamente resistente a arranhões e a corrosão.	Difícil de fabricar, não tão maleável quanto outros metais.	Schmidt (2004), Chien et al. (2009), Liaki et al. (2010), Castro (2010), Deotti (2005), Fernandes et al., 2010, Silveira (2011), Lima (2013)
<b>Fios de Ouro</b>	Não há corrosão e formação de gás perto dos eletrodos.	Altíssimo custo.	Loch et al. (2010)
<b>Platina</b>	Mais resistente a corrosão do que o aço, cobre e alumínio.	Alto custo.	Casagrande (1948, 1952), Evans and Lewis (1970)

Outro parâmetro importante observado em estudos eletrocinéticos são as propriedades elétricas do solo. Usualmente, não há uma distinção clara, em termos de resistividade elétrica, para diferenciar os diversos tipos de solo. Não é possível atribuir um valor específico de resistividade para cada um deles. De maneira geral, são encontrados

diferentes valores para esse parâmetro para uma mesma variedade de solo de localidades distintas. Tal fato se deve à natural heterogeneidade existente nos solos, mesmo que dentro de uma mesma classificação, em termos da real proporção entre seus elementos constituintes, e também das diferentes composições da fase sólida (mineralogia) e da fase líquida (composição química, força iônica). A respeito disso, pode-se proceder a uma caracterização aproximada de faixas de valores usuais de resistividade elétrica, para os diversos tipos de solo (LIMA, 2008).

A Tabela 3.4 apresenta os valores reportados para diferentes materiais e a Tabela 3.5 os valores encontrados para diferentes tipos de solos estudados no Laboratório de Geotecnia da COPPE -UFRJ.

**Tabela 3.4-** Faixas de valores de resistividade elétrica para diversos materiais.

Material	Faixa de Valores ( $\Omega m$ )	Observações e Índices Físicos	Método de Medição	Referência
Ar	1,3 x 10 <sup>6</sup> a 3,3 x 10 <sup>6</sup>	20°C	-	1
Água	1 a 100	Água no solo	-	Fundamentals of Applied And Environmental Geophysics Spring, 2011
	30 a 1000	Água de chuva		
	Da ordem de 0,2	Água do mar		
	105 a 108	Gelo		
Húmus	10 a 150	Condições usuais de umidade <sup>2</sup>	-	Visacro, 2002
	Até 150	-	-	NBR 7117/2012
Limo	20 a 100	Condições usuais de umidade <sup>2</sup>	-	Visacro, 2002
	Até 150	-	-	NBR 7117, 2012
Lama	5 a 100	Condições usuais de umidade <sup>2</sup>	-	Visacro, 2002
	5 a 250			Earthing Techniques <sup>3</sup>
	5 a 100	-	-	Kindermann & Campagnolo, 1995
	Até 150	-	-	NBR 7117, 2012
Terra de Jardim	140 a 480	Condições usuais de umidade <sup>2</sup>	-	Visacro, 2002
	140	50% de umidade	-	Kindermann e Campagnolo, 1995
	480	20% de umidade	-	
Argila	80 a 330	Condições usuais de umidade	-	Visacro, 2002
	300 a 5000	-	-	NBR 7117, 2012
	8 a 70	-	-	Earthing Techniques
	1500 a 5000	Seca <sup>2</sup>	-	Kindermann e Campagnolo, 1995
	80	40% de umidade		
	330	20% de umidade		
	1 a 100	-	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
50 a 150	Muito Secas <sup>2</sup>	-		
Areia	3000 a 8000	Condições usuais de umidade – Comum <sup>2</sup>	-	Visacro, 2002
	1000 a 8000	-	-	NBR 7117, 2012
	200 a 3000	-	-	Earthing Techniques <sup>3</sup>

Material	Faixa de Valores ( $\Omega\text{m}$ )	Observações e Índices Físicos	Método de Medição	Referência
	3000 a 8000	Seca	-	Kindermann e Campagnolo, 1995
	1300	Molhada <sup>2</sup>		
	10 a 800	Areia Aluvionar	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
	50 a 100	Areias recentes	-	
	30 a 215	Areias argilosas ou argilas arenosas	-	
Solo	250 a 1700	Superficial	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
	33	Com 20% de argila	-	
	8	Com 40% de argila	-	
	120 a 750	Laterítico	-	
Hematita	$3,5 \times 10^{-3} - 10^7$	-	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
Pirita	$2,9 \times 10^{-5} - 1,5$	-	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
Calcário	500 a 1000	Condições usuais de umidade/fissurado	-	Visacro, 2002
	1000 a 5000	Condições usuais de umidade/compactado		
	1000 a 5000	Compactado	-	Kindermann e Campagnolo, 1995
	500 a 5000	-	-	NBR 7117, 2012
	50 a 107	-	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
Granito	1500 a 10000	Condições usuais de umidade <sup>3</sup>	-	Visacro, 2002
	10000 a 50000	-	-	Earthing Techniques <sup>3</sup>
	1500 a 10000	-	-	Kindermann e Campagnolo, 1995
	300 a 106	-	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997
Basalto	10000 a 20000	Condições usuais de umidade <sup>2</sup>	-	Visacro, 2002
	10 a $1,3 \times 10^7$	-	-	Telford et al., 1990 e Reynolds, 1997

<sup>1</sup> O ar apresenta elevada resistividade elétrica, porém não foi possível achar uma boa referência:  $\rho = 1,30 \times 10^6$  a  $3,30 \times 10^6 \Omega\text{m}$  a  $20^\circ\text{C}$ ; em S. D. Pawar; P. Murugavel; D. M. Lal (2009). "Effect of relative humidity and sea level pressure on electrical conductivity of air over Indian Ocean". *Journal of Geophysical Research* apud [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistivity\\_and\\_conductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity);

<sup>2</sup> Algumas referências não apresentam a condição da determinação com detalhe suficiente.

<sup>3</sup> Informações disponíveis em documento da empresa: <<http://www.lightningman.com.au/Earthing.pdf>>

(REZENDE & GARCIA, 2016)



**Tabela 3.5 – Valores de resistividade para diferentes tipos de solo – Estudos da Geotecnia/COPPE-UFRJ.**

Material	Faixa de Valores ( $\Omega.m$ )	Observações e Índices Físicos			Método de Medição	Referência
		Índice de Vazios (e)	Umidade Natural (%)	Grau de saturação (%)		
Areia	0,58 – 88,50	0,512	0,06	-	Cone Resistivo	Pacheco, 2004
	0,45 – 18,05	0,514	0,1	-		
		0,427		-		
	0,41 – 15,82	0,528	0,06	-		
Bentonita + Areia	4,81 - 6,36	0,66 - 0,75	20,77 - 25,18	75,16 - 88,87	Como em SCHMIDT (2004).	Lima, 2013
Bentonita + Caulinita	4,35 – 5,88	2,65 - 3,59	98,5 - 134,6%	96,2 – 100	Calculados a partir dos dados de corrente e dimensões da célula eletrocinética através da equação: $\rho = R.AL$	Schmidt, 2004
Caulim	0,8 – 4,05	0,389	-	-	Cone Resistivo	Pacheco, 2004
		0,543	-	-		
		1,78	66,4	99,3		
		1,56	55,3	92,2		
		1,38	49,3	96,5		
		2,23	78,8	94,1		
	1,56	58,5	100			
	4,6 - 8,91	1,08 - 1,44	37-52 - 52,5	88,22 - 93,67	Como em SCHMIDT (2004).	Lima, 2013
	4,5 – 87	1,56 - 1,77	61,18 - 64,65	96,22 – 100	Como em SCHMIDT (2004).	Fabris, 2016

**Tabela3.5** – Valores de resistividade para diferentes tipos de solo – Estudos da Geotecnia/COPPE-UFRJ (cont.).

Material	Faixa de Valores ( $\Omega.m$ )	Observações e Índices Físicos			Método de Medição	Referência
		Índice de Vazios (e)	Umidade Natural (%)	Grau de saturação (%)		
Sedimento Silto-Argiloso, SE	2,86 – 8,33	5,37 - 5,54	265,5 - 257,2	96,2 - 98,8	Calculados a partir dos dados de corrente e dimensões da célula electrocinética através da equação: $\rho = R.AL$	Schmidt, 2004
Solo Argiloso de Sarapuí, RJ	21,4 - 95,3	2,53	133,8	-	Como em SCHMIDT (2004).	Fernandes et al., 2010
	2,0 – 10,0	2,59 - 2,72	96,71 - 105,33	90-94	Como em SCHMIDT (2004).	Carmo, 2016
Solo Tropical Caulinítico, RO	600 - 1537	0,73 - 0,99	24,2 - 35,0	82 - 99,94	Como em SCHMIDT (2004).	Fabris, 2016

Apesar de diversos estudos concernirem sobre os efeitos no solo durante o processo eletrocinético, como apresentado na Tabela 3.1 não se conhece estudos que avaliaram a influência da mineralogia, de sua estrutura e das alterações do pH da solução utilizada durante a aplicação da técnica, sobre os parâmetros elétricos e fluxo eletro-osmótico. Por essa razão, um estudo laboratorial que reproduza essa situação pode contribuir para uma melhor compreensão do comportamento do solo durante a aplicação da técnica.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um solo tropical reconstituído em laboratório pela mistura de amostras indeformadas de diferentes camadas semelhantes entre si. As amostras de solo são provenientes da região de Triunfo no estado de Rondônia, sendo remanescentes da elaboração de um estudo para projeto de eletrodos de aterramento, em 2012, realizado pela professora Dra. Maria Claudia Barbosa, através da Fundação COPPETEC (BARBOSA, 2012) e também utilizado por FABRIS (2016) em seu estudo cujo principal objetivo foi a análise dos parâmetros geotécnicos, físico-químicos e elétricos deste solo. São amostras originalmente indeformadas coletadas com amostrador Denison, cada uma com 60 cm de comprimento e diâmetro interno de 7,5 cm, em um total de treze amostras.

A metodologia empregada na análise do comportamento do solo durante o fenômeno eletrocinético consistiu no monitoramento de alguns parâmetros durante o ensaio, correlacionando-os com as propriedades físico-químicas do solo, como PCZ e a capacidade tampão. Além disso, foi analisado a influência da mineralogia do solo, de sua estrutura e das alterações de pH das soluções utilizadas sobre a direção do fluxo eletro-osmótico, dentre outros efeitos durante o processo eletrocinético.

Para isso, foram realizados sete ensaios eletrocinéticos, todos com os eletrodos de DSA® com as hastes isoladas. . Foram utilizadas três soluções para homogeneização e para abastecimento dos tanques e reservatórios da célula eletrocinética. A primeira utilizada foi a água deionizada com pH=5,96, a segunda solução é fabricada, com pH=6,68, e a terceira solução também fabricada, alterando o seu pH para 4,91.

A fim de possibilitar o entendimento dos efeitos da técnica eletrocinética nas propriedades do solo, alguns ensaios foram realizados em duas situações: antes da aplicação da eletrocinética e após aplicação da eletrocinética. Para entender o comportamento elétrico do solo durante os ensaios EK e os fatores que interferem na quantidade de fluxo eletro-osmótico, foi necessário a caracterização química e mineralógica das amostras. Além dos ensaios eletrocinéticos foram medidas as propriedades térmicas do solo e realizada a curva de retenção do mesmo através do HYPROP, a fim de analisar o comportamento térmico e hidráulico do solo.

Os próximos tópicos descrevem a metodologia e equipamentos empregados na caracterização dos solos, o solo estudado, as soluções utilizadas, além dos procedimentos utilizados durante os ensaios eletrocinéticos.

#### 4.1. SOLO ESTUDADO

O perfil de solo do local de coleta das amostras apresenta camadas de sedimentos de textura e coloração variada, e mesmo dentro de uma mesma amostra é possível observar a heterogeneidade do solo, como observado por Fabris (2016). Nos ensaios eletrocinéticos realizados para o projeto e por Fabris (2016) não foi observado um fluxo ELETRO-OSMÓTICO significativo, às vezes mesmo nulo, embora o gradiente elétrico tenha sido superior ao observado na maioria dos ensaios realizados com o caulim pela mesma autora, o que justifica os baixos valores de  $k_e$  encontrados em seu estudo. Também foi observado que o comportamento do fluxo eletro-osmótico não era linear com o tempo, ou seja,  $k_e$  diminuía durante o ensaio, o que foi atribuído ao efeito das variações do pH sobre a carga de superfície das partículas minerais.

Observados os resultados encontrados por Barbosa (2012) e Fabris (2016), decidiu-se fabricar em laboratório amostras homogeneizadas e menos rígidas a partir das amostras indeformadas coletadas com amostrador Denison em Triunfo, RO. O critério de seleção para a mistura foi baseado nas características físicas e mineralógicas das amostras individuais, de modo a reunir solos semelhantes mineralogicamente e quanto à textura.

Estas amostras reconstituídas serviram para a continuidade da pesquisa com eletrocinética visando investigar a influência da mineralogia, expressa pelo Ponto de Carga Zero, sobre o fenômeno da eletro-osmose e sobre os efeitos da eletrocinética sobre as propriedades geotécnicas em um solo tropical. O principal objetivo foi eliminar a estrutura e rigidez das amostras naturais, porém preservando a composição mineralógica.

O processo de fabricação foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu na fabricação de material seco e caracterização física, mineralógica e físico-química, e a segunda na preparação de amostras úmidas para moldagem dos corpos de prova dos ensaios eletrocinéticos com diferentes líquidos (água deionizada e soluções fabricadas em laboratório).

O processo de fabricação da mistura está detalhado no ANEXO 1 e a Tabela 4.1 apresenta a descrição das amostras utilizadas na mistura depois da retirada dos amostradores e análise táctil-visual, bem como a descrição da camada e da profundidade de cada amostra coletada originalmente. Foram utilizadas 10 amostras no total, e o procedimento foi realizado em parceria com Cravo (2016), sendo a mistura utilizada nas duas pesquisas. A mistura seca foi destorroadada manualmente e

homogeneizada. Para garantir melhor homogeneidade, decidiu-se passar o material na peneira ASTM#10, retirando as pedras e pedregulhos e outras impurezas, mantendo apenas os agregados. Depois de homogeneizado, todo o material foi guardado em um grande saco plástico para posterior quarteamento e armazenamento em caixas com tampas, tendo sido reconstituído cerca de 20 kg de solo para os estudos experimentais. O solo reconstituído foi caracterizado fisicamente e mineralogicamente para comparar com as amostras individuais analisadas anteriormente e verificar a representatividade em relação ao conjunto original de amostras individuais.

**Tabela 4.1** – Descrição das amostras utilizadas na mistura depois da retirada dos amostradores e análise táctil-visual

Identificação		Profundidade (m)	Descrição táctil-visual
T02	AM01	6,00 - 6,41	Silte argiloso com areia fina cinza e marrom arroxado
T02	AM05	39,00 -39,61	Argila siltosa com areia fina, marrom variegada
T02	AM06	39,61 - 40,22	Argila siltosa com areia fina, marrom variegada
T02	AM07	43,00 - 43,61	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela
T02	AM08	43,61 - 44,22	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela
T03	AM01	15,00 - 15,61	Argila siltosa, com areia fina, com pedregulho fino a médio, marrom variegado
T03	AM02	15,61 - 16,22	Argila siltosa com areia fina e pedregulhos finos e médios, marrom variegado
T03	AM03	40,00 - 40,61	Argila pouco siltosa com areia fina, marrom e amarela
T03	AM04	40,61 - 41,22	Argila pouco siltosa com areia fina, marrom e amarela
T04	AM01	12,00 - 12,61	Silte argiloso, c/ areia média, c/ pedregulho fino, roxo amarronzado e cinza

#### 4.2. SOLUÇÕES UTILIZADAS

Foram utilizadas três soluções para homogeneização dos corpos de prova e para abastecimento dos tanques e reservatórios da célula eletrocinética.

A primeira solução utilizada foi a água deionizada. A segunda solução foi fabricada em laboratório, preparada com referência nas análises químicas da água subterrânea da região na qual as amostras foram extraídas. A ideia de utilizar esta solução é simular uma situação real e poder comparar com estudos anteriores. A terceira solução também foi fabricada, alterando apenas o pH em relação à solução reconstituída anterior.

Foram analisadas algumas características das soluções como: pH, condutividade elétrica específica, Na, K, dureza, Cloreto e  $\text{HCO}_3^-$  e os resultados são mostrados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Análise química das soluções utilizadas nos ensaios eletrocinéticos

	Solução fabricada 01	Solução fabricada 02	Água deionizada
<b>pH</b>	6,68	4,91	5,96
<b>CE (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	40,5	39,3	3,8
<b>Potencial Redox</b>	-	-	392
<b>Na (mg/L)</b>	3,3	2,7	-
<b>K (mg/L)</b>	2,3	2,3	-
<b>Dureza pelo EDTA (<math>\text{mgCaCO}_3/\text{L}</math>)</b>	9,5	8,5	-
<b>Cloreto (mg/L)</b>	3,2	3	-
<b><math>\text{HCO}_3^-</math> (mg <math>\text{CaCO}_3/\text{L}</math>)</b>	23	19,2	-

A determinação do pH foi feita através de potenciômetro da marca Analion - modelo 606F, com eletrodo combinado (Analion V620), a condutividade (CE), determinada diretamente em condutivímetro da marca OAKTON - modelo PC 300.

Na e K foram medidos por fotometria de chama, onde a solução da amostra é aspirada e nebulizada em condições controladas em uma chama, determinando-se o elemento através da medida da intensidade da radiação emitida pelo seu átomo, através do aparelho da marca Micronal - modelo B262.

Para determinação da Dureza, utilizou-se o método FEEMA (MF442).

O cloreto foi determinado pelo método colorimétrico através da formação de um complexo de tiocianato férrico de coloração intensa, proporcional à concentração do íon cloreto, tendo a máxima absorvância no comprimento de onda de 460 nm, através do aparelho espectrofotômetro UV-Visível da marca Shimadzu - modelo UV MINI-1240. Por fim, o bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), foi determinado pelo método de alcalinidade (Método FEEMA 441.R1).

### 4.3. PLANO DE ENSAIOS

A Tabela 4. 3 apresenta o plano de ensaios eletrocinéticos realizados, abordando as soluções utilizadas em cada ensaio, pH dessas soluções, voltagem aplicada durante o ensaio e sua duração.

**Tabela 4.3 - Plano de ensaios eletrocinéticos**

<b>Ensaio</b>	<b>Solução Utilizada</b>	<b>pH da solução</b>	<b>Voltagem aplicada</b>	<b>Duração do ensaio</b>
<b>EK01 - A</b>	Água deionizada	5,96	10 V	90 horas
<b>EK01 - B</b>	Água deionizada	5,96	10 V	91 horas
<b>EK02 - A</b>	Solução fabricada	6,68	10 V	92 horas
<b>EK02 - B</b>	Solução fabricada	6,68	10 V	93 horas
<b>EK03 - A</b>	Solução fabricada	4,91	10 V	94 horas
<b>EK03 - B</b>	Solução fabricada	4,91	10 V	95 horas
<b>EK04</b>	Água deionizada	6,68	15 V	96 horas

A Tabela 4.4 resume os ensaios realizados em todas as amostras, sem submeter o solo ao procedimento eletrocinético e após o ensaio eletrocinético. .

**Tabela 4.4 - Plano de Ensaios Pré e Pós EK**

<b>Pré EK</b>	<b>Pós EK</b>
Eh, CEE, pH, densidade real dos grãos, limites de Atterberg, granulometria, teor de matéria orgânica, teor de umidade, capacidade de troca catiônica, ataque sulfúrico, ponto de carga zero, capacidade tampão, difração de raios-x, propriedades térmicas e curva de retenção de água.	Eh, CEE, pH, limites de Atterberg, teor de umidade, propriedades térmicas.

### 4.4. MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE ELETROCINÉTICA

O procedimento de moldagem do corpo de prova da mistura foi o mesmo utilizado por Fabris (2016) para moldagem do Caulim. Desejava-se obter uma umidade inicial próximo ao limite de liquidez da mistura, e uma densidade total do solo em torno de 1,6 g/cm<sup>3</sup> para representar a condição média original. Para isso, adicionou-se 900 g da



mistura seca (Figura 4.1) e aproximadamente 1000 ml de água deionizada (Figura 4.2). A mistura era feita por partes, adicionava-se aos poucos o solo e a água e com movimentos circulares era feita a mistura até que ficasse com uma aparência homogênea (Figura 4.3 - A).

Após totalmente misturado (Figura 4.3 – B), o solo era embalado e levado à câmara úmida, onde permanecia por três dias para equilibrar físico-quimicamente.



**Figura 4.1** - Pesagem do solo seco para moldagem do corpo de prova



**Figura 4.2** - Pesagem da água deionizada para moldagem do corpo de prova



**Figura 4.3** - Homogeneização da mistura com água inicial

A) Movimentos Circulares; B) Mistura Homogeneizada

A fim de padronizar os parâmetros antes da eletrocinética como o teor de umidade, o peso específico e o índice de vazios inicial, optou-se pela moldagem por adensamento. Para isto, utilizou-se o procedimento semelhante ao de Schmidt (2004) e Fabris (2016), com apenas algumas alterações.

Cravo (2016) realizou ensaios de adensamento para determinação dos parâmetros de moldagem, primeiramente com 1,5 vezes o limite de liquidez (LL), porém constatou que o solo nesta condição não atingiu a consistência ideal para moldagem. Foram feitos testes empiricamente e chegou-se a uma condição ideal para moldagem com cerca de 1,15 LL.

Com base nos resultados encontrados por Cravo (2016) nos ensaios de adensamento da mistura com 1,15LL, para um carregamento de 150 kPa, o índice de vazios aproximou-se do encontrado nas amostras indeformadas, decidiu-se então aplicar esta carga durante o adensamento para moldagem.

Como este nível de tensão nunca fora anteriormente aplicado neste aparato, alguns cuidados foram tomados previamente, incluindo uma moldagem teste, como descrito no trabalho de Cravo (2016).

Adicionou-se então a mistura ao aparato de adensamento, aplicando-se golpes em cada lado da base da célula e com o cilindro na vertical para eliminar as bolhas de ar. A célula de moldagem (Figura 4.4) consiste em um conjunto formado pelo tubo da amostra utilizado nos ensaios, adaptado na posição vertical a uma base com reservatório, e um topo vazado que funciona como um prolongamento do tubo da amostra (SCHMIDT, 2004).



**Figura 4.4** - Célula de moldagem – colarinho, topo, tubo da amostra, base e tirantes de metal.

(SCHMIDT, 2004)

Colocou-se um papel filtro na base e no topo da célula de moldagem, e o papel filtro da base foi cortado com um diâmetro um pouco maior, aproximadamente 0,5 cm, para evitar que ao realizar os golpes para eliminar as bolhas de ar, o papel viesse alterar a sua posição e rasgar.

O pendural era então posicionado acima do pistão dando início ao adensamento propriamente dito (Figura 4.5).



**Figura 4.5 – Adensamento**

Foram utilizados 6 estágios de carregamentos, correspondentes a 6,0 kPa, 9,8 kPa, 18,8 kPa, 37,5 kPa, 75 kPa e 150 kPa. O primeiro carregamento era aplicado 4h após a montagem do pendural, o segundo 24 h após o início, o terceiro 48h após iniciar o adensamento e assim por diante, sempre com intervalos de 24h, apenas o último estágio permanecia por um período de 72 horas. O processo de adensamento tinha duração de sete dias, quando a célula era retirada e o sistema eletrocinético montado. A Tabela 4.5 apresenta as cargas e o período de aplicação das mesmas durante o procedimento de moldagem por adensamento.

**Tabela 4.5 - Cargas e período de aplicação**

<b>Estágio</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Carga (kPa)</b>	6	9,8	18,8	37,5	75	150
<b>Período (h)</b>	4	20	24	24	24	72

Eram realizadas leituras no extensômetro antes e após cada carregamento e também se adicionava um pouco de solução no topo da célula ao longo dos sete dias.

Para desmontar o aparato de adensamento, e garantir que não houvesse trincas por alívio de tensão, decidiu-se descomprimir o solo em estágios. Inicialmente a carga foi reduzida de 150 para 75kPa, estabilizando a expansão após 30 minutos, e esta duração

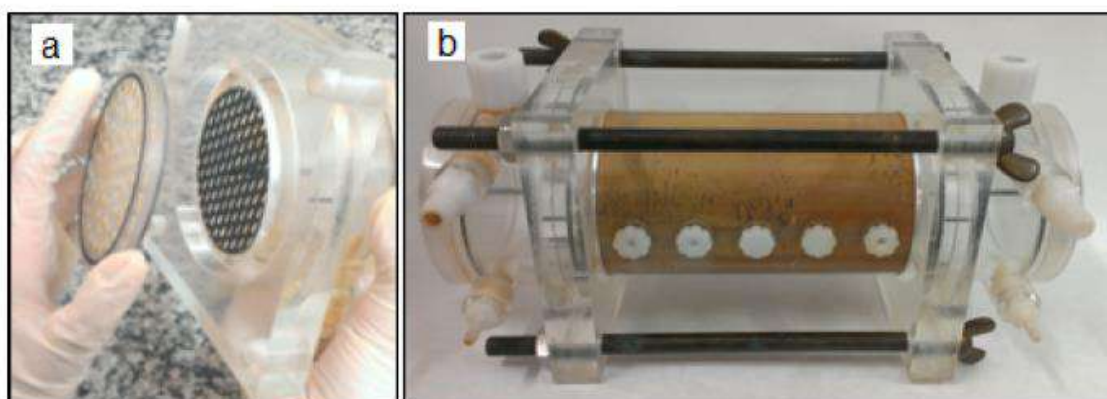
também foi empregada nos outros estágios de 75 para 37,5kPa e por final somente a carga do pendural (cerca de 6kPa).

Todo esse procedimento foi planejado e testado em parceria com Cravo (2016), e repetido para todos os corpos de prova da pesquisa.

#### 4.5. CÉLULA ELETROCINÉTICA

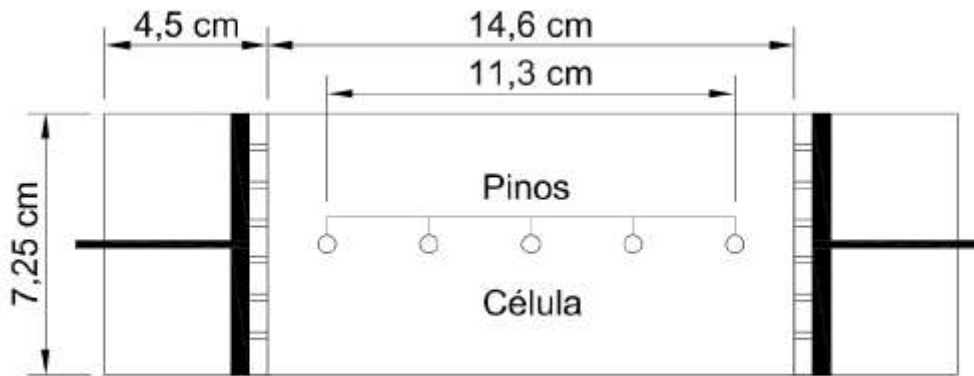
O equipamento utilizado foi desenvolvido no Laboratório de Geotecnia do Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ por Schmidt (2004) para pesquisa da aplicação da eletrocinética para remediação de solos contaminados e já foi utilizado em diversos outros estudos.

A célula EK (célula eletrocinética) consiste em um tubo de acrílico cilíndrico, ligado a dois tanques também cilíndricos onde os eletrodos são posicionados e o potencial elétrico é aplicado (ddp total), conforme Figura 4.6. A utilização de eletrodos de DSA® (Figura 4.8) foi uma adaptação implementada por Carmo (2016) e Fabris (2016) no sistema original idealizado e construído por Schmidt (2004), em que eram usados eletrodos de aço inox. As dimensões da célula eletrocinética estão apresentadas na Figura 4.7.



**Figura 4.6** - Célula montada - a) encaixe do disco perfurado no eletrodo DSA®; b) célula eletrocinética montada

(Fabris, 2016)



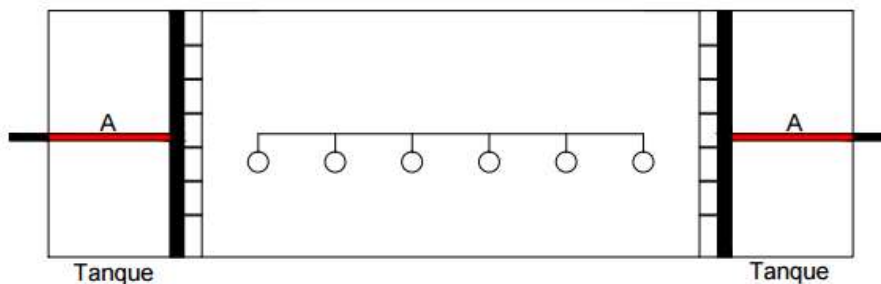
**Figura 4.7** - Dimensões da célula eletrocinética

Os eletrodos de DSA® são compostos de titânio e revestidos com óxidos de diferentes elementos, como irídio, rutênio, platina, ródio e tântalo. O uso de eletrodos tipo DSA® teve como objetivo reduzir ou eliminar a corrosão dos eletrodos e a consequente liberação de íons indesejáveis no solo, conforme relatado nos estudos realizados, até o presente, no Laboratório de Geotecnia. Além disso, os eletrodos foram fabricados em rede expandida laminada com malha formada por aberturas em forma de diamante de 12,7 mm por 5,6 mm, que permitiam a passagem do fluido entre o solo e o tanque (CARMO, 2016), e fabricados sob encomenda pela De Nora do Brasil Ltda.



**Figura 4.8** - Eletrodos de DSA® do Laboratório de Geotecnia, COPPE-UFRJ

O objetivo de substituir o modelo proposto por Schmidt (2004) era para que os eletrodos permanecessem juntos às faces da amostra de solo, evitando assim a perda de potencial elétrico dentro dos tanques de circulação das soluções. Porém essa adaptação permitia ainda que a haste estivesse em contato com as soluções, conforme Figura 4.9.



**Figura 4.9** - Posição dos eletrodos: A - Contato da haste com a solução nos tanques

A fim de otimizar ainda mais o ensaio eletrocinético, evitando a perda de potencial elétrico dentro dos tanques, foi testado um isolante elétrico líquido da marca Quimatec (Figura 4.10). Foram aplicadas três camadas do isolante na superfície da haste dos eletrodos e esperado 24 horas para garantir que o mesmo estivesse seco.



**Figura 4.10** - Isolante utilizado nos eletrodos

Após 24 horas os dois eletrodos foram imersos em duas soluções de Nitrato de Potássio ( $\text{KNO}_3$ ) com  $\text{pH}=3,5$  e  $\text{pH}=8,6$  e permaneceram por 30 dias, conforme Figura 4.11. O objetivo desse procedimento era avaliar se o isolante reagiria com as soluções utilizadas nos tanques vindo a liberar algum composto e/ou alterasse o  $\text{pH}$  das soluções. O resultado do teste foi satisfatório, nenhuma alteração foi observada e então se decidiu utilizar os eletrodos com hastes isoladas em todos os ensaios eletrocinéticos.



**Figura 4.11** - Teste do Eletrodo por imersão em soluções com diferentes pH

O tubo de acrílico é o equipamento para a amostra de solo, ele apresenta 14,6 cm de comprimento e 7,25 cm de diâmetro interno, possui cinco pinos de voltagem alinhados ao longo de seu comprimento e a comunicação com os tanques é feita através de discos de acrílico perfurados.

Os tanques possuem tubos de vidro onde os gases são eliminados e também duas mangueiras acopladas a dois reservatórios que estão posicionados em altura superior ao cilindro. A circulação de fluido acontece por gravidade do tanque para o reservatório e por bombeamento do reservatório para o tanque por duas bombas peristálticas (Figura 4.12). Os dois reservatórios apresentam um furo circular na mesma altura para funcionar como ladrão e garantir que não se forme um gradiente hidráulico durante o ensaio. O ensaio é monitorado e sempre que o líquido em um dos reservatórios cai a um nível abaixo da posição do furo, o reservatório é preenchido manualmente até o nível.



**Figura 4.12** - Bombas Peristálticas



(LIMA, 2013)

Para medição do fluxo eletro-osmótico, utiliza-se um transmissor de pressão modelo S-10 da Wika (0-0,1 bar), colocado no fundo de uma coluna que recebe o líquido proveniente do ensaio.

Alguns parâmetros são verificados ao longo do ensaio, através de um sistema de monitoramento implantado na célula e ligado a um sistema de aquisição de dados.

O sistema de aquisição de dados é composto por um módulo de interface serial e dois módulos de aquisição de dados da SDC, que recebem dados dos sensores da micro instrumentação e o transmitem a um computador. O sistema de aquisição e o software foram desenvolvidos por um funcionário do Laboratório de Geotecnia, o Engenheiro Eletricista Ricardo Gil.

A fonte de alimentação utilizada é digital da marca ICEL, modelo PS-4100 (Figura 4.13).



**Figura 4.13** - Fonte de alimentação digital

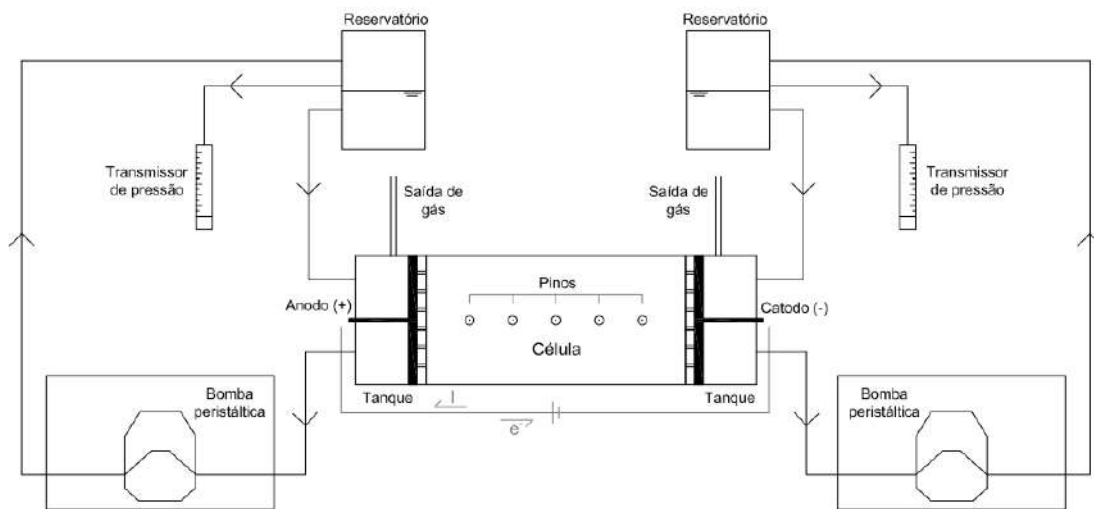
(LIMA, 2013)

O sistema de aquisição automática de dados monitora a tensão total aplicada, a tensão ou potencial elétrico nos cinco pinos de voltagem, a corrente elétrica (em um circuito paralelo à célula, de resistência elétrica conhecida), a temperatura através de termopares e o fluxo eletro-osmótico durante o processo.

Os parâmetros lidos nos canais seguem a seguinte distribuição:

- Canal 1 – leitura da diferença de potencial total (ddp) (V);
- Canais 2 a 6 – leitura do potencial elétrico nos pinos inseridos no solo (V);
- Canal 7 - leitura da corrente elétrica (mA);
- Canais 8 e 9 – leitura do fluxo eletro-osmótico acumulado (mL)
- Canal 10 – leitura da temperatura do meio (°C)

O esquema geral do equipamento desenvolvido está apresentado na Figura 4.14.



**Figura 4.14 - Esquema Geral – Célula Eletrocinética**

(FABRIS, 2016)

A montagem da célula era finalizada após a moldagem do corpo de prova acoplando-se os discos perfurados e os eletrodos aos tanques e estes fixados no cilindro de acrílico. Todo o conjunto era preso com quatro tirantes e então levados para uma prateleira onde era acoplados os reservatórios, as mangueiras, os pinos de medição de voltagem e de temperatura e os tubos de vidro.

Após a montagem do sistema, os reservatórios eram preenchidos com a solução a ser utilizada até que as mangueiras e o tanques estivessem completamente preenchidos. O sistema de bombas peristálticas era então ligado por pelo menos 30 minutos, a fim de garantir a circulação da mesma por todo o sistema. Os terminais da fonte eram conectados às hastes dos eletrodos e finalmente o sistema de aquisição de dados e a

fonte eram então ligados, iniciando-se o ensaio. A Figura 4.15 apresenta o equipamento eletrocinético em funcionamento.



**Figura 4.15** - Equipamento eletrocinético em funcionamento

#### 4.6. MEDIDOR DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

Para medir as propriedades térmicas do solo, foi utilizada uma sonda de imersão KD2 da Decagon, adquirido recentemente pelo Laboratório de Geotecnia Ambiental da COPPE-UFRJ, com recursos da Faperj (Projeto APQ1 – 210.788/2014). O modelo é apresentado na Figura 4.16.



**Figura 4.16** - Medidor de Propriedades Térmicas KD2

(DECAGON DEVICES, 2016)

O KD2 é um medidor de propriedades térmicas totalmente portátil para campo e para laboratório. Ele utiliza o método de fonte de calor linear transiente, possui sensores intercambiáveis que medem condutividade térmica e resistividade, difusividade térmica e calor específico, com capacidade de armazenamento de dados interno e um modo automático de obtenção de dados.

São três os sensores disponíveis no sistema do Laboratório de Geotecnia:

KS1: sensor para condutividade e resistividade térmica em líquidos

TR1: sensor para condutividade e resistividade térmica em sólidos

SH1: sensor com duas agulhas para difusividade térmica e calor específico em sólidos

A sonda tem aplicações em estudos de fluxo de calor em solos, no balanço de energia, em projetos geotérmicos, dissipação de calor em linhas elétricas enterradas e em propriedades térmicas em relação ao teor de umidade e densidade de solos. A sonda de aço inoxidável fornece um fluxo de calor constante quando inserida no material ensaiado. Este fluxo é mantido até que o equilíbrio entre a energia térmica transferida e a energia térmica dissipada seja estabelecido.

De acordo com Farouki (1986) e Jackson e Taylor (1986), o método da sonda térmica (agulha térmica) é o método mais rápido e conveniente para medir condutividade térmica de solos em campo e em laboratório. Dentre os métodos de medição existentes,

este tem sido bastante utilizado pela sua facilidade de execução e rapidez na obtenção dos resultados (PÉSSOA, 2006).

Este método consiste em submeter o meio poroso a um fluxo de calor conhecido e constante, gerado a partir de uma agulha térmica inserida no solo. Através da evolução da temperatura da sonda com o tempo determina-se a condutividade térmica do solo. A razão de aumento da temperatura da sonda depende da condutividade do meio no qual ela está inserida, ou seja, quanto maior a condutividade térmica do solo, menor retenção de calor na sonda, menor variação de temperatura em função do tempo.

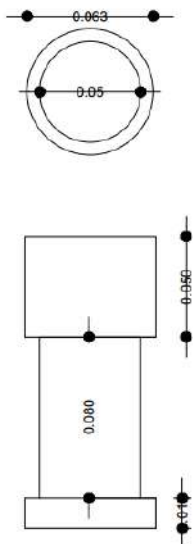
Foram realizados três ensaios, um com o solo seco e destorroado e dois com o solo moldado e adensado conforme procedimento descrito no item 4.4, sendo um pré ensaio EK e um pós ensaio EK (fatia do meio).

Para as duas amostras adensadas, utilizou-se como solução a reconstituída com pH=6,68. Criou-se então um aparato para ensaio, que consiste em um cilindro de polietileno de 1,5 cm, por ser um material isolante, conforme indicado no manual do equipamento. Além disso, utilizou-se uma caixa de isopor para garantir o controle da temperatura, procedimento também indicado no manual do equipamento. O cilindro possui 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura e possui uma base de 8 cm de altura para facilitar a medição. Foram realizadas quatro medições para cada amostra, com intervalos de 15 minutos entre uma leitura e outra. Utilizou-se o sensor SH-1.

A Figura 4.17 apresenta fotografias do aparato, dos corpos de prova e o conjunto para medição dos parâmetros térmicos e a Figura 4.18 as dimensões do aparato.



**Figura 4.17** - Medição das propriedades térmicas: aparato cilíndrico para corpo de prova (a), corpo de prova solo seco (b), corpo de prova solo adensado (c), conjunto de medição.



**Figura 4.18** – Dimensões do aparato para medição das propriedades térmicas

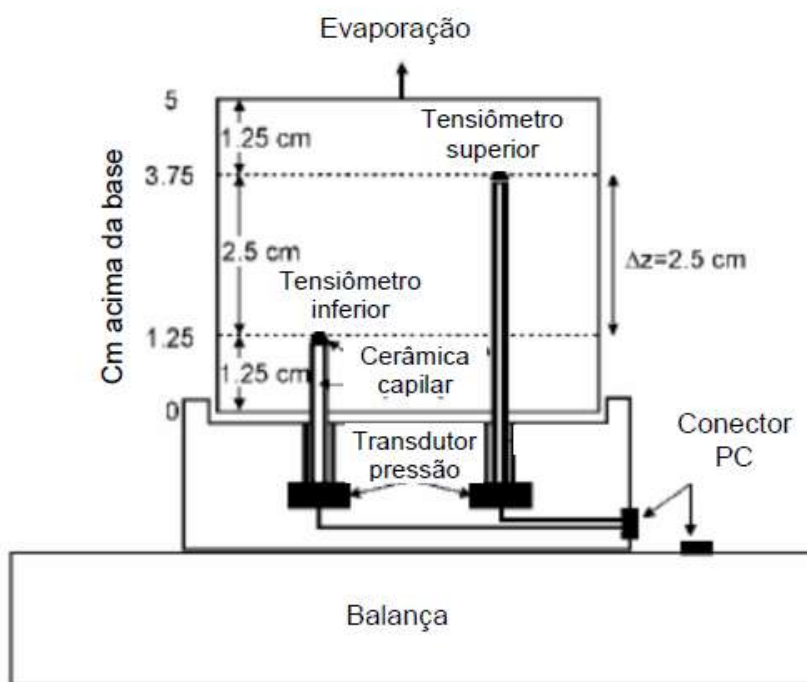
#### 4.7 DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM HYPROP

O Hyprop é um sistema para determinação de curvas de retenção de água no solo e condutividade hidráulica não saturada. O sistema utiliza o princípio de evaporação de acordo com o método de Wind/Schindler, 1980. O sistema foi desenvolvido por Durner e Peters, 2006. Os dados podem ser ajustados a um modelo matemático padrão selecionável como o modelo de Van Genuchten/Mualem, bimodal Van Genuchten / Mualem ou Brooks e Corey.

Durante o ensaio, a sucção matricial é monitorada pelos tensiômetros posicionados em 1,25 e 3,75 cm em relação à base do corpo de prova de 5 cm de altura, tendo as medidas das sucções dadas a cada minuto durante a primeira hora, seguidos de intervalos de 10 minutos até o final do ensaio; o mesmo para o peso registrado pela balança de precisão. Foram utilizados anéis de 250 ml cravados em amostras adensadas e saturadas da base para o topo com a solução fabricada de pH=6,68 e degaseificada por ascensão capilar até a altura 4,95 cm do anel. A saturação, tanto dos tensiômetros quanto da unidade sensora, foi feita com água deionizada e degaseificada envolvendo o uso de bomba a vácuo por 24 horas. Todo o procedimento seguiu as instruções do fabricante contempladas no manual do aparelho.

O equipamento é constituído por uma unidade sensora onde se encontram os transdutores de pressões nos quais são acoplados os dois tensiômetros. A Figura 4.19 representa-o esquematicamente.

O equipamento disponível no Laboratório de Geotecnia da COPPE-UFRJ pertence ao CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) e está instalado nesse laboratório para uso comum. Foram providenciadas com recursos da COPPE-UFRJ algumas atualizações no equipamento e software originais em 2015 e 2016 para manutenção e aprimoramento.



**Figura 4.19** – Representação esquemática do HYPROP  
(modificado de SCHINDLER et al, apud COELHO, 2016)

#### 4.8 ENSAIOS REALIZADOS ANTES DO ENSAIO ELETROCINÉTICO

##### 4.8.1 Índices Físicos e Matéria Orgânica

Foram realizados ensaios de limites de Atterberg, densidade real dos grãos e ensaios de granulometria com e sem defloculante, no Setor de Caracterização do Laboratório de Geotecnia. Os procedimentos seguiram as normas correspondentes da ABNT, à exceção do ensaio sem defloculante: NBR 6457:1986; NBR 6508:1984; NBR 7181:1984/1988; NBR 6459:1984; NBR 7180:1984/1988.

O ensaio sem defloculante não foi satisfatório, a amostra sedimentava rapidamente e não era possível realizar as leituras no densímetro. Observou-se que na condição de dissolução do ensaio o material apresentava floculação excessiva, formando uma



espécie de 'nuvem' na proveta, mostrada na Figura 4.20, que gerava uma resistência à oscilação do densímetro.



**Figura 4.20** - Flocculação durante sedimentação sem defloculante

(CRAVO, 2016)

Para resolver esse problema, diminuiu-se a quantidade de solo utilizado neste ensaio. Conforme a NBR ABNT 650:1995 para análise granulométrica de solos siltsos e argilosos, utiliza-se 70g desse solo. Diminuímos essa quantidade em 50% e o problema permaneceu.

Sem a adição do dispersante, as cargas presentes nas arestas da caulinita favorecem o arranjo flocculado do argilomineral. Como esse arranjo é mais denso, a sedimentação do solo ocorre mais rapidamente e a Lei de Stokes não considera esse tipo de interação entre as partículas, o que inviabiliza a interpretação do ensaio para determinação da curva granulométrica.

Precedendo o ensaio eletrocinético, também foi analisada a porcentagem em massa seca de matéria orgânica presente na mistura e também nas frações. Foram realizadas análises do teor de matéria orgânica da mistura e também de outros três materiais (agregados vermelhos, cinza claro e amarelado), conforme descrito no ANEXO I. Estas análises foram realizadas no Setor de Físico-Química do Laboratório de Geotecnia, seguindo o método descrito em EMBRAPA (1997).

O teor de carbono orgânico foi determinado por oxidação com dicromato de potássio em meio sulfúrico, usando o sulfato de prata como catalisador, sendo o excesso de dicromato após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de sulfato ferroso

amoniaco, utilizando difenilamina como indicador. O teor de carbono assim obtido é multiplicado por 1,724 obtendo-se o teor de matéria orgânica. Este fator é utilizado em virtude de se admitir que, na composição média do húmus, o carbono participa com 58% (EMBRAPA,1997)

#### 4.8.2 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A capacidade de troca de cátions (CTC) de um solo representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ). A CTC é função do tipo e quantidade de argila presente no solo e da presença de matéria orgânica. A matéria orgânica aumenta a capacidade de adsorção de cátions pelo solo e é, portanto, uma importante fonte de contribuição para a CTC.

Foi adotado o procedimento descrito em EMBRAPA (1997), onde a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é dada pelo valor T, que corresponde à soma do Valor S (soma das bases trocáveis) com os teores de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ , ou seja, considera todos os cátions permutáveis do solo.

O valor V denomina-se saturação por bases e significa a soma das bases trocáveis expressa em porcentagem de capacidade de troca de cátions. O Valor V é calculado conforme apresentado na equação 4.1 e é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, sendo utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos.

$$V (\%) = \frac{(100 \cdot \text{Valor S})}{\text{Valor T}} \quad (4.1)$$

As análises foram realizadas pela EMBRAPA para as bases trocáveis  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e os íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ .

#### 4.8.3 Ataque Sulfúrico e pH

O ensaio foi realizado no Setor de Físico-Química do Laboratório de Geotecnia, empregando o seguinte procedimento, de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (1997) e modificado pelo setor de Físico-Química do laboratório de Geotecnia da COPPE .

## Ataque Sulfúrico

1. Aquecimento a 650° C.
2. A amostra calcinada foi tratada com ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e no extrato obtido foram analisados os teores de Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
3. O resíduo foi tratado com hidróxido de sódio (NaOH 0,5N) e no extrato assim obtido foi analisada a percentagem de sílica (SiO<sub>2</sub>).
4. O resíduo final foi calcinado a 1000°C, calculando-se então a percentagem de material primário não atacado pelo tratamento (% Res.)
  - 4.1 Determinação de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%) : por complexometria pelo EDTA, utilizando o ácido salicílico como indicador.
  - 4.2 Determinação de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%): - por complexometria pelo EDTA, tendo retirado o ferro por precipitação e utilizando o Xylenol Orange como indicador.
  - 4.3 Determinação de SiO<sub>2</sub> (%): por colorimetria com molibdato de amônio, desenvolvendo o composto amarelo que absorve no comprimento de onda de 410 nm. Leitura no Espectrofotômetro Shimadzu UV-mini 1240.

## pH

Medição do potencial eletronicamente (Aparelho: Analion Mod.: PM606F ) por meio de eletrodo combinado (Analion – mod: V620) imerso em suspensão solo: líquido ( H<sub>2</sub>O e KCl 1N ) na proporção 1 : 2,5.

### 4.8.4 Ponto de Carga Zero (PCZ)

O PCZ foi obtido conforme metodologia da Embrapa (2011), que determina o ponto de efeito salino nulo (PESN). Colocou-se 4,0 g de solo em 45 bécheres, numerando-os de 1 a 45 e ordenando-os em quatro filas de 15, conforme Figura 4.21.



**Figura 4.21** – Adição das soluções diferentes concentrações para determinação do PCZ

Adicionou-se 10ml de KCl 0,2M, 0,02M, 0,002M nos bécheres das filas I, II e III, respectivamente, e nos bécheres de números 1 a 7, 16 a 22 e de 31 a 37: 0,25, 0,50, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3ml de HCl 0,1N; e nos de números 9 a 15, 24 a 30 e 39 a 45: 0,25, 0,50, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0ml de NaOH 0,1N. E por fim adicionou-se água deionizada em cada um dos bécheres até completar o volume de 20ml.

Após esta etapa, colocou-se os 45 bécheres em um misturador durante 4 dias, agitando-os ocasionalmente.

Após o repouso de 4 dias, determinou-se o pH das 45 soluções. Esse procedimento também foi realizado apenas para as soluções, sem o solo (branco).

Utilizou-se então um programa computacional desenvolvido por Alves et. al (2002), chamado PESN, o qual determina o ponto de interseção a partir de resultados experimentais de pH,  $H^+$  e  $OH^-$ , sendo este um método analítico-computacional bastante adequado para determinação rápida e não-subjetiva do Ponto de Carga Zero de amostras de solo. As leituras dos pHs das duas amostras estão apresentadas no ANEXO II.

#### 4.8.5 Capacidade Tampão

A capacidade tampão do solo foi analisada no Setor de Físico-Química do Laboratório de Geotecnia, com base na metodologia desenvolvida por YONG (1990). De forma simplificada, o procedimento consiste na adição de volumes de concentrações conhecidas de um ácido e de uma base fortes e no registro das variações de pH.

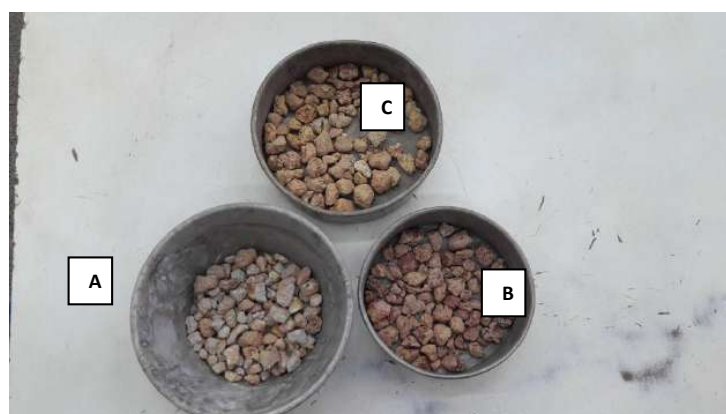
Utilizou-se soluções de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), preparadas em tubos falcon, nas concentrações de 0,01M a 0,2M, a partir de uma solução 1M, com volumes variando de 0,4 ml a 8,0 ml.

Os tubos foram preenchidos com água deionizada até a marca de 40 ml, registrou-se os valores de pH das soluções (branco), pesou-se 4g de solo seco em outros 40 tubos para então verter as soluções. Após esse procedimento, colocou-se as amostras no agitador e após 24h centrifugou-se as amostras para então realizar as leituras do pH do sobrenadante. Os resultados foram expressos em termos de centimol de  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$  por kg de solo seco.

#### 4.8.6 Difração de Raios-X (DRX)

As análises de DRX foram realizadas no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Foi utilizado o aparelho D4 Endever da marca Brucker com tubo de cobalto.

Foram realizadas análises da Mistura e também de outros três materiais (agregados vermelhos, cinza claro e amarelado), conforme descrito no ANEXO I e mostrado nas Figura 4.22 e Figura 4.23.



**Figura 4.22 - Material separado para DRX**

A) Agregados Cinza; B) Agregados Vermelho; C) Agregados Amarelo;

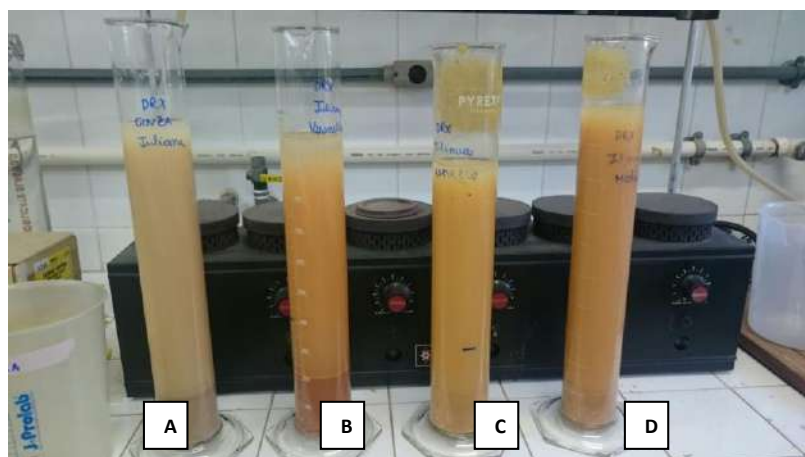


**Figura 4.23** - Material após lavagem, secagem em estufa de 40°C e destorroamento

A) Agregados Cinza; B) Agregados Vermelho; C) Agregados Amarelo; D) Mistura

As análises foram realizadas com a amostra integral e para os argilominerais da fração fina. Para separação dos argilominerais, foi seguido o seguinte procedimento, no Setor de Físico-Química do Laboratório de Geotecnia:

- 1) Peneirar o solo na ASTM #100
- 2) Pesar 50 g da amostra em becker de 250 ml de polietileno.
- 3) Colocar 10 ml de NaOH 0,5 N, 100 ml de água destilada e agitar com bastão de vidro durante dois minutos.
- 4) Deixar em repouso por uma noite (Figura 4.24).



**Figura 4.24** - Amostras após agitação

A) Agregados Cinza; B) Agregados Vermelho; C) Agregados Amarelo; D) Mistura

- 5) No dia seguinte, agitar com bastão, deixar dois minutos no ultrassom e transferir para coqueteleira com auxílio de 200 ml de água destilada. Deixar agitando durante 15 minutos.
- 6) Passar pela peneira ASTM #270 lavando um pouco com o auxílio de um pistão com água destilada.
- 7) Transferir o que passou pela peneira para proveta de 1000 ml, onde se fez um risco 20 cm abaixo da marca dos 1000 ml.
- 8) Completar o volume da proveta (1000 ml), agitar com o agitador próprio por 2 minutos e deixar 24h em repouso absoluto em lugar alto.
- 9) Recolher o líquido até a marca feita, com o auxílio de um tubo plástico em frasco de 2000 ml por sifonação (Figura 4.25).



**Figura 4.25** - Recolhimento do líquido por sifonação (Amostra A – Agregados Cinza)

- 10) Colocar 10 ml de HCl 1N, agitar para flocular e retirar o excesso de água límpida.
- 11) Centrifugar a mistura argila/água usando sempre o mesmo tubo, para acumular toda a argila nele e jogar fora o sobrenadante.
- 12) Lavar com água destilada: colocar água destilada e mexer bastante com bastão desgrudando a argila do fundo e das paredes e centrifugar novamente. Repetir a operação até a amostra dispersar.
- 13) Retirar argila do tubo e guardá-la
  - a. Os passos 10, 11 e 12 eram repetidos aproximadamente 4 vezes, até que todo o HCl fosse lavado do solo. Para certificação adicionava  $\text{AgNO}_3$  e a

alteração do aspecto do líquido de límpido para turvo indicava a presença de sal na solução.

- 14)** Após a lavagem na centrífuga o solo foi deixado em geladeira por 3 dias e depois levado à estufa de 40° C por pelo menos mais 24h, para secagem. Após secagem o solo foi destorroado e as amostras prontas para o DRX.

Ao todo, foram realizados quatro análises de DRX. para cada amostra. O primeiro consistiu em analisar o solo total cuja granulometria era inferior a 0,15 mm e os outros três procedimentos foram realizados na fração argila ( $\phi < 0,002$  mm), sendo: natural, tratado com etileno glicol e aquecido a 500°C. Os dois últimos procedimentos (tratado com etileno glicol e aquecimento) foram realizados no laboratório do CETEM. As análises da fração argila foram realizadas com amostras em lâminas orientadas de vidro, conforme Figura 4.26.



**Figura 4.26** - Lâminas orientadas preparadas para análises de DRX

#### 4.9 ENSAIOS REALIZADOS APÓS ENSAIO DE ELETROCINÉTICA

Após o ensaio de eletrocinética, foram realizadas medições do Potencial Redox (Eh), pH e Condutividade Elétrica Específica (CEE) da solução intersticial do solo e também determinação dos limites de Atterberg de cada amostra de solo nas regiões do anodo, meio e catodo.

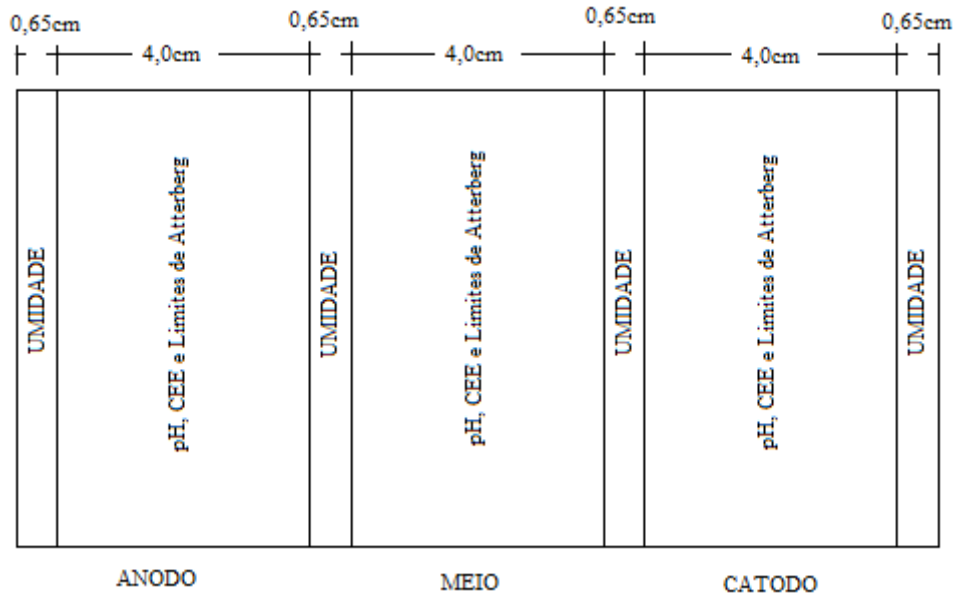


Para isso, o solo foi extrudado da célula, com a ajuda de um pistão, conforme Figura 4.27 posicionado na bancada e com a ajuda de um fio metálico era dividido em três fatias, denominadas anodo, meio e catodo.

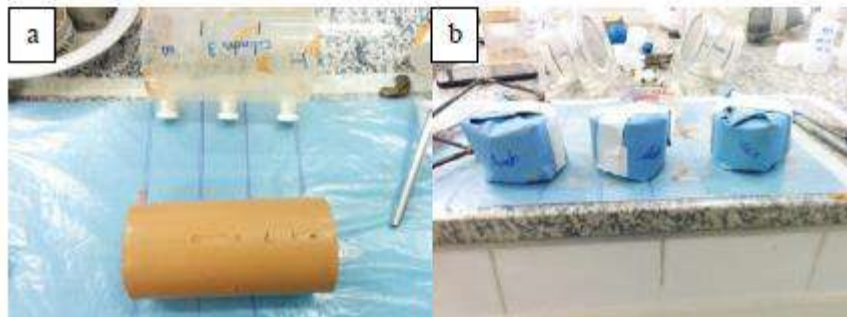


**Figura 4.27** - Extrusão da amostra após ensaio eletrocinético

Para determinação do perfil de umidade foram retiradas 4 fatias finas, uma de cada extremo da célula, representativas do anodo e catodo, uma entre a amostra do anodo e do meio, e outra entre o meio e o catodo, conforme apresentado na Figura 4.28. A Figura 4.29 - a, apresenta o gabarito de corte utilizado para o fatiamento das amostras. Após o fatiamento, as amostras maiores eram separadas e embaladas, conforme Figura 4.29 - b, para posterior extração da solução intersticial para medição do pH e CEE e também determinação dos limites de Atterberg. Todos esses ensaios foram realizados para as fatias anodo, meio e catodo, conforme apresentado Figura 4.28.



**Figura 4.28** - Esquema de fatiamento do solo para ensaios pós EK



**Figura 4.29** - Separação das amostras pós EK: a) Gabarito para corte; b) Amostras separadas e embaladas

Para extração do fluido, utilizou-se um pistão (Figura 4.30) e uma prensa.



**Figura 4.30** - Pistão utilizado para extração do líquido intersticial do solo

(FABRIS, 2016)

As leituras do Potencial Redox e pH foram realizadas no Setor de Físico-Química do Laboratório de Geotecnia, através dos seguintes aparelhos:

- Eh: Marca Analion, eletrodo redox de platina, modelo ROX674.
- Ph: Marca Analion, modelo V620
- CEE: Marca Oakton, modelo PC 300

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ENSAIOS REALIZADOS ANTES DA ELETROCINÉTICA.

#### 5.1.1 Caracterização - Índices Físicos e Matéria Orgânica

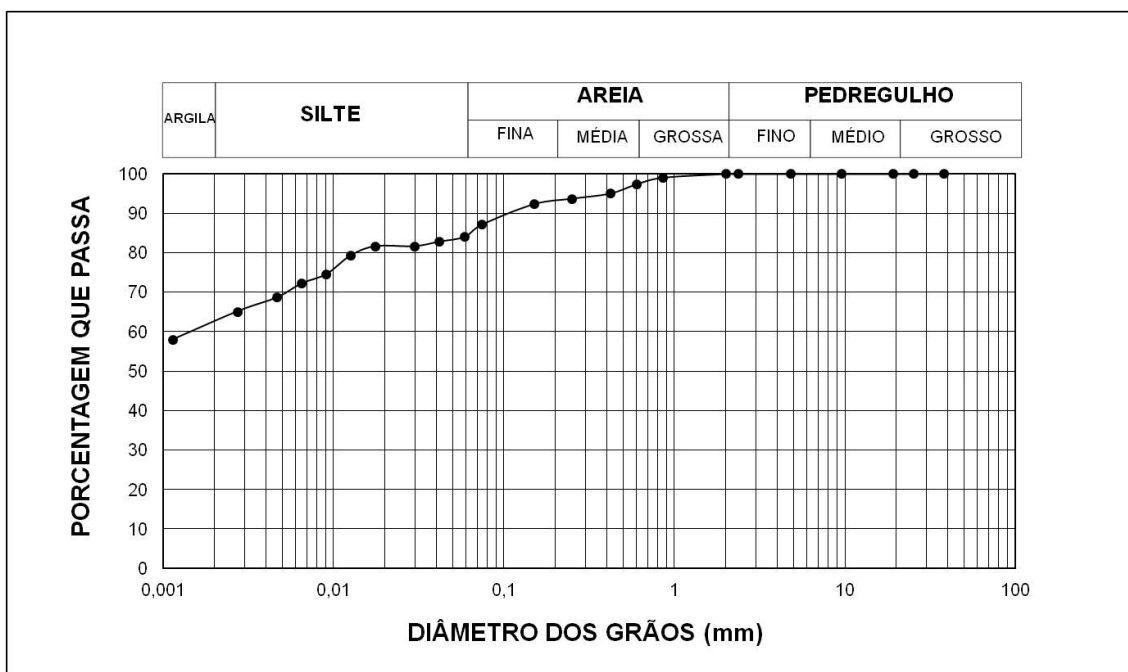
Os resultados para a mistura fabricada em laboratório dos ensaios de limites de Atterberg, densidade real dos grãos e granulometria, são apresentados nas Tabela 5.1 e Tabela 5.2, respectivamente, mostrando as faixas de variação obtidas para as amostras individuais estudadas anteriormente em Barbosa et al (2012) e Fabris (2016), coletadas no mesmo local. A curva granulométrica da mistura é apresentada na Figura 5.1.

**Tabela 5.1 - Índices Físicos**

<b>Amostra</b>	<b><math>\omega_L</math></b>	<b><math>\omega_P</math></b>	<b>IP</b>	<b><math>G_s</math></b>
	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(-)</b>
<b>Mistura</b>	78	30	48	2,69
<b>Faixas de variação</b>	50 – 87	17- 26	33 - 63	2,66 – 2,85

**Tabela 5.2 - Composição Granulométrica (NBR ABNT 6502:1995)**

<b>Amostra</b>	<b>Argila (%)</b>	<b>Silte (%)</b>	<b>Areia (%)</b>			<b>Pedregulho (%)</b>
			<b>Fina</b>	<b>Média</b>	<b>Grossa</b>	
<b>Mistura</b>	63	22	9	4	3	0
<b>Faixas de variação</b>	38 - 70	13 - 21	8 - 17	3 - 8	0 - 3	0 - 2



**Figura 5.1** - Curva granulométrica da mistura fabricada em laboratório.

O ensaio de granulometria da mistura apresentou concentração de argila na faixa de valores mais altos dos estudos anteriores. A densidade real dos grãos ( $G_s$ ) apresentou valor bem próximo aos resultados encontrados por Fabris (2016) para as amostras de Triunfo.

Foram realizadas análises do teor de matéria orgânica da mistura e também de outros três materiais (agregados vermelhos, cinza claro e amarelado), conforme descrito no ANEXO I. Pode-se observar que o percentual de matéria orgânica é praticamente nulo, os resultados estão apresentados na Tabela 5.3. Este resultado era esperado, tendo em vista a profundidade de coleta das amostras originais, acima de 6 metros e alcançando 44 metros.

**Tabela 5.3** - Matéria Orgânica das Frações e Mistura

Matéria Orgânica (g/kg M.O) <sup>1</sup>			
Mistura	Fração Vermelha	Fração Cinza	Fração Amarela
2,34	1,32	0,92	0,56

<sup>1</sup> O teor de matéria orgânica (TMO) em porcentagem é 1/10 do valor em g/kg.

Pode-se observar que a mistura fabricada mostrou-se representativa do conjunto de amostras fisicamente. Análises mineralógicas e físico-químicas serão apresentadas mais adiante para verificação da representatividade sob estes aspectos.

Após o procedimento de moldagem dos corpos de prova por adensamento, foram determinados o peso específico total do solo ( $\gamma_t$ ) e o teor de umidade ( $w$ ). A partir desses parâmetros e da densidade dos grãos (Tabela 5.1), foi possível o cálculo do índice de vazios do solo ( $e$ ), da porosidade ( $n$ ), do peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), e do grau de saturação ( $S$ ). Os resultados desses parâmetros estão apresentados na Tabela 5.4 para todos os corpos de prova moldados para os ensaios de eletrocinética.

**Tabela 5.4 - Parâmetros físicos dos corpos de prova**

	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	W (%)	e	n	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	S (%)
<b>EK01 A</b>						
Água Deionizada (pH=5,96)	16,21	55,5	1,55	0,61	10,42	95,18
<b>EK01 B</b>						
Água Deionizada (pH=5,96)	16,21	52,8	1,51	0,60	10,61	93,11
<b>EK02 A</b>						
Solução Fabricada (pH=6,68)	16,29	54,2	1,52	0,60	10,56	94,93
<b>EK02 B</b>						
Solução Fabricada (pH=6,68)	16,46	53,7	1,46	0,59	10,71	96,90
<b>EK03 A</b>						
Solução Fabricada (pH=4,91)	16,44	50,9	1,51	0,60	10,89	92,18
<b>EK03 B</b>						
Solução Fabricada (pH=4,91)	16,19	50,7	1,47	0,60	10,74	91,52
<b>EK04</b>						
Solução Fabricada (pH=6,68)	15,52	54,0	1,64	0,62	10,08	87,60

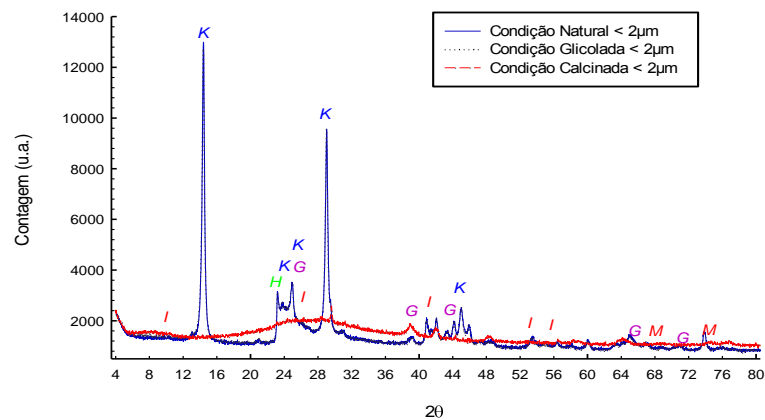
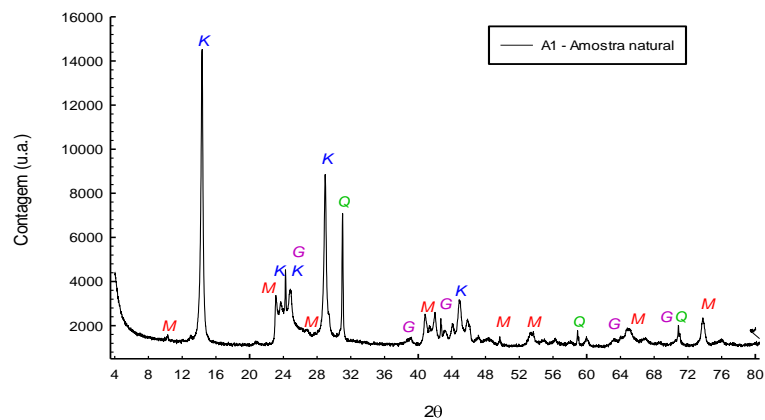
### 5.1.2 Difração de Raios-X (DRX)

As análises de DRX mostraram o predomínio da caulinita (K) e também a presença de minerais de óxidos e hidróxidos de ferro, tais como goethita (G) em todas as amostras e a hematita (H) na amostra B1 (agregados vermelhos). Na amostra natural, constatou-se a presença de quartzo (Q) e nas amostras A1 (agregados cinza) e amostra C1 (agregados amarelos) também foi encontrado a muscovita (M) e ilita (I). Na amostra D1 (mistura) estavam presentes todos os minerais encontrados nas amostras anteriores. Após o aquecimento a 500° C, a caulinita torna-se amorfa, por esta razão os

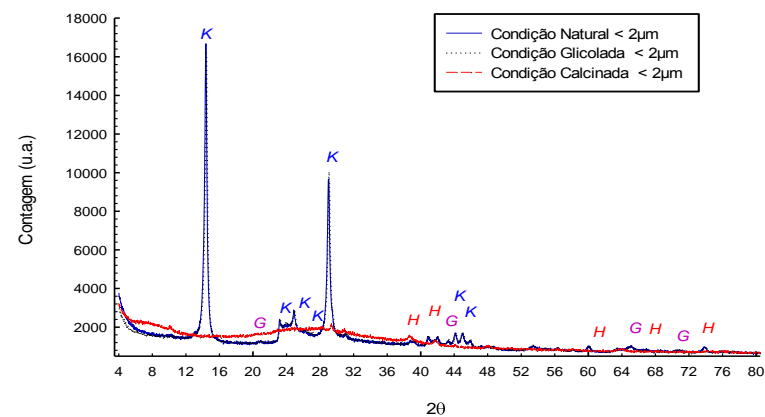
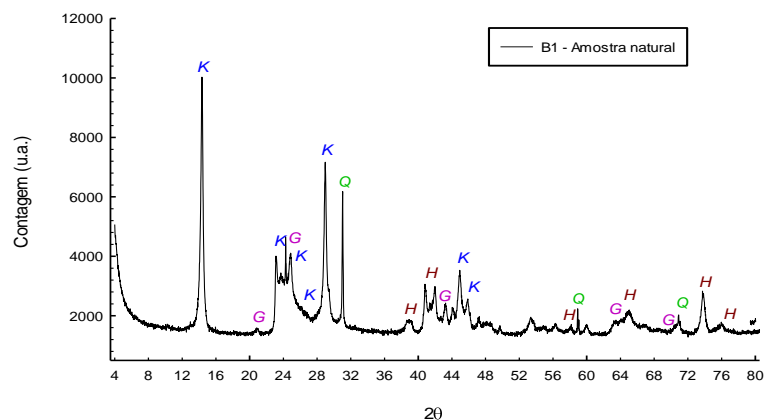
picos desaparecem no difratograma. Foi observado a inexistência de minerais expansivos no solo, já que a saturação com etileno glicol não os evidenciou.

Os resultados das análises de DRX são apresentados na

Figura **5.2** a Figura 5.5. Pode-se observar que a mistura fabricada mostrou-se representativa do conjunto de amostras individuais utilizadas e também do estudo anterior realizado com as amostras indeformadas do solo, por Fabris (2016).

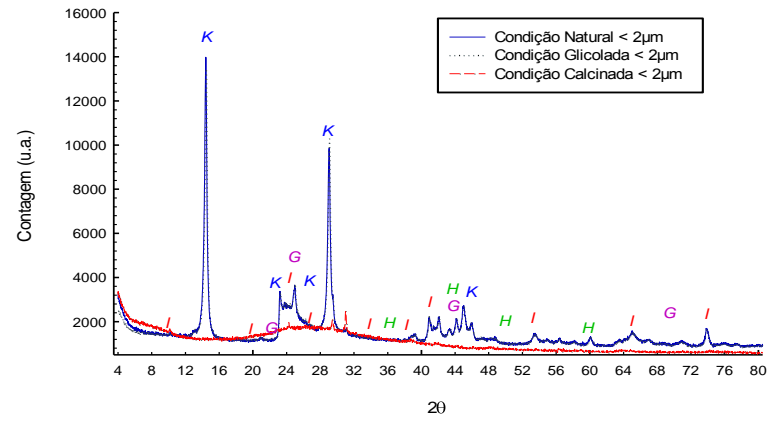
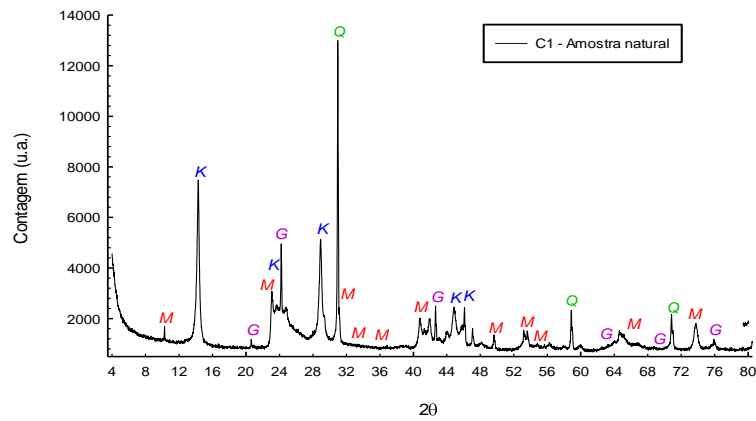


**Figura 5.2 –** Difratoformas de Raios-X da amostra A1 (Agregados Cinza) – a) Amostra Integral b) Fração Fina

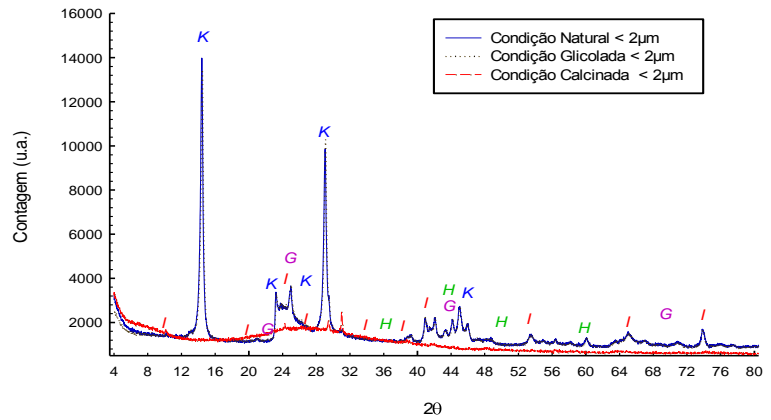
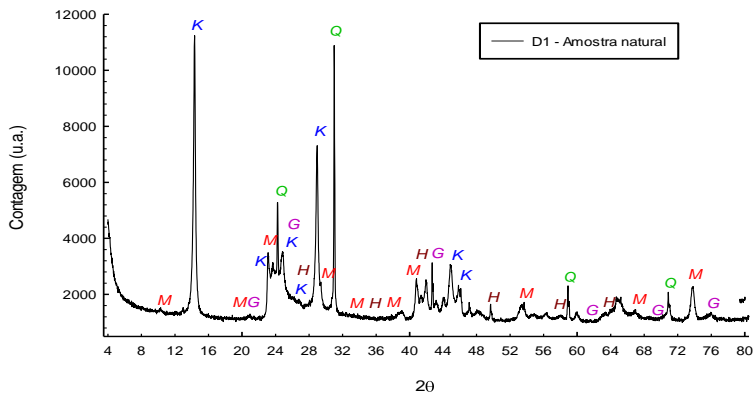


**Figura 5.3 -** Difratoformas de Raios-X da amostra B1 (Agregados Vermelho) – a) Amostra Integral b) Fração Fina





**Figura 5.4** - Difratomogramas de Raios-X da fração fina da amostra C1 (Agregados Amarelos) – a) Amostra Integral b) Fração Fina



**Figura 5.5** - Difratomogramas de Raios-X da amostra D1 (Mistura) – a) Amostra Integral b) Fração Fina

### 5.1.3 Ataque Sulfúrico e pH

De acordo com Ker (1998), os Latossolos Vermelho-Amarelos apresentam teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  entre 7 e 11 %, quando de textura argilosa ou muito argilosa e segundo a Embrapa (1988), a relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  deve ser menor do que 2,2 para latossolos.

A Tabela 5.5 apresenta o resultado do ataque sulfúrico realizado na mistura do solo estudado, bem como os valores de pH do solo.

**Tabela 5.5** - Ataque Sulfúrico e pH

AMOSTRA	pH		ATAQUE SULFÚRICO						
	$\text{H}_2\text{O}$	KCl 1M	$\Delta P$ (%)	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$K_i$	$K_r$	Res. (%)
Mistura	5,83	5,67	10,5	33,9	28,5	8,7	2,02	1,69	14,60

O solo estudado apresentou teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  igual a 8,7% e a relação  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  igual a 1,19, valores dentro dos limites estabelecidos por Ker (1998) e pela Embrapa (1988) para Latossolos Vermelho-Amarelos.

Além disso, no ensaio granulométrico o solo apresentou cerca de 63% de fração argila, conforme apresentado no item 5.1.1 e segundo a Embrapa (1997) apenas os argilominerais são dissolvidos no extrato sulfúrico, ou seja, os percentuais de Ferro (Fe), Alumínio (Al), Si e Titânio (Ti) são próximos à fração fina do solo, evidenciando uma compatibilidade com os resultados anteriores.

Sem considerar os valores de Ti presente na mistura do solo estudado, os valores apresentados na Tabela 5.5 mostram que o resultado do ataque sulfúrico apresentou uma maior porcentagem de Fe, Al e Si, igual a 71,1% em comparação ao encontrado na análise granulométrica, diferença de aproximadamente 8% que pode ser explicada pela presença de Ti na mistura.

O pH do solo apresentou uma pequena variação quando medido em  $\text{H}_2\text{O}$  e KCl, conforme apresentado na Tabela 5.5. Essa pequena diferença é indicativa da presença de minerais 1:1 como a caulinita e os oxi-hidróxidos de Fe e Al, com carga de superfície variável.

#### 5.1.4 Capacidade de Troca de Cátions (CTC)

Foi analisado o complexo trocável e calculada a capacidade de troca de cátions da mistura, e o resultado é apresentado na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** - Capacidade de Troca de Cátions da Mistura

Amostra	Complexo Sortivo (cmolc/kg)								Valor V (%)
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Valor S	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (CTC)	
Mistura Triunfo	0,9	0,9	0,01	0,02	1,8	0	0,3	2,1	86

O Valor T (CTC), segundo a Embrapa (2006) para latossolos em geral é abaixo de 17cmolc/kg de solo seco, descontando a participação do carbono orgânico. Sendo assim, o valor da CTC para a mistura se mostrou muito abaixo do valor máximo indicado pela Embrapa (2006), indicando que o solo tem pequena capacidade para reter cátions em forma trocável. A magnitude da CTC de um solo resulta da natureza dos minerais e orgânicos e do seu pH. A gibsita, caulinita e óxidos de ferro e alumínio, apresentam baixa quantidade de cargas negativas e portanto, a maior parte da CTC destes solos depende da presença de matéria orgânica e também do seu pH.

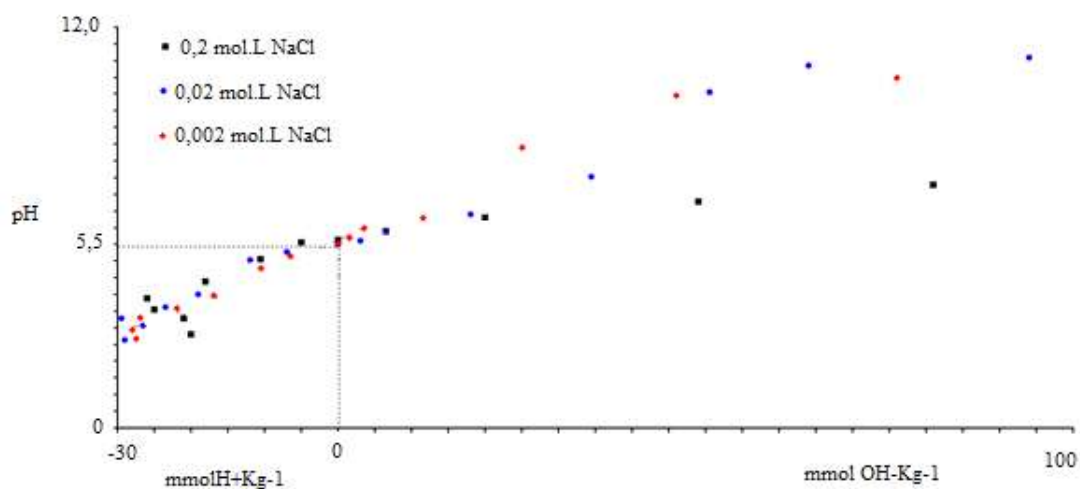
O pH indica a quantidade de íons hidrogênio (H<sup>+</sup>) que existe no solo. Um solo ácido possui muitos íons H<sup>+</sup> e poucos íons cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e potássio (K<sup>+</sup>) adsorvidos em seu complexo coloidal de troca. Solos com acidez elevada (baixos valores de pH) são pobres (cálcio e magnésio principalmente) e elevado teor de alumínio (EMBRAPA, 2010).

O solo estudado apresentou teor de matéria orgânica praticamente nulo e pH=5,83. Segundo a Embrapa (2010), solos com pH entre 5,6 e 6,0 apresentam baixa acidez, sendo o resultado compatível com a composição do complexo trocável encontrada, que apresentou valores maiores para os íons cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e magnésio (Mg<sup>2+</sup>), e ausência de alumínio.

#### 5.1.5 Ponto de Carga Zero (PCZ)

A Figura 5.6 apresenta o gráfico obtido no programa PESN para as diferentes concentrações de NaCl (0,2M, 0,02M, 0,002M), o cruzamento indica o PCZ, ou seja, a

condição de igualdade de adsorção de íons  $H^+$  e  $OH^-$ . Observa-se que para o solo estudado o cruzamento se deu entre pH 5 e 5,5.



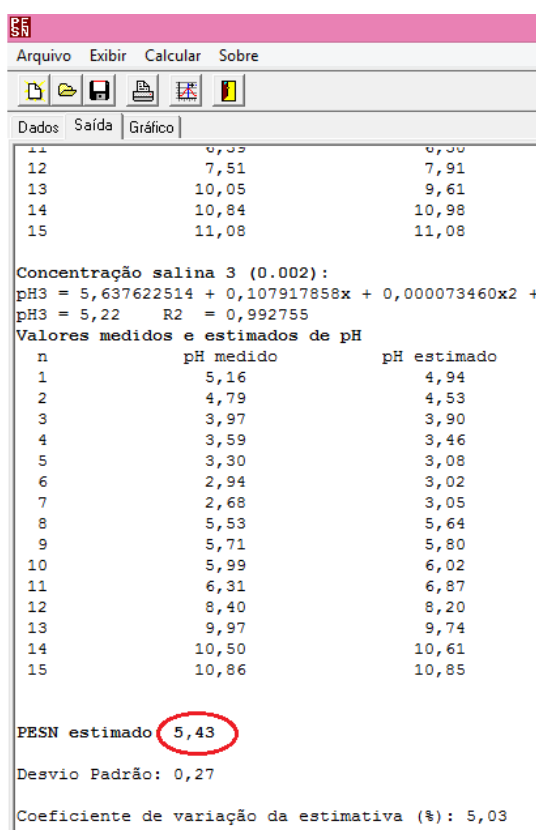
**Figura 5.6** – Determinação do Ponto de Carga Zero (PCZ)

Segundo Van Ranst et al. (1998), Appel et al. (2003) e Anda et al. (2008), a presença de óxidos de ferro e alumínio eleva o ponto de carga zero, enquanto a matéria orgânica e a caulinita reduzem esse parâmetro (FABRIS, 2016). Appelo & Postma (2005) apresentaram para a caulinita um valor de PCZ equivalente a 4,6 e segundo Machado (2013), latossolos caracterizados por minerais de cargas variáveis como caulinita, óxidos de ferro e alumínio têm PCZ próximo a 4,0 (superfície) e próximo de 5,0 (em profundidade).

A

Figura 5.7 apresenta os dados de saída do PESN. Para o solo estudado, o valor de PCZ determinado foi de 5,43, ficando um pouco acima do valor citado em literatura, porém a presença de óxidos de ferro e alumínio, mesmo que presentes de maneira minoritária em relação à caulinita, exercem uma influência considerável na elevação do PCZ.

Cabe ressaltar que Fabris (2016) encontrou os mesmos valores de PCZ para amostras indeformadas do solo estudado, através do equipamento Zetasizer Nano ZS, para as amostras 101 e 201.

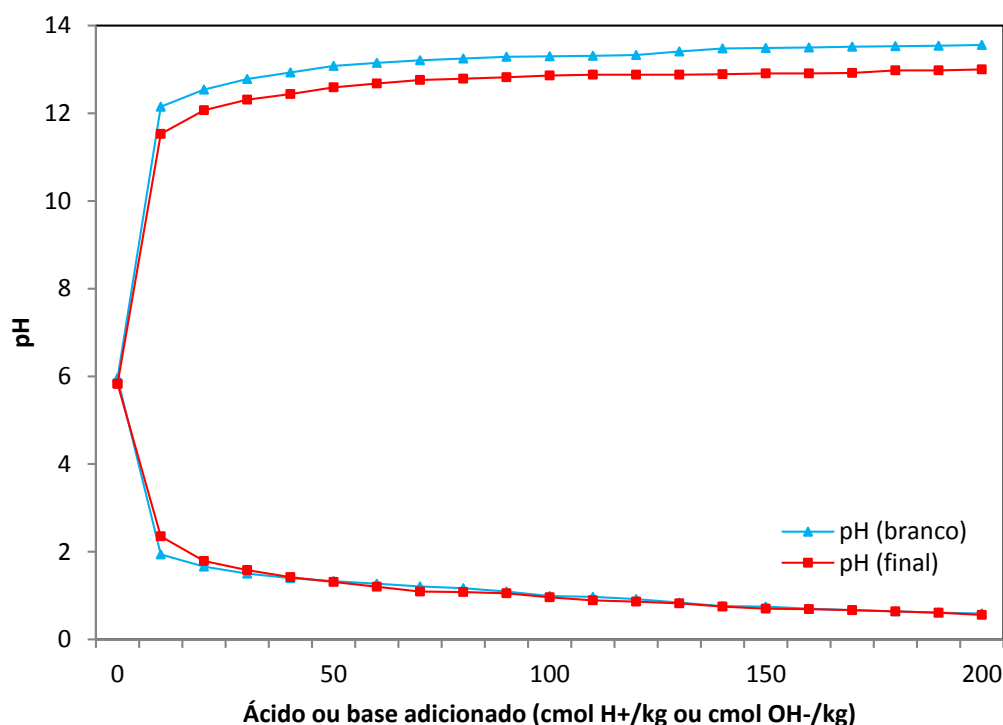


**Figura 5.7 – Ponto de Carga Zero determinado – Dados de saída PESN**

### 5.1.6 Capacidade Tampão

Os resultados dos ensaios de capacidade tampão mostraram que o solo possui pouca resistência à variação de pH, ou seja, apresenta baixa capacidade tampão. A Figura 5.8 apresenta o resultado obtido nas amostras com o solo de Triunfo e apenas para as soluções, sem o solo (branco). Observa-se que ao adicionar ácido ou base, o pH variou consideravelmente em relação ao pH inicial. Observa-se ainda que a capacidade do

solo de resistir às variações de pH diminuiu com o aumento da concentração de ácido ou base adicionado, esse comportamento também foi observado por Fabris (2016).



**Figura 5.8** - Capacidade Tampão

Os resultados encontrados nos ensaios de capacidade tampão, análises de DRX, ataque sulfúrico e CTC foram compatíveis entre si, os quais evidenciaram a presença da caulinita na fração fina do solo, a presença de minerais de óxidos de ferro, e sua influência nos resultados dos parâmetros do solo.

O solo reconstituído em laboratório mostrou-se representativo granulometricamente dos solos originais utilizados na mistura, a menos da estrutura original que foi eliminada no processo de fabricação. Em síntese, trata-se de um solo caulinítico com presença de oxi-hidróxidos de Fe e Al (hematita e goethita), além de quartzo e muscovita, e teor de matéria orgânica insignificante (TMO < 1%). O solo é ligeiramente ácido ( $\text{pH} \cong 5,7$ ), com pequena capacidade de troca catiônica ( $\text{CTC} = 2,1 \text{ cmolc/kg}$ ),  $\text{PCZ} \cong 5,43$  próximo à condição de pH do solo, refletindo a influência dos oxi-hidróxidos de Fe e Al sobre a caulinita (dominante), e sem capacidade tampão tanto para o ácido quanto para a base. Os minerais dominantes presentes causam a diferença de pH medido em água e em KCl (5,83 versus 5,67), e têm carga de superfície variável, ou seja, podem ter o seu

potencial mudado durante a aplicação da técnica eletrocinética devido às alterações induzidas no pH pelo processo.

## 5.2 ENSAIOS ELETROCINÉTICOS

Conforme descrito na Tabela 4.3, foram realizados 7 ensaios eletrocinéticos. Durante todos os ensaios foram monitorados a tensão elétrica total e nos pinos de voltagem, a corrente elétrica, o volume de água extraído do solo por eletro-osmose e a temperatura dentro da célula. Através desses parâmetros pode-se então calcular a resistividade elétrica ( $\rho$ ), a densidade de corrente ( $j$ ) e o gradiente elétrico ( $i_e$ ).

Para os ensaios EK01 A e EK01 B a solução utilizada foi a água deionizada (pH = 5,96), nos ensaios EK02 A e EK02 B a solução utilizada foi semelhante à solução intersticial do solo original, com pH = 6,68 e os ensaios EK03 A e EK03 B a solução também foi fabricada, conforme os ensaios EK02, porém ajustada para pH=4,91. A tensão utilizada foi de 10 Volts em todas as duplicatas. No ensaio EK04 foi aplicada uma tensão elétrica total de 15V e utilizou-se a solução com pH=6,68. Todos esses ensaios foram com temperatura externa controlada de aproximadamente 25°C.

Em todos os ensaios das séries A e B, a configuração do aparato foi a mesma, utilizou-se eletrodos de DSA® com sua haste já isolada e tiveram duração de 90 horas.

### 5.2.1 Parâmetros medidos

Os gráficos dos parâmetros medidos são apresentados na Figura 5.9 a Figura 5.16

A voltagem nos pinos dos ensaios com água deionizada (EK01 A e B) apresentou a mesma faixa de variação. Os ensaios com solução fabricada com pH=6,68 (EK02 A e B), também tiveram comportamentos semelhantes entre si, porém o pino 5 (mais próximo do catodo) apresentou menor valor de voltagem quando comparado aos ensaios com água deionizada. Já os ensaios EK03 A e EK03 B, com solução mais ácida, apresentaram comportamentos um pouco distintos entre si. Enquanto no ensaio EK03 A a voltagem nos pinos praticamente se manteve constante durante as primeiras 40h de ensaio, no ensaio EK03 B observou-se uma queda de voltagem durante essas 40h iniciais.

A voltagem nos pinos para o ensaio EK 04, com ddp aplicada mais alta (15V), apresentou um comportamento um pouco diferente do observado nos ensaios com a mesma solução EK02 A e EK02 B (10V). A ddp entre os pinos 5 e 3 nos ensaios com

tensão total igual a 15V foi de aproximadamente 4V, enquanto nos ensaios com tensão total de 10V foi de aproximadamente 2V.

As Figura 5.13 à Figura 5.16 apresentam os gráficos do volume de fluxo eletro-osmótico com o tempo. Os ensaios com água deionizada (EK01 A e EK01 B) apresentaram fluxo na direção anodo-catodo. Em ambos os ensaios pode-se observar um pico de volume eletro-osmótico de aproximadamente 10 ml no reservatório do catodo em aproximadamente 20h de ensaio. Não houve preenchimento do reservatório nesse momento, essa variação pode ter ocorrido devido às reações eletroquímicas, porém não se sabe o real motivo desse pico durante os dois ensaios com água deionizada.

Os ensaios com solução fabricada com pH de 6,68 (EK02 A e EK02 B), não apresentaram fluxo eletro-osmótico, porém o ensaio EK02 B apresentou um pico inesperado a partir de aproximadamente 80h de ensaio. Não se sabe se esse pico pode ter sido decorrente de algum evento acidental que interferiu na medição. Já os ensaios com solução fabricada mais ácida (pH de 4,91), apresentaram fluxo inverso, no sentido catodo-anodo, a partir de aproximadamente 40h de ensaio.

A maior quantidade de solução extraída ocorreu nos ensaios utilizando água deionizada (pH = 5,96).

O volume eletro-osmótico observado durante o ensaio EK04 (15V) e solução fabricada com pH = 6,68 foi de aproximadamente 2 ml, no sentido anodo-catodo. Também foi observado um pequeno aumento do fluxo no final do ensaio, semelhante ao ensaio EK02 B com ddp mais baixa e mesma solução.

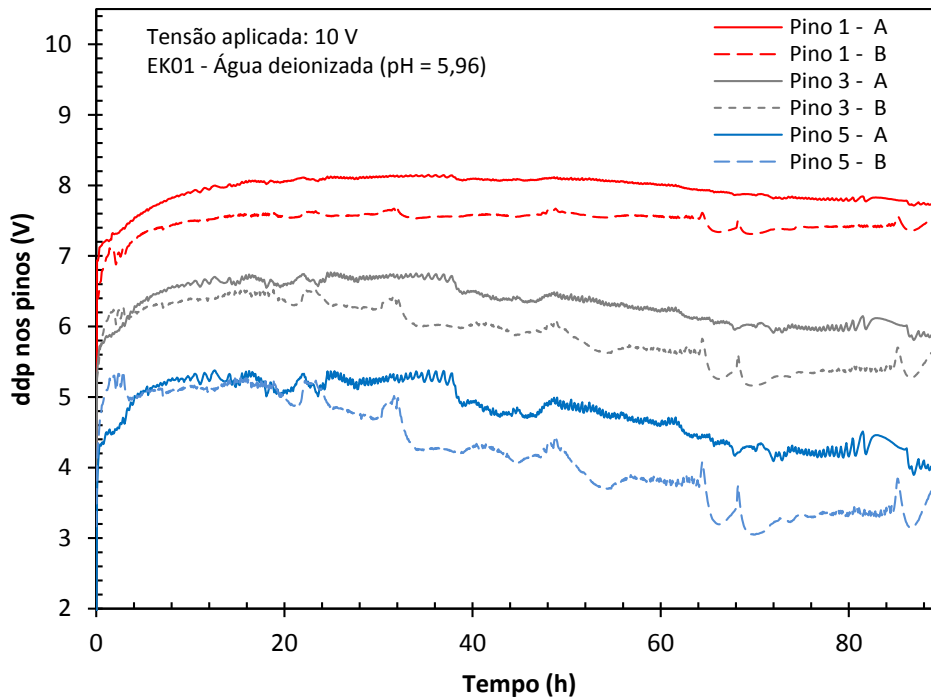
A inversão do fluxo eletro-osmótico ocorre quando o PCZ é superior ao pH do solo, fazendo com que as cargas nas arestas das partículas fiquem carregadas positivamente. Não deve ocorrer fluxo quando o pH do solo é igual ou bem próximo ao ponto de carga zero, ou seja, a carga líquida da sua superfície é zero (potencial zeta nulo). Resumidamente, temos que:

1. pH do solo < PCZ: Fluxo inverso
2. pH do solo > PCZ: Fluxo normal
3. pH do solo = PCZ: Fluxo nulo

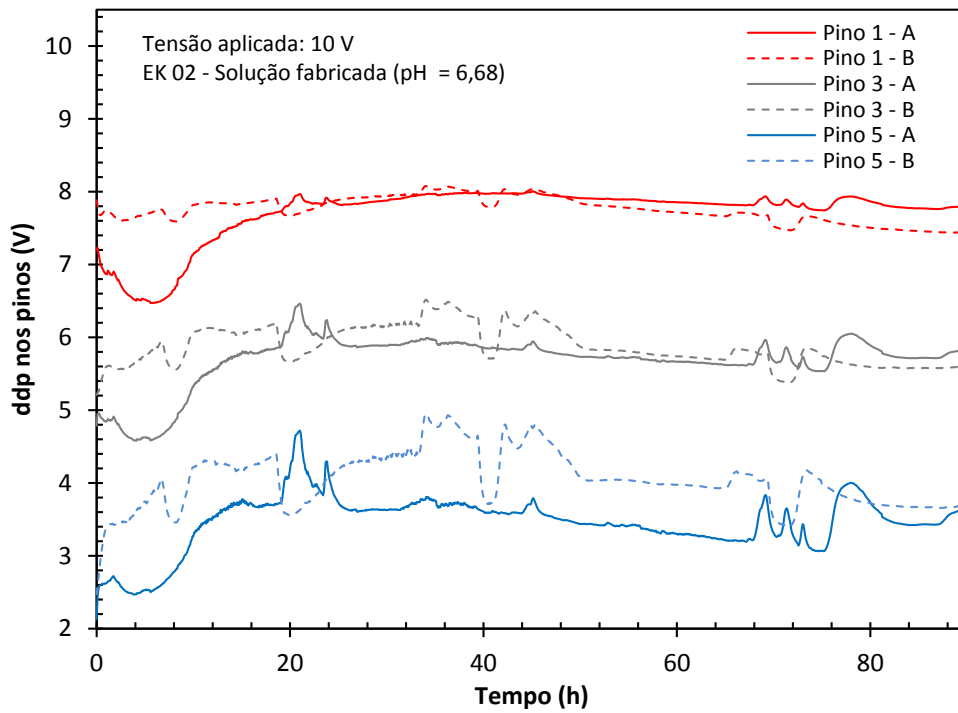
O resultado da análise do PCZ indicou que o mesmo é igual a 5,4, mesmo valor observado por Fabris (2016), logo os únicos ensaios que se comportaram conforme o



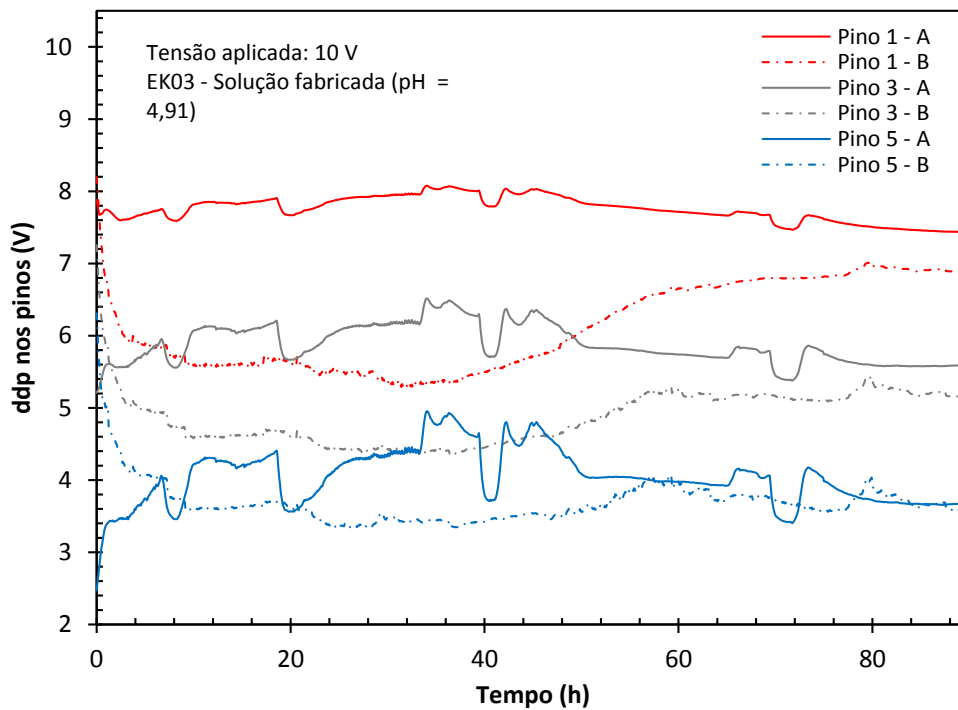
esperado quando analisados em relação ao PCZ, foram os ensaios EK03 A e EK03 B, já que o pH da solução utilizada é inferior ao PCZ e foi observado fluxo inverso. Mas como o pH varia ao longo do solo durante o ensaio, o comportamento é mais complexo do que esperado com base apenas na condição inicial. .



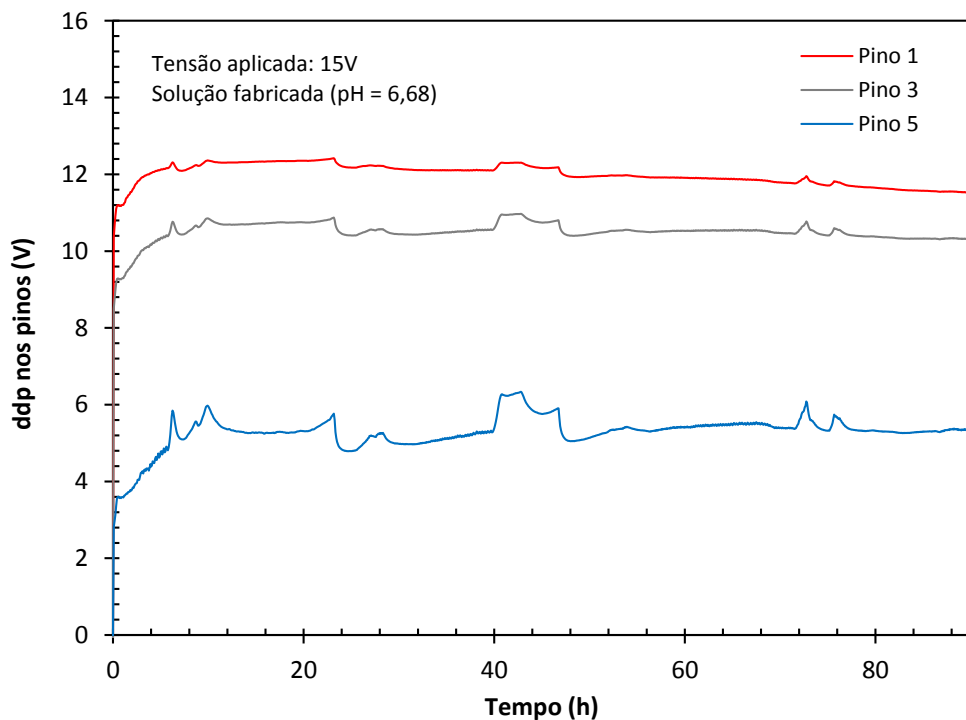
**Figura 5.9** - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com água deionizada (pH=5,96)



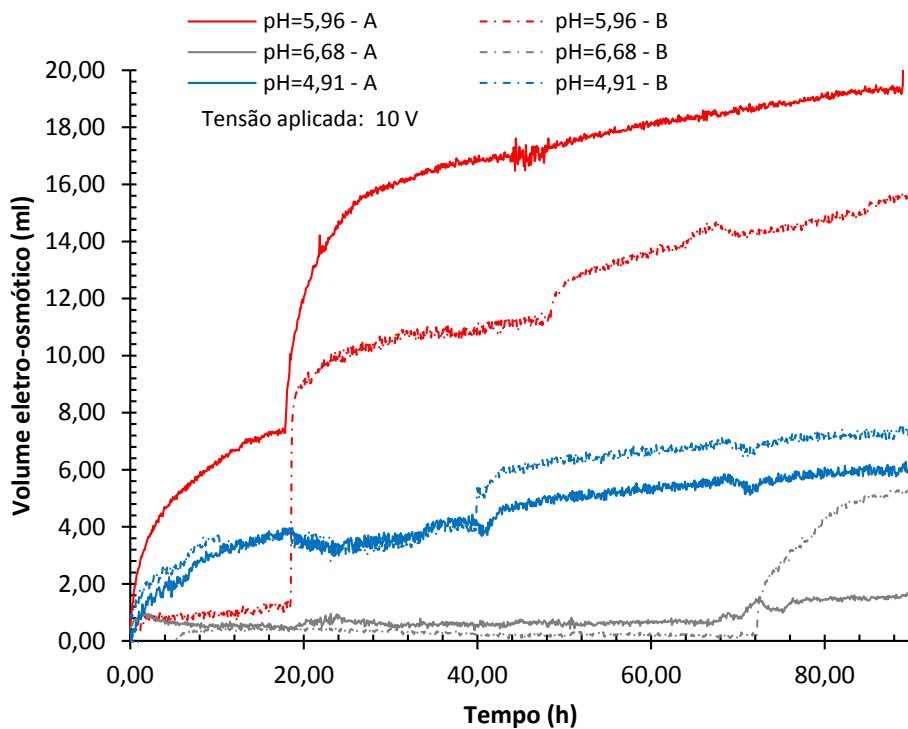
**Figura 5.10** - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com solução fabricada (pH = 6,68)



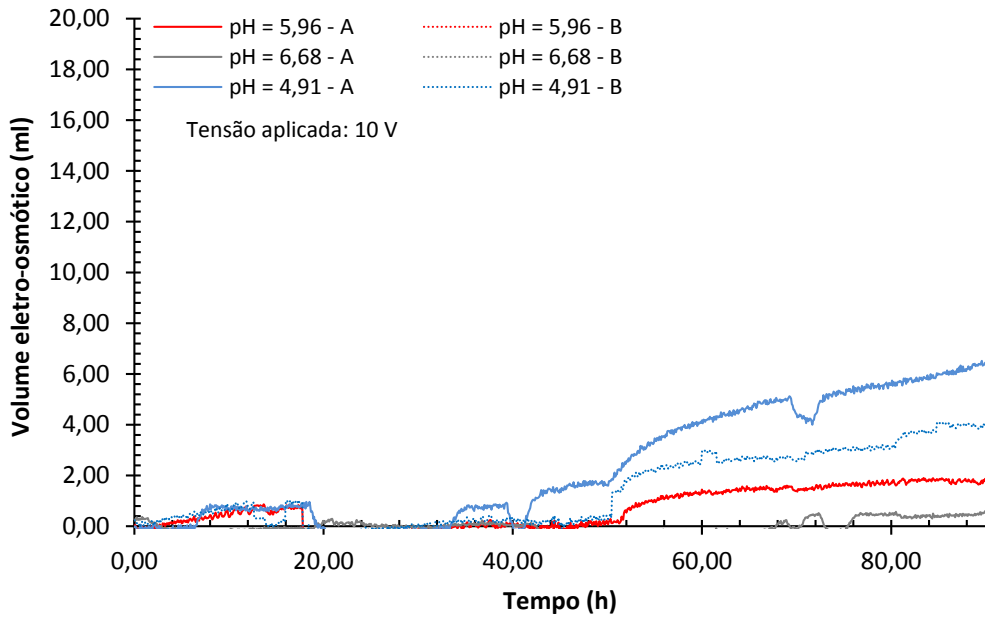
**Figura 5.11** - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com solução fabricada (pH = 4,91)



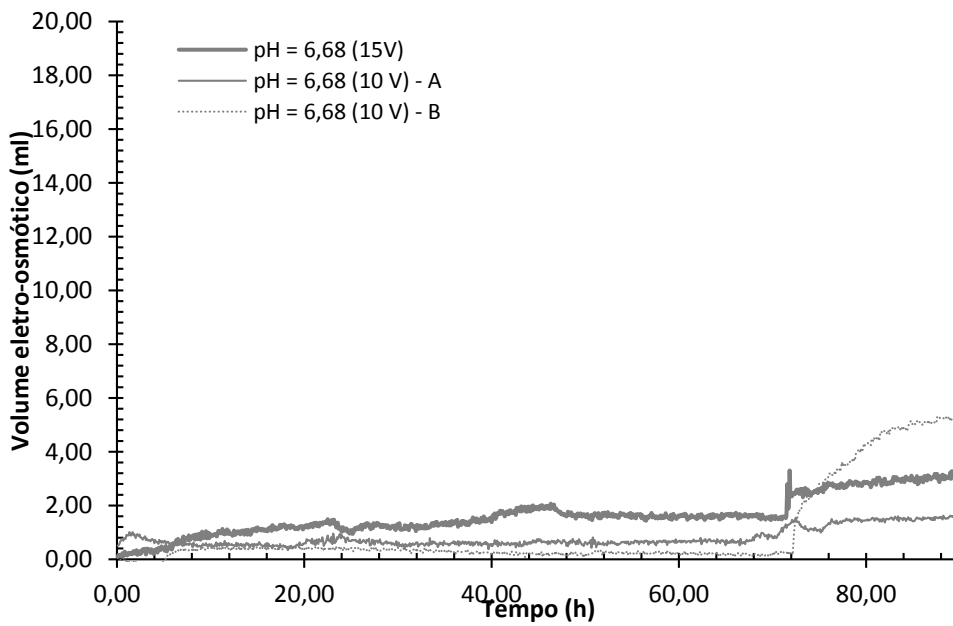
**Figura 5.12** - Tensão elétrica nos pinos – Ensaio com solução fabricada (pH = 6,68) e tensão aplicada de 15V



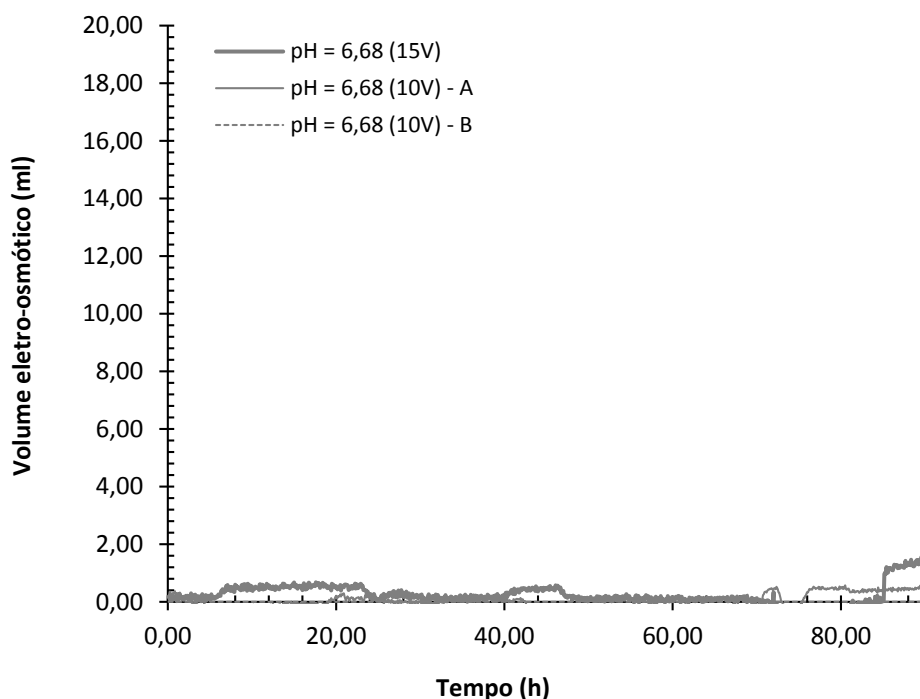
**Figura 5.13** - Volume eletro-osmótico - Catodo – Ensaio com diferentes soluções e mesma ddp aplicada



**Figura 5.14** - Volume eletro-osmótico - Anodo - Ensaio com diferentes soluções e mesma ddp aplicada



**Figura 5.15** - Volume eletro-osmótico - Catodo - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68) e diferentes ddps



**Figura 5.16** - Volume eletro-osmótico - Anodo - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68) e diferentes ddps

### 5.2.2 Parâmetros elétricos calculados

Os gráficos dos parâmetros calculados são apresentados na Figura 5.17 à Figura 5.20, e na Tabela 5.7 e Tabela 5.8 é apresentado um resumo dos resultados encontrados nesse estudo e os encontrados por Fabris (2016).

s ensaios com água deionizada (pH=5,96), apresentaram o gradiente elétrico (ie) crescente com o tempo, e comportamento similar foi observado nos ensaios com solução fabricada com pH=6,68 (EK02 A e B). Já os ensaios com a solução mais ácida (EK03 A e B) não apresentaram tão boa repetibilidade. O ensaio A mostrou gradiente elétrico praticamente constante com o tempo, e o ensaio B gradiente crescente.

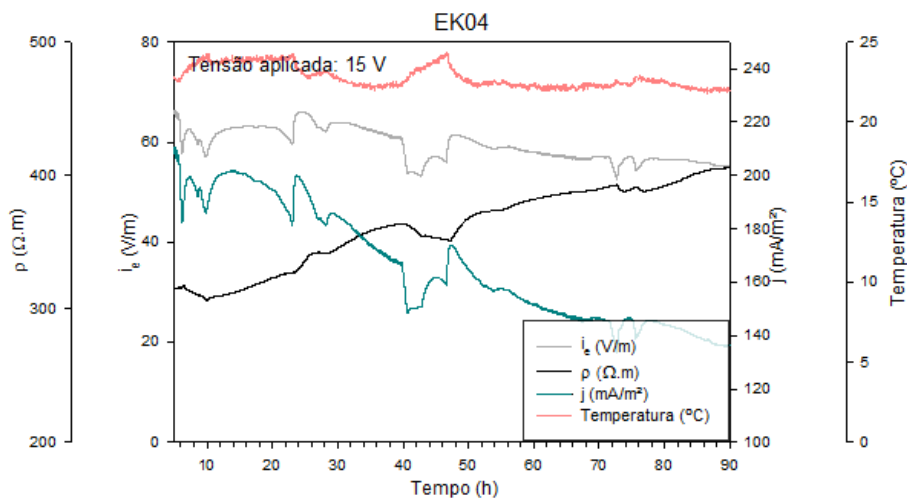
Os ensaios com água deionizada (EK 01 A e B) e solução fabricada com pH=6,68 (EK 02 A e B), apresentaram resistividade crescente com o tempo, porém o ensaio com a solução fabricada não apresentou boa repetibilidade. Os ensaios com a solução mais ácida (pH=4,91) apresentaram valores bem inferiores de resistividade quando comparados com os ensaios com a solução de pH=6,68 e com água deionizada.

Em relação à densidade de corrente, os ensaios com solução fabricada com pH=6,68 (EK02 A e B) apresentou um comportamento decrescente com o tempo e valores

inferiores aos observados no ensaio com água deionizada (EK01 A e B). Os ensaios com solução mais ácida apresentaram comportamento decrescente no ensaio A e crescente no ensaio B.

O ensaio com ddp aplicada de 15V (EK 04) apresentou comportamento semelhante aos ensaios com a mesma solução (EK02 A B), porém a faixa de valores é alterada pela maior voltagem aplicada durante o ensaio.

Fabris (2016), utilizou solução fabricada com pH=7,59 para amostras indeformadas do mesmo solo e encontrou valores maiores de gradiente elétrico e resistividade. A resistividade do solo oscilou entre aproximadamente 200  $\Omega.m$  e 350  $\Omega.m$ , valores bem inferiores ao observado por Fabris (2016), que observou em seus ensaios uma variação de 1100  $\Omega.m$  a 1500  $\Omega.m$ . Os valores observados por Fabris (2016) para a densidade de corrente foram mais baixos, consistentes com os valores consideravelmente maiores de resistividade elétrica do solo. Como a mistura fabricada é fisicamente e mineralogicamente semelhante aos solos originais, a maior resistividade elétrica das amostras indeformadas de Fabris (2016) possivelmente é consequência da rigidez da estrutura destas amostras.



**Figura 5.17** - Parâmetros elétricos - Ensaio com solução fabricada (pH=6,68) e tensão aplicada de 15V

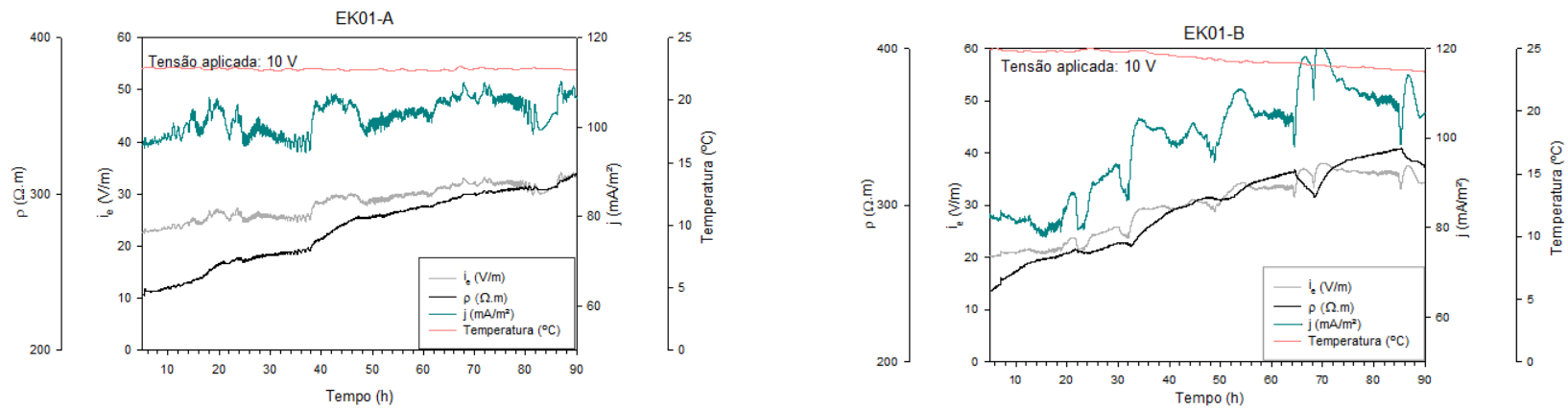


Figura 5.18 - Parâmetros elétricos - Ensaios com água deionizada (pH=5,96)

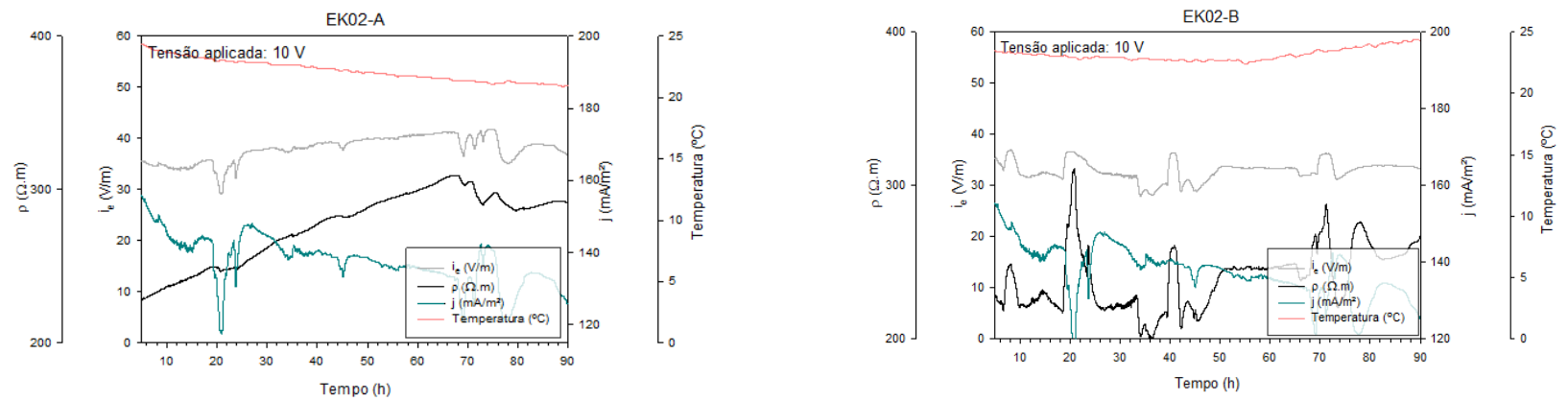
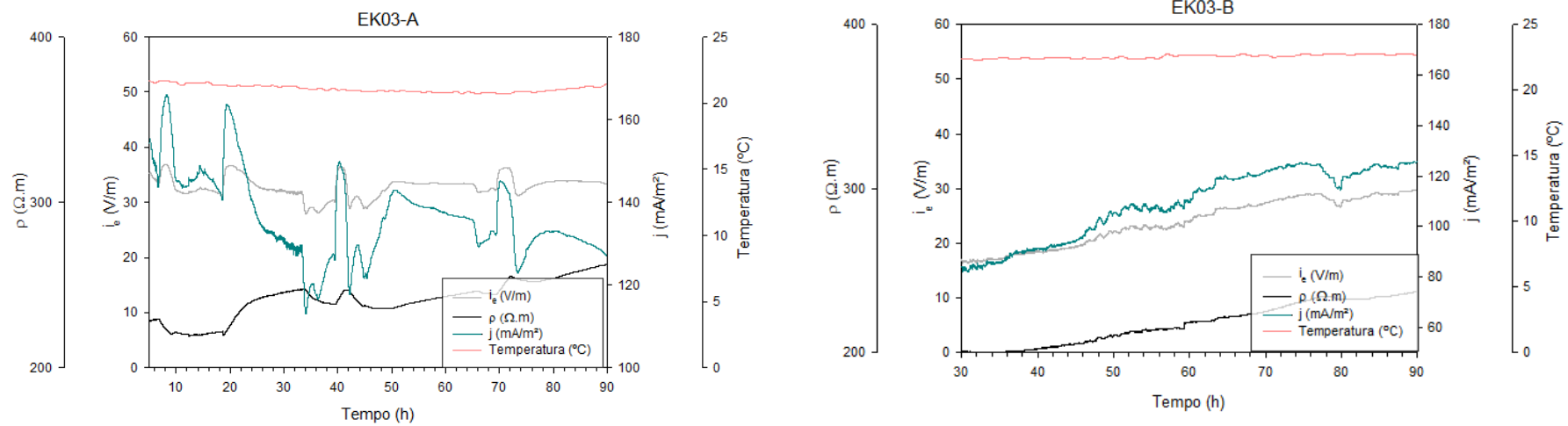


Figura 5.19 - Parâmetros elétricos - Ensaios com solução fabricada (pH=6,68)



**Figura 5.20** - Parâmetros elétricos - Ensaios com solução fabricada (pH=4,91)



**Tabela 5.7 - Resumo das principais condições utilizadas e observações durante a eletrocinética**

Ensaio	Solução/pH	ddp total (V)	Eletrodos	Duração	Perda no pino 1 <sup>1</sup> (%)	Gradiente elétrico (V/m)	ddp entre os pinos 3 e 5 (V)	Densidade de Corrente (mA/m <sup>2</sup> )	Resistividade (Ω.m)	Volume eletro-osmótico (mL)	Trincou?
EK01 A	Deionizada 5,96	10	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	18,50	22,46 a 35,00	1,27 a 1,98	94,31 a 126,36	231,69 a 317,83	22,50	Não
EK01 B	Deionizada 5,96	10	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	23,30	15,27 a 121,73	0,9 a 2,13	64,20 a 121,73	233,46 a 336,64	15,89	Não
EK02 A	Fabricada 6,68	10	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	19,95	29,01 a 41,82	1,47 a 2,47	117,33 a 187,68	219,12 a 309,27	1,68	Não
EK02 B	Fabricada 6,68	10	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	19,23	27,87 a 48,29	1,55 a 2,74	117,33 a 193,99	199,33 a 310,80	5,31 <sup>3</sup>	Não
EK03 A	Fabricada 4,91	10	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	19,23	27,87 a 48,29	1,55 a 2,74	113,08 a 217,12	219,24 a 262,94	6,80 anodo/6,29 catodo	Não
EK03 B	Fabricada 4,91	10	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	18,0	15,21 a 29,78	0,86 a 1,60	71,79 a 125,72	198,91 a 238,46	1,90 anodo/7,59 catodo	Não
EK04	Fabricada 6,68	15	DSA, juntos ao solo, isolados	90 h	17,19	52,4 a 69,76	4,63 a 5,86	133,38 a 228,54	302,32 a 407,42	3,37	Não

<sup>1</sup>Perdas de potencial elétrico em relação à tensão elétrica total, medidas no pino 1, após 5 horas de ensaio.

<sup>2</sup>Não foi possível a determinação de ke pois o volume de solução coletado foi muito pequeno.

<sup>3</sup>Foi observado um pico inesperado a partir de 80h de ensaio. Não se sabe se esse pico pode ter sido algum erro de medição ou esbarrada no equipamento.

**Tabela 5.8** – Resumo das principais condições utilizadas e observações durante a eletrocinética encontrados por Fabris (2016)

Amostra	Solução/pH	ddp total (V)	Eletrodos	Duração	Perda no pino 1 <sup>1</sup> (%)	Gradiente elétrico (V/m)	ddp entre os pinos 4 e 5 (V)	Densidade de Corrente (mA/m <sup>2</sup> )	Resistividade (Ω.m)	Volume eletro-osmótico (mL)	Trincou?
T02 AM04	Deionizada a 5,96	15	DSA, juntos ao solo	2 dias	45	43 a 65	.. <sup>2</sup>	63 a 76	660 a 903	6	Não
T04 AM02a	Fabricada 7,59	10	DSA, juntos ao solo	2 dias	24	41 a 48	1,1 a 1,4	66 a 75	600 a 640	5	Não
T04 AM02b	Fabricada 7,59	10	DSA, juntos ao solo	4 dias	32	50 a 56	1,1 a 1,4	61 a 67	797 a 841	0	Não
T02 AM01	Fabricada 7,59	10	DSA, juntos ao solo	4 dias	37	45 a 53	1,5 a 2,0	53 a 64	806 a 869	5	Não
T01 AM03	Fabricada 7,59	10	DSA, juntos ao solo	4 dias	21	50 a 56	1,4 a 1,6	41 a 46	1210 a 1248	1 <sup>3</sup>	Não
T01 AM02	Fabricada 7,59	10	DSA, juntos ao solo	4 dias	21	53 a 59	1,5 a 1,9	39 a 48	1126 a 1537	25	Não

<sup>1</sup>Perdas de potencial elétrico em relação à tensão elétrica total, medidas no pino 1, após 5 horas de ensaio

<sup>2</sup>Não foi possível a medição da ddp no pino 4

<sup>3</sup>Solução coletada no lado do anodo (ocorrência de fluxo eletro-osmótico no sentido catodo-anodo)

(Adaptado de FABRIS, 2016)

## 5.3 ENSAIOS REALIZADOS APÓS ENSAIO ELETROCINÉTICO

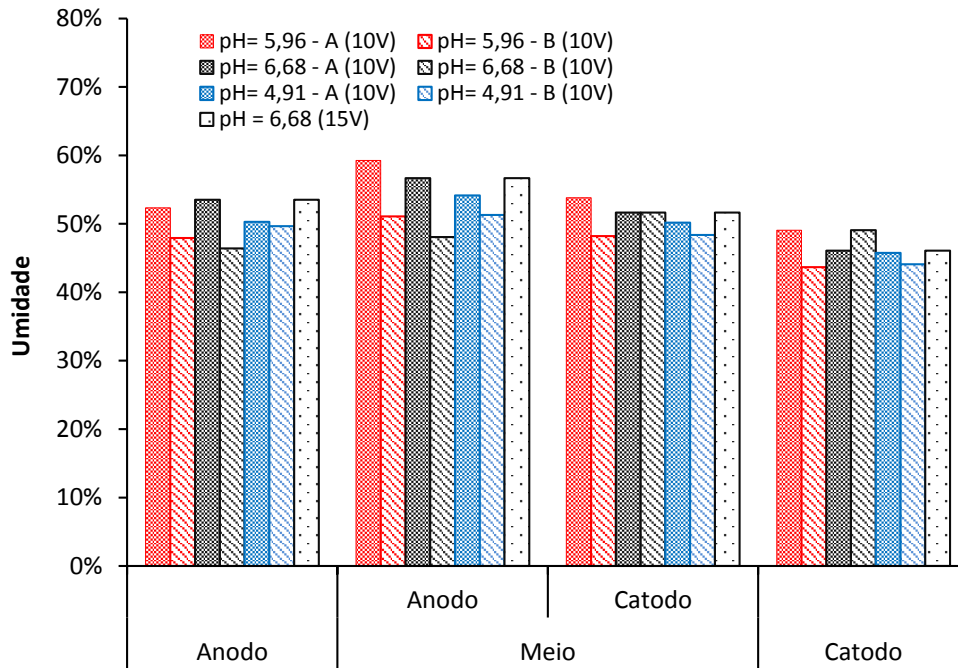
### 5.3.1 Teores de Umidade

Os teores de umidade foram determinados em todos os ensaios após a eletrocinética, em cada fatia (anodo, meio e catodo). Para todos os casos a condição de drenagem do sistema foi catodo e anodo abertos e o fatiamento da amostra foi realizado imediatamente após o término e desmontagem do ensaio EK, conforme descrito no item 4.9.

As fatias do meio e próxima ao anodo foram as que apresentaram maiores teores de umidades, exceto no segundo ensaio com solução fabricada de pH=6,68. Esse resultado pode estar relacionado mais com o processo de adensamento do que com a eletrocinética, sendo o pico de umidade mais próximo à região do anodo, que na moldagem era posicionada na base do aparato de adensamento, mostrando menor eficiência de drenagem nesta região.

Essa variação também pode explicada pela condição de drenagem adotada nos ensaios EK (anodo e catodo abertos), mas também por influência, em menor escala, das alterações sofridas ao longo do ensaio através das reações eletroquímicas. Como as variações das tensões elétricas nos pinos foram consideravelmente lineares, os teores de umidade foram pouco influenciados pelas zonas de diferentes condutividades elétricas no solo.

A Figura 5.21 apresenta os teores de umidades observados nos ensaios com ddp aplicada de 10V e água deionizada (EK01 A e B), com solução fabricada de pH = 6,68 (EK02 A e B) e com solução fabricada de pH=4,91 e também o ensaio com ddp aplicada de 15V e solução fabricada de pH=6,68 (EK 04).



**Figura 5.21** - Teores de umidade pós EK – Ensaios com diferentes soluções

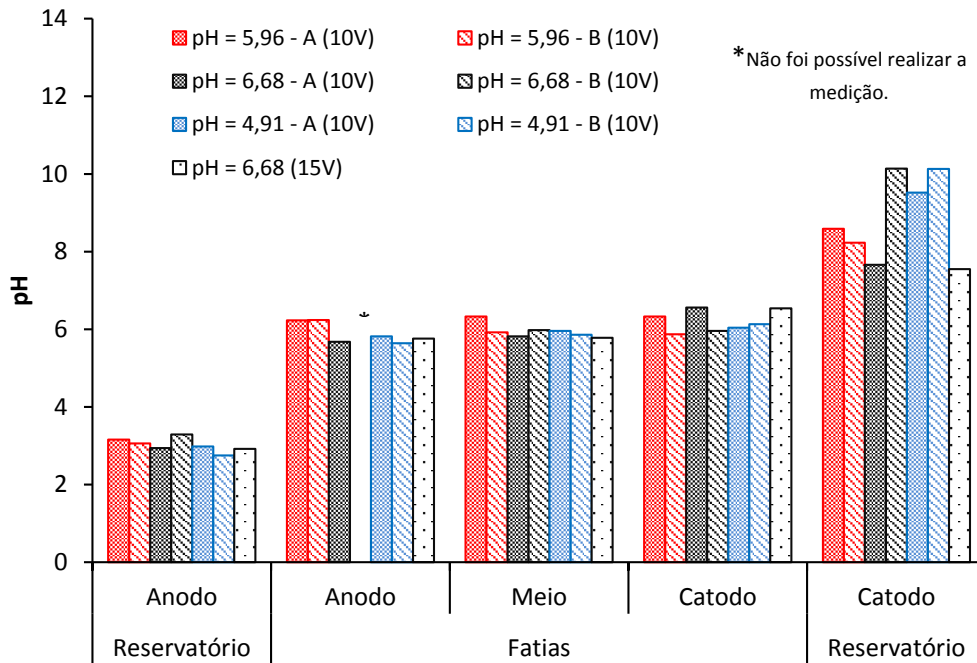
### 5.3.2 pH e condutividade elétrica específica

O pH foi determinado para cada fatia (anodo, meio e catodo) após todos os ensaios eletrocinéticos. Os ensaios apresentaram boa repetibilidade e são apresentados na Figura 5.22. Não foi possível medir o pH da fatia anodo do segundo ensaio com solução fabricada de pH 6,68.

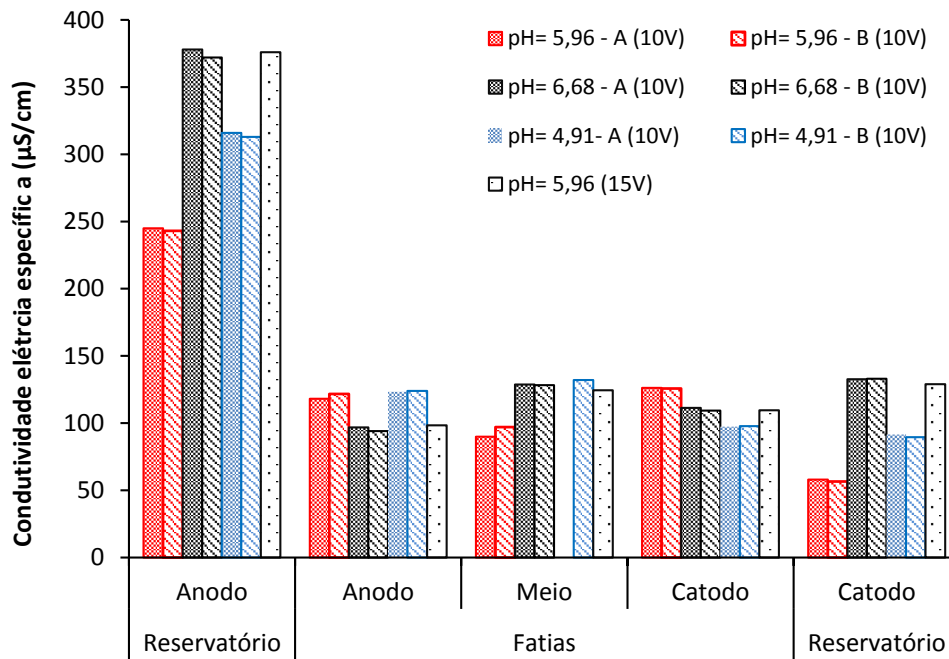
Mesmo utilizando soluções com pHs diferentes, observa-se uma uniformidade nos valores das fatias em todos os ensaios. O pH do tanque variou de forma mais pronunciada, cerca de 3 no tanque do anodo e cerca de 9 no tanque do catodo, esse resultado também foi observado por Fabris (2016), que utilizou solução fabricada com pH=7,59 para amostras indeformadas do mesmo solo.

É provável que a liberação de íons  $H^+$  e  $OH^-$  que se movem em direção aos eletrólitos estejam se acumulando tanto no lado do catodo quando no anodo e embora essa liberação tenha alterado o pH dos tanques, não tenha sido suficiente para modificar consideravelmente o pH da solução do solo.

A condutividade elétrica específica (CEE) nos tanques foi maior no reservatório do anodo, entre as fatias variou pouco e também para os diferentes ensaios, mesmo utilizando diferentes soluções. Possivelmente do lado do catodo o pH mais alto provoca precipitação no solo e dificulta a saída dos íons em direção ao tanque. Os resultados estão apresentados na Figura 5.23.



**Figura 5.22** - Variação do pH pós EK- Ensaios com diferentes soluções



**Figura 5.23** - Variação da CEE pós EK- Ensaios com diferentes soluções

### 5.3.3 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg foram determinados para cada fatia (anodo, meio e catodo) após todos os ensaios eletrocinéticos. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.24 à Figura 5.26.

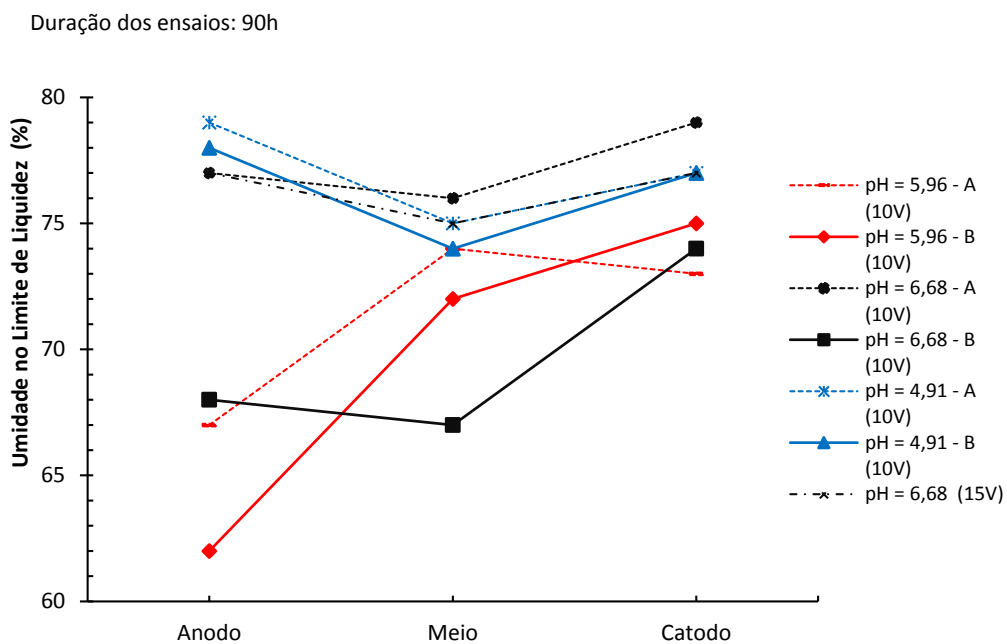
Os ensaios apresentaram boa repetibilidade em relação ao limite de plasticidade, limite de liquidez e índice de plasticidade. As amostras apresentaram limites de liquidez e plasticidade inferiores ao valor sem a adição da técnica.

Para as amostras com água deionizada com pH=5,96 (EK01 A e B) ambas apresentaram valores inferiores de limite de liquidez na fatia anodo, diferente do observado nos ensaios com solução fabricada e pH = 6,68 (EK 02 A e B) e pH= 4,91 (EK03 A e B) o qual apresentou seu limite inferior na fatia do meio. É possível observar que para o ensaio com água deionizada o limite de liquidez apresentou um crescimento no sentido anodo-catodo.

Em relação ao limite de plasticidade, nas amostras dos ensaios com água deionizada com pH=5,96 (EK01 A e B), o maior valor foi na fatia catodo, diferente do observado nos ensaios com solução fabricada e pH = 6,68 (EK 02 A e B) e pH= 4,91 (EK03 A e B), os quais apresentaram seu valor inferior na fatia catodo.

As variações do pH, conforme observado no item 5.3.2 foram pouco pronunciadas nas fatias, deixando mais evidente que as variações nos limites de Atterberg podem ser atribuídas aos arranjos das partículas e à incorporação de íons no solo, ou de outros fatores não relacionados às reações eletroquímicas desenvolvidos durante o ensaio eletrocínético.

O ensaio com água deionizada pH=5,96 (EK01 A e B) foi amostra que apresentou maior plasticidade, e a com solução reconstituída com pH mais ácido (EK03 A e B) a mais fluida, revelando como a solução utilizada e o pH influenciam diretamente na consistência e conseqüentemente nos limites de liquidez e plasticidade do solo.



**Figura 5.24** - Limites de liquidez Pós EK - Ensaio com diferentes soluções

Duração dos ensaios: 90h

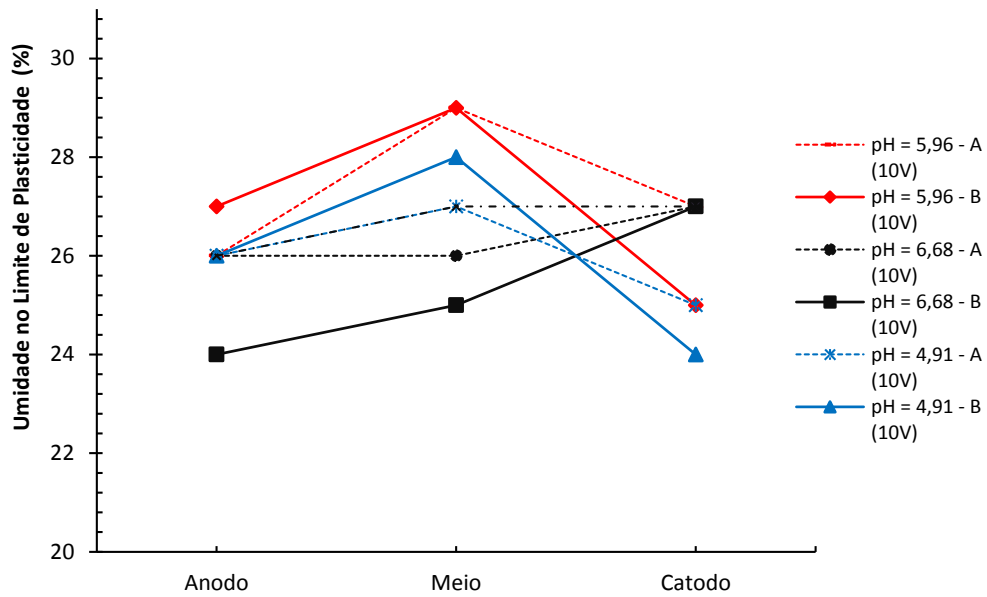


Figura 5.25 - Limites de plasticidade Pós EK - Ensaios com diferentes soluções

Duração dos ensaios: 90h

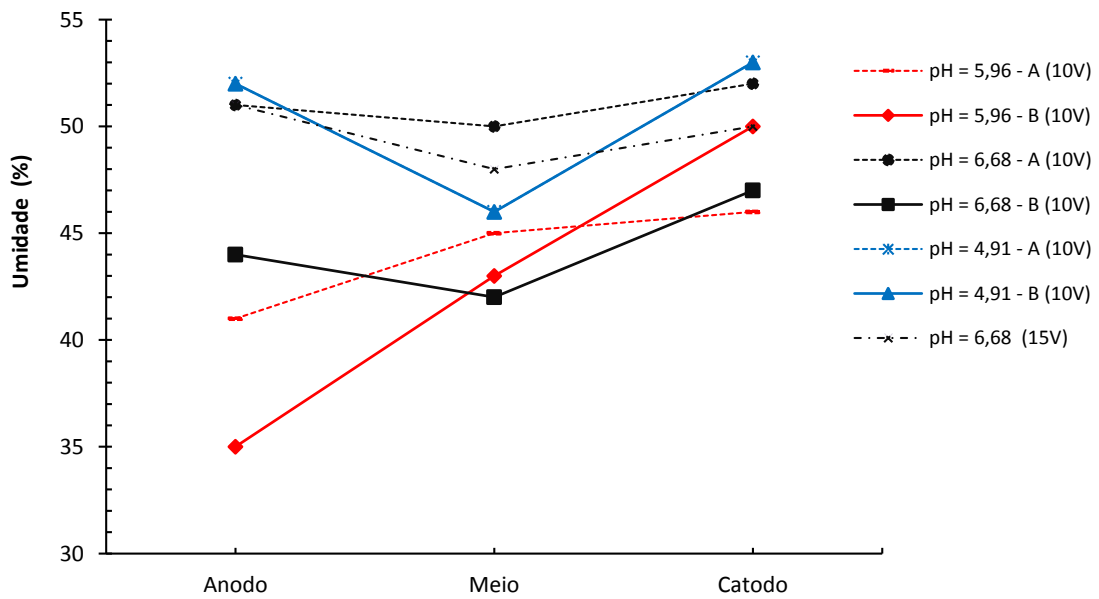


Figura 5.26 - Índices de plasticidade Pós EK - Ensaios com diferentes soluções



#### 5.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS

A Tabela 5.9 apresenta os valores medidos de condutividade térmica, capacidade calorífica e difusividade térmica do solo e suas respectivas médias. A amostra 1 consiste no solo seco desestruturado, a amostra 2 no solo adensado e sem ser submetido ao ensaio eletrocinético e a amostra 3 o solo também adensado porém submetido ao ensaio eletrocinético.

Considerando uma média global, os valores de condutividade térmica dependem das condutividades das partículas do solo, da porosidade e do seu conteúdo de umidade, das quais a umidade é a única variável de curto prazo para um dado solo.

Pode-se observar que a adição de umidade no solo seco aumenta sua condutividade térmica, o que acontece por duas razões. Primeiro, o revestimento das partículas do solo aumenta o contato térmico entre os grãos; segundo, desde que o espaço dos poros dos solos é finito, a adição de água nos poros deve expelir uma quantidade similar de ar deles.

Conforme ressalta Oke (1987), adicionar umidade a um solo seco inicialmente produz um aumento em sua difusividade térmica, aumentando o contato térmico e expelindo o ar do solo. Entretanto, na maioria dos solos, com valores superiores a 20% de conteúdo de umidade do solo por volume, sua difusividade térmica começa a diminuir.

A adição de água no solo, cuja respectiva capacidade calorífica é mais alta, exclui um volume proporcional de ar no solo, o qual, por sua vez, tem capacidade calorífica muito mais baixa. Isto resulta em uma redução na sensibilidade térmica do solo

Observa-se ainda que houve pouca variação nas amostras 2 e 3 (pré EK e pós EK). Os valores encontrados são compatíveis com os valores determinados por Alvalá et al. (2002) para solos da região amazônica e também para outros valores encontrados na literatura, conforme descrito no item 2.4.

**Tabela 5.9 - Resultados: Propriedades Térmicas**

		Condutividade e (W/m.K)	Capacidade Calorífica (MJ/m <sup>3</sup> .K)	Difusividade e (mm <sup>2</sup> /s)	Temperatur a (°C)	Umidade (%)
<b>Amostra 1</b> (Solo Seco)	<b>Leitura 1</b>	0,186	1,178	0,158	28	0
	<b>Leitura 2</b>	0,182	1,168	0,156	27,88	
	<b>Leitura 3</b>	0,173	1,18	0,147	27,76	
	<b>Leitura 4</b>	0,172	1,178	0,146	27,68	
	<b>Média</b>	0,178	1,176	0,151	27,83	
<b>Amostra 2</b> (Pré EK)	<b>Leitura 1</b>	1,408	3,399	0,414	23,47	52,6
	<b>Leitura 2</b>	1,415	3,366	0,421	23,88	
	<b>Leitura 3</b>	1,121	3,373	0,421	23,98	
	<b>Leitura 4</b>	1,418	3,369	0,421	24,07	
	<b>Média</b>	1,340	3,376	0,419	23,85	
<b>Amostra 3</b> (Pós EK)	<b>Leitura 1</b>	1,52	3,753	0,405	26,43	54,8
	<b>Leitura 2</b>	1,514	3,632	0,415	25,23	
	<b>Leitura 3</b>	1,516	3,625	0,418	24,93	
	<b>Leitura 4</b>	1,524	3,630	0,420	24,96	
	<b>Média</b>	1,518	3,660	0,414	25,38	

## 5.5 CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NOS SOLOS

A fim de selecionar e ajustar os pontos de dados para as funções de curva de retenção e condutividade hidráulica, utilizou-se os dados de carga de pressão hidráulica, conteúdos volumétricos de água e fluxos de evaporação gerados pelo equipamento HYPROP e subsequentemente para interpretação o software HYPROP-FIT (UMS AG, PERTASSEK et al., 2015, versão 3.5.1.13951) como descrito por PETERS e DURNER (2008).

Ao final do ensaio, a amostra foi levada à estufa a 105°C, e através do peso do solo seco o programa pode calcular o conteúdo de água. O peso do solo seco após o ensaio foi 274,27 g e a porosidade do solo ensaiado igual a 0,60.

O HYPROP-FIT foi utilizado ainda para selecionar e ajustar diferentes modelos de propriedades hidráulicas aos dados. Durante o ajuste, alguns modelos foram testados para o melhor ajuste estatístico RMSE( $\theta$ ) e RMSE(logK), que são análises estatísticas realizadas pelo programa através do erro médio quadrático (root mean square error – RMSE) entre os dados previstos e observados para o conteúdo volumétrico de água (RMSE( $\theta$ )) e para a condutividade hidráulica (RMSE(logK)).

Para todo ajuste da curva é inserido no programa o peso seco do solo após os ensaios, conforme estipulado no manual do HYPROP, e então, o HYPROP-FIT calcula o conteúdo de água inicial (%), a porosidade e a densidade aparente seca ( $\text{g/cm}^3$ ), que estão apresentados na Figura 5.28.

Os modelos que apresentaram melhores resultados foram o modelo de van Genuchten-Mualem (1980) e Fredlund e Xing (1994). O gráfico do ensaio no HYPROP é apresentado na Figura 5.27 e os gráficos dos ajustes pelo HYPROP-FIT na Figura 5.29 e Figura 5.30. A curva ajustada pelo modelo Fredlund e Xing (1994) apresentou uma inclinação mais pronunciada em relação à curva ajustada pelo modelo van Genuchten-Mualem (1980), que apresentou um decréscimo mais gradual dos valores previstos de conteúdo de água com o aumento da tensão.

Reichardt (1987) e Demattê (1988), afirmaram que, em solos de textura mais fina, a distribuição dos poros por tamanho é maior e mais uniforme, proporcionando a adsorção de maior conteúdo de água e decréscimo mais gradual da umidade do solo com o aumento da tensão. Demattê (1988), afirma ainda que, em altas tensões, o teor de argila é responsável por maior retenção de água, já que a partir de uma determinada tensão a porosidade deixa de ser relevante na retenção de água.

Estudos técnicos têm enfatizado que o processo de eletro-osmose tende a ser mais eficiente para condutividades hidráulicas do solo na faixa de  $10^{-6}$  a  $10^{-8}$   $\text{cm/s}$  (MITCHELL, 1993). Ou seja, em solos menos permeáveis a drenagem por eletro-osmose tende a ser mais significativa do que sob a aplicação de um gradiente de carga hidráulica.

Cravo (2016) utilizou o mesmo solo em seus estudos e encontrou no ensaio de permeabilidade com carga variável realizado durante o ensaio de adensamento um material com baixa permeabilidade, na ordem de  $10^{-7}$   $\text{cm/s}$ . Para esse valor de permeabilidade, o fluxo eletro-osmótico durante os ensaios eletrocinéticos deveria ser positivo, o que não ocorreu durante os ensaios com a solução fabricada de  $\text{pH}=6,68$  também utilizada para saturação da amostra para este ensaio.

Fixando o valor de condutividade Hidráulica saturada ( $K_s$ ) encontrado por Cravo (2016) no HYPROP-FIT o resultado para o ajuste das funções de retenção e condutividade hidráulica não foi satisfatório. Sem fixar este valor, ou seja, optando pela

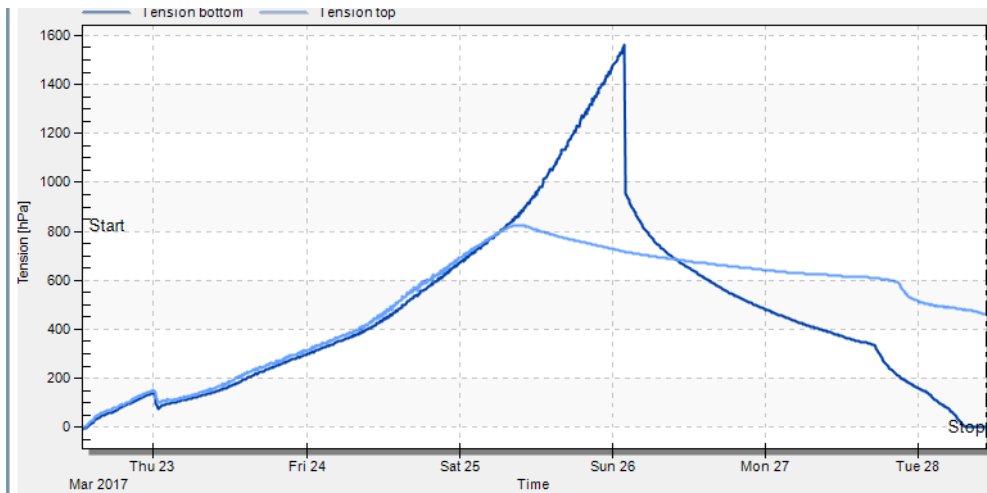
previsão realizado pelo programa, foi possível ajustar ambas as funções de retenção e condutividade hidráulica com resultados satisfatórios e menor RMSE. Para o modelo de van Genuchten-Mualem (1980), o valor de condutividade foi na ordem de  $10^{-6}$  cm/s e  $10^{-4}$  cm/s para o modelo de Fredlund e Xing (1994).

O valor de  $K_s$  encontrado para o modelo de van Genuchten-Mualem (1980) apesar de mais compatível com o ensaio de permeabilidade realizado por Cravo (2016), estando na faixa de  $10^{-6}$  a  $10^{-8}$  cm/s, que de acordo com Mitchell (1993) é a faixa na qual o processo de eletro-osmose

deveria ser mais eficiente, diferente do resultado obtido durante os ensaios deste trabalho com a solução fabricada de pH=6,68.

A amostra ensaiada possui massa específica aparente seca relativamente baixa  $1,1$  g/cm<sup>3</sup>, sendo assim o modelo Fredlund e Xing (1994) pode ser mais condizente com a realidade do  $K_s$  estimado. Para tal afirmação seria necessário a realização de teste de permeabilidade com a amostra adensada nas mesmas condições dos ensaios. A análise estatística dada pelo HYPROP-FIT (RMSE\_TH e RMSE\_K), que é o erro calculado entre a curva ajustada pelo programa e os pontos observados, apresentou menor valor para este modelo. Além disso a amostra ensaiada foi adensada, sendo o modelo Fredlund e Xing (1994) o mais indicado dentro do contexto Geotécnico, devido às alterações no arranjo dos poros promovidas por esta técnica que, conseqüentemente, interfere nos parâmetros de fluxo de água.

A Figura 5.31 e Figura 5.32 apresentam os parâmetros das funções de retenção e de condutividade hidráulica ajustados para os respectivos modelos, bem como o erro estatístico calculado entre os valores observados e previstos para RMSE( $\theta$ ) e RMSE(logK) calculados pelo HYPROP-FIT.

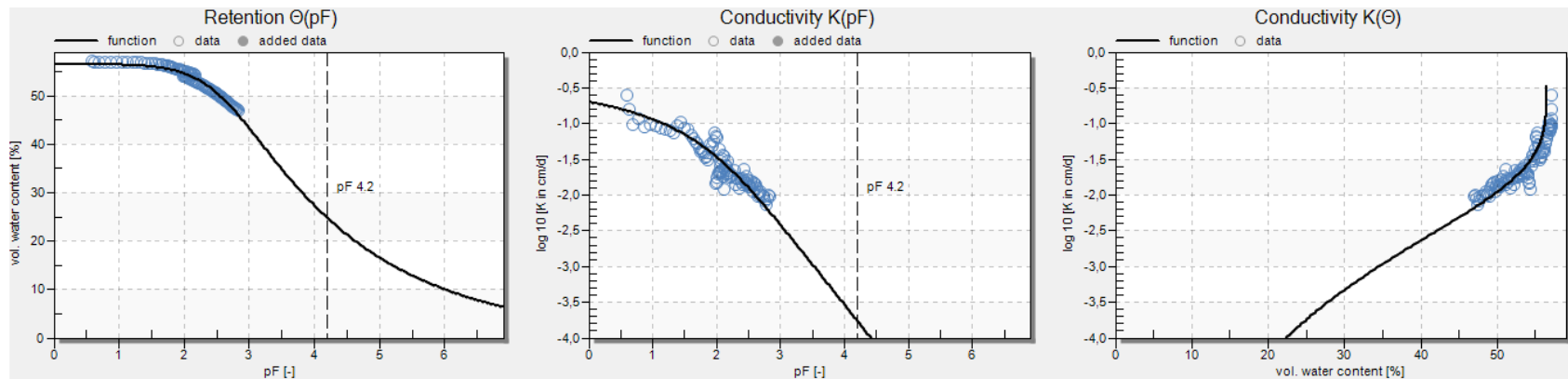


**Figura 5.27 - Gráfico ensaio HYPROP**

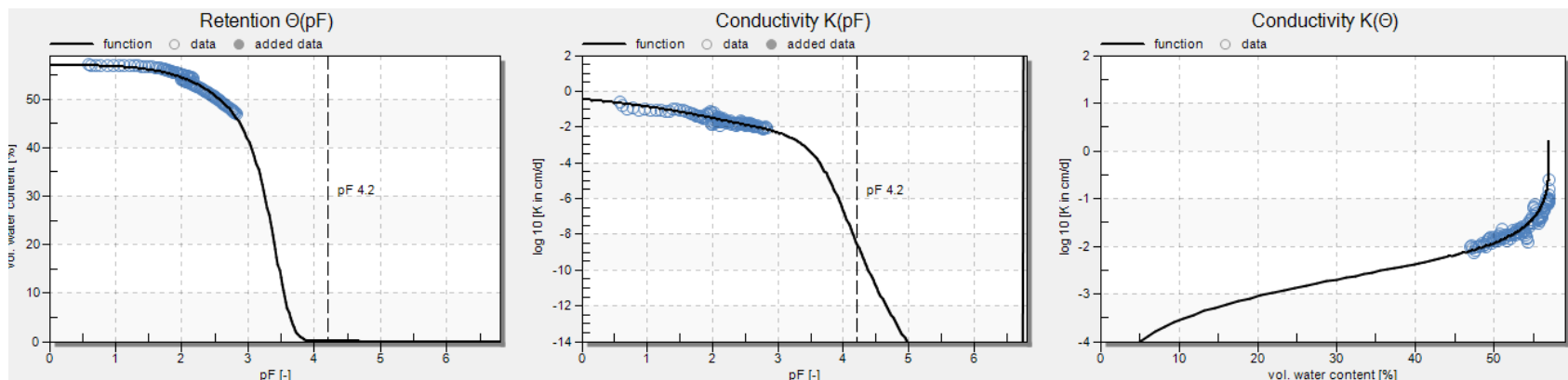
Tensão (cm) x tempo (dias) e Peso (g) x tempo (dias)

<b>Conteúdo de água inicial (%)</b>	57,1
<b>Porosidade</b>	0,58
<b>Densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,1

**Figura 5.28 – Saídas do Hyprop: conteúdo de água inicial (%), porosidade e densidade aparente seca (g/cm<sup>3</sup>)**



**Figura 5.29** - Resultados dos dados de  $\theta(pF)$ ,  $K(pF)$  e  $K(\theta)$ , ajustados pelo modelo de van Genuchten-Mualem (1980)



**Figura 5.30** - Resultados dos dados de  $\theta(pF)$ ,  $K(pF)$  e  $K(\theta)$ , ajustados pelo modelo de Fredlund e Xing (1994).

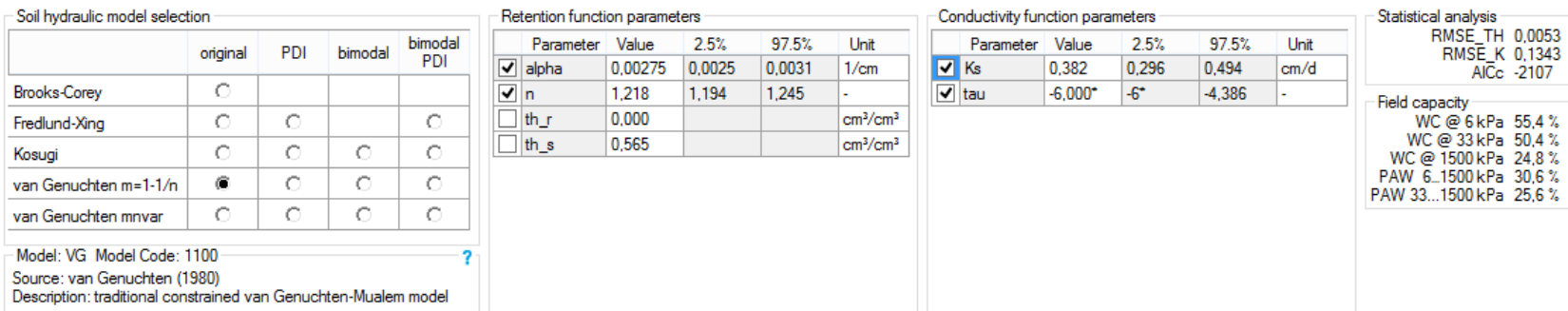


Figura 5.31 -Parâmetros das funções e resultados estatísticos, ajustados pelo modelo de van Genuchten-Mualem (1980)

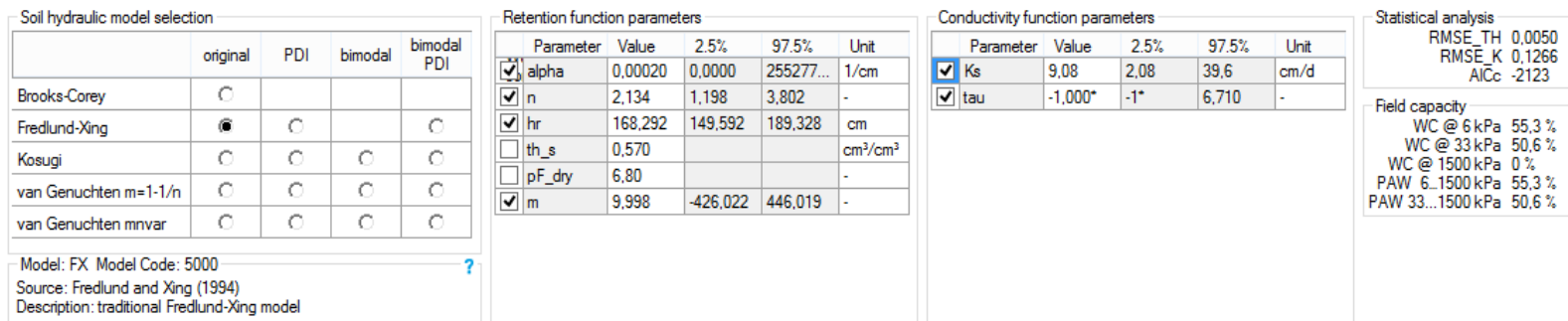


Figura 5.32 - Parâmetros das funções e resultados estatísticos, ajustados pelo modelo de Fredlund e Xing (1994).

## 6 CONCLUSÕES

A mistura fabricada em laboratório produziu amostras homogeneizadas e menos rígidas a partir das amostras indeformadas coletadas com amostrador Denison em Triunfo, RO. As análises de DRX mostraram o predomínio da caulinita e também a presença de minerais de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e os resultados dos ensaios de capacidade tampão mostraram que o solo possui pouca resistência à variação de pH, o valor de PCZ determinado foi de 5,43. Sendo assim, a mistura utilizada neste estudo se mostrou representativa dos solos originais. Em relação aos parâmetros geotécnicos, as amostras apresentaram limites de liquidez e plasticidade inferiores ao valor sem a adição da técnica.

Os resultados deste trabalho demonstram que a estrutura influencia o comportamento do solo durante os ensaios eletrocinéticos. Fabris (2016) manteve a estrutura do solo (amostras indeformadas) e obteve valores de resistividade elétrica que podem superar os valores encontrados para o solo desestruturado (amostras indeformadas) em até cinco vezes. Esse resultado mostra a influência da estrutura do solo sobre os valores de resistividade elétrica.

Embora a literatura afirme que a eficiência da técnica eletrocinética é tão maior quanto menor for a condutividade elétrica do solo, ou seja, quanto maior for a sua resistividade, os ensaios apresentaram resultados positivos para o fluxo eletro-osmótico para valores menores de resistividade. A estrutura afeta o processo eletro-osmótico, porque ela é diretamente dependente da quantidade e distribuição (localização) das cargas elétricas superficiais.

Os resultados indicaram que o pH das soluções utilizadas teve influência sobre o fluxo eletro-osmótico, não somente em sua magnitude mas também na sua direção. Também foi possível observar uma redução significativa nas perdas elétricas nos pinos durante os ensaios quando comparado com os resultados encontrados por Fabris (2016). Essa redução é oriunda da adaptação realizada nos eletrodos, evidenciando uma melhora no equipamento eletrocinético.

Em relação às propriedades térmicas, os valores encontrados de condutividade foram 0,178 W/m.K (solo seco), 1,340 W/m.K (pré-EK) e 1,518 W/m.K (pós-EK); capacidade calorífica de 1,176 MJ/m<sup>3</sup>.K (solo seco), 3,376 MJ/m<sup>3</sup>.K (pré-EK) e 3,660 MJ/m<sup>3</sup>.K (pós-EK) e difusividade de 0,151 mm<sup>2</sup>/S (solo seco), 0,419 mm<sup>2</sup>/S (pré-EK), 0,414 mm<sup>2</sup>/S



(pós-EK). Apesar de medidos, estes valores não foram utilizados já que todos os ensaios realizados foram com a temperatura externa controlada.

A porosidade apresentada pelo programa HYPROP para a CRA foi bem próxima da determinada inicialmente e o resultado encontrado para CRA pelo modelo Fredlund e Xing (1994) é mais condizente com o tipo de solo estudado, apresentando menor erro estatístico. Apesar disso, o valor encontrado para o  $K_s$  não é suficiente para explicar a não ocorrência de fluxo eletro-osmótico durante os ensaios eletrocinéticos.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar outros ensaios para obtenção da CRA, não apenas com amostras reconstituídas, mas também com amostras indeformadas e com as outras soluções, a fim de avaliar a natureza desses solos em relação às interações de sua textura, organização estrutural e composição química e mineralógica que influenciam suas respostas às variações de conteúdos e fluxo de água.
- Utilizar as equações de fluxo de água para discutir os resultados encontrados para o fluxo eletro-osmótico durante os ensaios eletrocinéticos.
- Realizar ensaios eletrocinéticos sem o controle de temperatura externa, a fim de analisar a influência da temperatura nos parâmetros elétricos deste solo e dos parâmetros térmicos sobre o comportamento durante a aplicação da eletrocinética.
- Criar mecanismos que avaliem de que forma a estrutura influencia os parâmetros elétricos do solo. Realizar ensaios eletrocinéticos variando gradualmente o teor de umidade da amostra, mantendo-se constante a compactação, e posteriormente variando a compactação em função de valor constante de umidade.
- Realizar ensaios de Capacidade de Troca Catiônica após os ensaios eletrocinéticos.
- Monitorar a tensão que alimenta o ensaio, já que existe uma grande probabilidade de queda de tensão.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULLAH, W. S. AL-ABADI, A. M. "Cationic–electrokinetic improvement of an expansive soil". **Appl Clay Sci**, v. 47(3–4), pp. 343-350, 2010.

ABU-HAMDEH, N. E. "Soil Thermal Conductivity: effects off Density, Moisture, Salt Concentration, and Organic Matter". **Soil Science Society of America Journal**, pp. 1285-1290, 2003.

ACAR, Y. B.; ALSHAWABKEH, A. N. " Electrokinetic remediation. I. pilot-scale tests with Pb-spiked kaolinite." **Journal of Geotechnical Engineering**, pp 122:173, 1996.

ACAR, Y.B.; ALSHAWABKEH, A.N. "Principles of electrokinetic Remediation". **Environmental Science and Technology**, v. 27, n.12, pp 2638-2647,1993.

ACAR, Y.B.; GALE, R.J.; ALSHAWABKEH, A.N.; MARKS, R.E.; PUPPALA, S.; BRICKA, M.; PARKER, R. "Electrokinetic remediation: basics and technology status". **J Hazard Mater**, pp117–137, 1995.

ADAMSON, L.G.; RIEKE, H.H.; GREY R.R.; CHILINGAR G.V. "Electrochemical treatment of highly shrinking soils". **Eng Geol**, pp.197–203, 1967.

ALMEIDA, J.A.; MAÇANEIRO, K.C. & KLAMT, E. Mineralogia da fração argila de solos vermelhos com horizontes superficiais brunados do planalto de Lages (SC). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, pp.815-828, 2000.

ALSHAWABKEH, A.; ACAR, Y. "Electrokinetic remediation. II: theoretical model". **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 122, pp.186–196, 1999.

ALVALÁ, R. C. S.; GIELOW, R.; WRIGHT, I., R.; HODNETT, M. G. THERMAL DIFFUSIVITY OF AMAZONIAN SOILS. IN: GASH, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victória, R. L. (eds). "**Amazon Deforestation and Climate**". Chichester, U.K. Wiley, pp.139-150, 1996.

ALVALÁ, R. C. S.; GIELOW; R., DA ROCHA H. R.; FREITAS; H. C.; LOPES, J. M.; MANZI, A. O.; VON RANDOW, C.; DIAS, M. A. F. S.; CABRAL, O. M. R.; WATERLOO; M. J. "Intradiurnal and seasonal variability of soil temperature, heat flux and diffusivity under pasture and forest in Rondonia" . **Journal of Geophysical Research**, 107, X-1 – X-20, 2002.

ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; SÁ, L. D. A.; VITTAL MURTY, K. P. R.; GIELOW, R. ARLINO, P. R. A.; ALVALÁ, P. C.; LIMA, I. T. D.; FILHO, E. P.; SAMBATTI, S. B. M.; VON RANDOW, C.; SOUZA, A.; KASSAR, E.; MALHY, Y. S.; KRUIJT, B; MEIRELLES, M. L. Projeto Interdisciplinar do Pantanal - Fase úmida (IPE-1). **Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Brasília, 1998.

ALVES, M.E., MACEDONIO, C.R., LAVORENTI, A. Ponto de efeito salino nulo: Determinação analítico-computacional a partir de dados de titulação potenciométrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, pp. 553 – 559, 2002.

ANDRADE, C. L.; BORGES JUNIOR, J.; COUTO, L. **Características Físico-hídricas e dinâmica da água no solo**. In: P. E. ALBURQUERQUE, & F. O. DURÃES, Uso e Manejo de irrigação (pp. p.75-149). Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas., 2008.

APPELO, C.A.J., POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Taylor and Francis, 2.ed. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 7117, 2012 Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo.

BARBOSA, M. C. Fundação COPPETEC. **Determinação dos fatores de filtração e de eletro-osmose de solos para projeto dos eletrodos de aterramento**. In: Relatório Final. Rio de Janeiro, fev. 2012.

BARROSO, I. M. **Camadas de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos: Estudo Preliminar de Casos**. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, 2008.

BEZERRA,S.R.C. **Avaliação de Sistemas de Aterramento Considerando a Utilização de Condutores e Hastes Envolvidos em Concreto**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Energia/USP, São Paulo, SP, Brasil, 2011,

BJERRUM, L.; MOUM, J.; EIDE, O. “Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian Quick Clay”. **Géotechnique**, v. 17, pp. 214–235, set. 1967.

BORTOLUZZII, C.; PERNESII, M.; TESSIERII, D. Interestratificado caulinita-esmectita em um argissolo desenvolvido a partir de rocha sedimentar do Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, pp. 2007.

BRADY, N. C., & BUCKMAN, H. **Natureza e propriedades dos solos**. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1989.

BRANDON, T. E. "Factors Influencing the Thermal o Resistivity of Sands". **Journal of Geotechnical Engineering**, pp. 1683-1689, 1989.

BURNOTTE, F.; LEFEBVRE, G.; GRONDIN, G. "A case record of electroosmotic consolidation of soft clay with improved soil–electrode contact". **Can. Geotech. J.**, v.41, pp. 1038–1053, 2004.

CAMPANELLA, R. G., WEEMES, I. "Development and use of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies", **Canadian Geotechnical Journal**, vol. 27, pp. 557-567, 1990.

CAMPANELLA, R. G. "Geo-environmental Site Characterization of Soils Using in situ Testing Methods". **Asia Inst. of Tech., 40th Year Conference**, New Frontiers and Challenges, 1999.

CAMPOS, D. V.; DONAGEMAS, G. K.; CALDERANO, S. B.; TEOXEIRA, W. G.; & VIANA, J. H. **Umidade obtidade no aparelho extrator de Richards**. In: Manual de Métodos de Análise de Solo, pp. 23-25, Rio de Janeiro, 2011.

CARMO, C. O. **Aplicação de técnica eletrocinética combinada com oxidação química em laboratório para remediação de solo argiloso contaminado com óleo diesel**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

CASAGRANDE, L. "Electro-osmosis in soils". [**Géotechnique**, v. 1, pp. 159-17, 1949.

CASAGRANDE, L. "Electro-osmosis in soils". **Géotechnique**, London, England, 1948.

CASAGRANDE, L. "Electro-osmosis stabilization of soils". **J. Boston Soc. Civil Eng.**, v. 39, pp.51–83,1952.

CASAGRANDE, L. "Review of past and current work on electro-osmotic stabilization of soils". **Harvard Soil Mechanics Series**, n. 45, 1953.

CHAPPELL, B.A.; BURTON, P.L. "Electra-osmosis applied to unstable embankment". **Journal of Geotechnical Engineering**, pp. 733–739, 1975.

CHEN J.L.; MURDOCH, L.C. "Field demonstration of insitu electroosmosis between horizontal electrodes insitu remediation of the geoenviroment". **Paper presented at the proceedings**, 1997.

CHIEN, S.C.; OU, C.Y.; WANG, Y.G. " Injection of saline solutions to improve the electro-osmotic pressure and consolidation of foundation soil". **Appl Clay Science**, v.44, pp.218–22, 2009.

CRAVO, M. M. **Análise De Resistência De Um Solo Tropical Remoldado Após Eletrocinética** (Trabalho de conclusão de curso) Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2016.

DECAGON DEVICES, INC., In: **Site da Decagon Devices, Inc**: <http://aqualab.decagon.com.br/produtos/kd2/kd2/>. Obtido em 23 de Fevereiro de 2016.

DEMATTÊ, J.L.I. **Manejo de solos ácidos dos trópicos úmidos região amazônica**. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 215p

DEOTTI, L. D. **Controle de pH na técnica de biorremediação eletrocinética**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro . Rio de Janeiro, 2005.

DUARTE, A. **Avaliação de Propriedades Termo-Hidráulicas de Solos Requeridas na Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2004.

DUR, J.C.; WIRIYAKITNATEEKUL, W.; LESTURGEZ, G.; ELSASS, F.; PERNES, M.; HARTMANN, C. & TESSIER, D. "Clay mineral dissolution following intensive cultivation in a tropical sandy soil". In: **Management of tropical sandy soils for sustainable agriculture**. Khon Kaen, Thailand, 2005.

DZENITIS, J. "Soil Chemistry Effects and Flow Prediction in Electroremediation of So". **Environ. Sci. Technol**, pp. 1191-1197, 1997.

EARTHING TECHNIQUES. Lightning & Surge Technologies. Disponível em: <<http://www.lightningman.com.au/Earthing.pdf>> Acesso em: 13 out., 2016EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Boletim de Pesquisa e**

**Desenvolvimento: Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** São Paulo, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Critérios para distinção de classes de solos e de fases de unidades de mapeamento.** Rio de Janeiro, 1988.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Rio de Janeiro, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de Métodos de Análise de Solo.** Rio de Janeiro, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** Rio de Janeiro, 2006.

ESRIG, M. "Pore pressures, consolidation, and electrokinetics". **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division** , v. 94, n. 4, pp. 899-92, 1968.

ESRIG, M. I., & GEMEINHARDT, J. "Electrokinetic Stabilization of an illitic clay". **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division** , v. 93, n. 3, pp. 129-136, 1967.

FABRIS, C. M. **Análise dos parâmetros geotécnicos, físico-químicos e elétricos de dois solos caulíníticos após ensaios eletrocinéticos.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

FABRIS, C. M. **Varição de parâmetros geotécnicos do solo após ensaio eletrocinético.** 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Rio de Janeiro, 2016.

FANG, H.Y. Introduction to Environmental Geotechnology. CRC Press. Fundamentals of Applied and Environmental Geophysics Spring – Electrical Methods Topic, 1977. Disponível em: <<http://www.geo.mtu.edu/~jdiehl/ge3040.html>> Acesso em: 03 nov., 2016.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B. & CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:507-514, 1999.

FONTES, M. "Iron oxide-clay mineral association in Brazilian Oxisols: a magnetic separation study". **Clays and Clay Minerals**, pp. 175-179, 1992.

FORMOSO, M. L. Academia Brasileira de Ciências: **Workshop on Tropical soils**. Rio de Janeiro, 1999.

FOURIE, A. J. "Dewatering of Mine Tailings Using Electrokinetic Geosynthetics". **Canadian Geotechnical Journal**, v. 44, n. 2, pp. 160-172, 2007.

FREDLUND, D. G. "Prediction of the permeability functions for unsaturated soil using the soil water characteristic curve". **Canadian Geotechnical Journal**, pp. 533-546, 1994.

FREDLUND, D. G., XING, A. Q. "Equations for the soil-water characteristic curve". **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31(4), pp. 521 – 532, 1994.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. "Stress State Variables for Unsaturated Soils". **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v.103, n. GT5, pp. 447-466, 1977.

GIROTTO, E.M., SANTOS, I.A. "Medidas de Resistividade Elétrica DC em Sólidos: Como Efetuá-las Corretamente", **Química Nova**, v. 25, n. 4, pp. 639-647, 2002.

GLENDINNING, S.; JONES, C.J.F.P.; LAMONT-BLACK, J.; HALL, J. "Treatment of lagooned sewage sludge in situ using electrokinetic geosynthetics". **Geosynth Int** 15, pp. 192–204, 2008.

GLENDINNING, S.; JONES, C.J.F.P.; PUGH, R.C. "Reinforced soil using cohesive fill and electrokinetic geosynthetics". **Int J Geomech**, v. 5, pp.138–146, 2005.

GRAY, D.H.; MITCHELL, J.K. "Fundamental aspects of electroosmosis in soils". **J Soil Mech Found Div ASCE**, v. 93(6), pp. 209–236, 1967.

GUIMARÃES, L.M. **Determinação das Propriedades Hidráulicas em Solos não Saturados Utilizando uma Centrífuga de Pequenas Dimensões**. Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da UFV-MG, Viçosa, Brasil, 2013.

GUPTA, S. &. "Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density". **Water Res.**, 1979.

HAMIR, R.B., JONES, C., CLARKE, B.G. "Electrically conductive geosynthetics for consolidation and reinforced soil". **Geotext Geomembr**, v.19 (8), pp. 455–482, 2001.



HAPIRO, A. P.; & PROBSTEIN, R. F. "Removal of contaminants from saturated clay by electroosmosis". 1993.

HASSANEIN, A. S., BENSON, C. H., BOLTZ, L. R., 1996, "Electrical Resistivity of Compacted Clays", **Journal of Geotechnical Engineering**, vol. 122, n. 5, pp. 397-406, 1996.

HELMHOLTZ, H.L.F. "Studies of electric boundary layers". **Wied Ann**, v.7, pp. 337–382,1879.

HILLEL, D. "Soil and Water - physical principles and processes". **New York: Academic Press**,1971.

HU, L.M.; WU, W.L.; WU, H. "Numerical model of electroosmotic consolidation in clay". **Geotechnique**, v. 62(6), pp. 537–54, 2012.

HUKSEFLUX THERMAL SENSORS. **Thermal Conductivity Science**:. Disponível em: <http://www.hukseflux.com/thermal%20conductivity/thermal.htm>. Acesso em: Março de 2016.

INDA JUNIOR, A.V. **Caracterização de goethita e hematita em solos poligenéticos**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Janeiro. Porto Alegre, pp. 126, 2002.

IVLIEV, E.A. "Electro-osmotic drainage and stabilization of soils". **Soil Mech Found Eng**, v. 45(6), p. 211–218, 2008.

JACKSON, P. D., SMITH, D. T., STANFORD, P. N. "Resistivity-Porosity- Particle Shape Relationships for Marine Sands", **Geophysics**, vol. 43, n. 6, pp. 1250-1268, 1978.

JAYASEKERA, S.; HALL, S. "Modification of the properties of salt affected soils using electrochemical treatments". **Geotech Geol Eng**, v. 25(1), pp. 1–10, 2007.

JAYASEKERA, S.; MEWETT, J.; HALL, S. "Effects of electrokinetic treatments on the properties of a salt affected soil". **Aust Geomech J**, v. 39(4), pp. 33–46, 2004.

JEANS,C.V.; MITCHELL, J.G.; FISHER, M.J.; WRAY, D.S. & HALL, I.R. "Age, origin and climatic signal of English Mesozoic clays based on K/Ar signatures". **Clay Miner.**, v.36, pp. 515-539, 2001.

JEYAKANTHAN, V.; GNANENDRAN, C.T.; LO, S.C.R. "Laboratory assessment of electro-osmotic stabilization of soft clay". **Can Geotech J.**, v. 48(12), pp. 1788–1802, 2011.

JOHANSEN, O. "Thermal Conductivity of Soils" . Ph.D. Thesis, Norway, Traduzida por **USA Corps of Engineer**, 1975.

JONES, C.J.F.P.; GLENDINNING, S., HUNTLEY, D., LAMONT-BLACK, J. "Case history: In-situ dewatering of lagooned sewage sludge using Electrokinetic geosynthetics (EKG). In: Kuwano J, Koseki J (eds) **Eighth International Conference on Geosynthetics**. Millpress, Rotterdam, pp. 539–542, 2006.

JONES, C.J.F.P.; LAMONT-BLACK, J., GLENDINNING, S. "Electrokinetic geosynthetics in hydraulic applications". **Geotext Geomembr**, v. 29(4), pp. 381–390, 2011.

JUNIOR, G. D.; MARINHO, F. A.; & SOTO, M. A. "A curva de retenção de água de materiais porosos". In J. C. de Carvalho, G. D. Gitirana Junior, S. L. Machado, M. M. Mascarenha, & F. C. Filho, **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, pp. 224, 2015.

KALUMBA, D.; GLENDINNING, S.; ROGERS, C.; TYRER, M.; BOARDMAN, D. "Dewatering of tunneling slurry waste using electrokinetic geosynthetics". **J Environ Eng**, v.135(11), pp. 1227–1236, 2009.

KAMARUDIN, B.; MOHD, R.T; KHAIRUL, A.K." Electrokinetic treatment on a tropical residual soil". **Paper presented at the proceedings of the ICE - ground improvement**, 2010.

KANIRAJ, A.S.R.; HUONG, H.L.; YEE, J.H.S. "Electro-Osmotic consolidation studies on peat and clayey silt using electric vertical drain". **Geotech Geol Eng**, v. 29(3), pp. 277–295, 2011.

KARUNARATNE, G.P.; JONG, H.K.; CHEW, S.H. "New electrically conductive geosynthetics for soft clay consolidation". **Paper presented at the GeoAsia 2004**, Seoul, Korea, 2004.

KAYA, A., YUKSELEN, Y., "Zeta potential of soils with surfactants and its relevance to electrokinetic remediation". **Journal of Hazardous Materials**, v. 120, n.1 – 3, pp. 119 – 126, 2005.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, pp. 17-40, 1998.

KER, J. **Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa . Viçosa, 1995.

KERSTEN, M. "Laboratory Research for the Determination of the Thermal Properties of Soils". **ACFEL Technical Report**, v. 23, 1949.

KIM, K.J.; KIM, D.H.; YOO, J.C.; BAEK, K. "Electrokinetic extraction of heavy metals from dredged marine sediment". *Sep Purif Technol*, v. 79(2), pp. 164–169, pp. 2011.

KINDERMANN G., CAMPAGNOLO, J.M. **Aterramento Elétrico**. 3 ed. Porto Alegre, Sagra – D.C. Luzzatto, 1995.

LA, A. "Power line as a tunable ULF-wave radiator: properties of artificial signal at distances of 200 to 1000 km". **Journal Geophys Res.**, 2006.

LACERDA, M.P.C.; ANDRADE, H. & QUÉMÉNEUR, J.J.G. Transformações mineralógicas ao longo de perfis de alteração pedogenética na região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, pp. 799-809, 2001.

LAURSEN, S.; JENSEN, J.B. "Electro-osmosis in filter cakes of activated sludge". **Water Resour**, v. 27(5), pp. 777–783, 1993.

LEE, G.; RO, H. "Effects of triethyl phosphate and nitrate on electro-kinetically enhanced biodegradation of diesel in low permeability soils". **Environ Technol**, v.28, pp. 853–860, 2007.

LEE, J. K.; SHANG, J.Q.; XU, Y. "Electrokinetic dewatering of mine tailings using DSA electrodes". **Int. J. Electrochem. Sci.** v.11, pp. 4149 – 4160, 2016.

LEFEBVRE, G.; BURNOTTE, F. "Improvements of electroosmotic consolidation of soft clays by minimizing power loss at electrodes". **Can Geotech Journal**, v.39(2), pp. 399–408, 2002.

LEWIS, R.W.; HUMPHESON, C. "Numerical analysis of electroosmotic flow in soils". **ASCE Journal Soil Mech Found**, v.11(3), pp.51, 1974.

LIAKI, C., ROGERS, C.D.F.; BOARDMAN, D.I. "Physico-chemical effects on clay due to electromigration using stainless steel electrodes". **Journal Appl Electrochem**, v. 40(6), pp.1225–1237, 2010.

LIMA, J. T. **Modelagem Numérico-Experimental do Transporte de Íons por eletrocinética no solo. Dissertação** (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

LO, K.Y.; HO, K.S.; "Field test of electroosmotic strengthening of soft sensitive clay". **Can Geotech Journal**, v. 28(1), pp. 74–83, 1991.

LOCH, J.P.G.; LIMA, A.; KLEINGELD, P. "Geochemical effects of electro-osmosis in clays". **Journal Appl Electrochem**, v. 40(6), pp.1249–1254, 2010.

LOCKHART, N.C. "Combined field dewatering—bridging the science-industry gap". **Drying Technol**, v. 10(4), pp. 839–874, 1992.

LOCKHART, N.C. "Electro-osmotic dewatering of clays:influence of voltage". **Colloids Surf A**, v.6(3), pp. 229–238, 1983.

LOCKHART, N.C.; STICKLAND, R.E. "Dewatering coal washery tailings ponds by electroosmosis". **Powder Technol**, v. 40(1–3), pp. 215–221, 1984.

LOMIZE, G.M.; NETUSHIL, A.V. **Elektroosmoticheskoe vodoponizhenie**. WorldCat, Moskva, 1958.

LONG, E., GEORGE, W. "Turnagain slide stabilization". Anchorage, Alaska. **Journal Soil Mech Found Div ASCE**, v. 93(4), pp. 611–627, 1967.

LOPES, M.B.L. **Influência da Sucção na Resistência ao Cisalhamento de um Solo Residual de Filito de Belo Horizonte, MG**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, 2006.

LUNNE, T.; ROBERTSON, P.K.; POWELL, J.J.M. **Cone penetration testing in geotechnical practice**, 1 ed. London (England), Blackie Academic & Professional, Chapman & Hall, pp. 311, , 1997,.

LUO, Q.; WANG, H.; ZHANG, X.; QIAN, Y. "Effect of direct electric current on the cell surface properties of phenoldegrading bacteria". **Appl Environ Microbiol**, v. 71(1), pp. 423–427, 2005.

MACHADO, A. T.S.; BERTAGNA, F.A.B.; SANTOS, P.; FIGUEIREDO, R.; JUNIOR, I.G.S.; COSTA, A.C.S. Cargas superficiais de um latossolo após aplicação de adubos orgânicos, inorgânicos e resíduos industriais. **VII Encontro Internacional de produção científica**. Centro Universitário Cesumar Edit. CESUMAR, Maringá, Paraná, Brasil, 2013.

MAHMOUD, A. O. "Electrical Field: A Historical Review of its Application and Contributions in Wastewater Sludge Dewatering". **Water Research**, 2010.

MALEKZADEH, M.; LOVISA, J.; & SIVAKUGAN, N. "An Overview of Electrokinetic Consolidation of Soils". **Geotech Geol Eng**, v. 34, pp.759–776, 2016.

MATTSON, S. "Anionic and cationic adsorption by soil colloidal materials of varying SiO<sub>2</sub> /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio". In: **Trans. Intern. Congress Soil Sci.**, 1., Washington, v.2, pp. 199-211, 1927

MICIC, S.; SHANG, J.Q.; LO, K.Y.; LEE, Y.N.; LEE, S.W. "Electrokinetic strengthening of a marine sediment using intermittent current". **Can Geotech Journal**, v. 38(2), pp.287–302, 2001.

MILLER, S.; MURPHY, A.; VEAL, C.; YOUNG, M. "Electrodewatering of sewage sludge—pilot scale studies". **American Filtration & Separations Society**, Northport, 1999.

MIRANDA NETO, M.I. **Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002..

MITCHELL, J. K.; & SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MITCHELL, J.K. "Conduction phenomena: from theory to geotechnical practice". **Geotechnique**, v. 41(3), pp. 299–34, 1991.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals of soil behavior**. Wiley, New York, 1993.

MITCHELL, J.K. **Fundamentals os Soil Behaviouyr**, 1 ed., Nova York, John Wiley & Sons Inc, 1976.

MOHAMEDELHASSAN, E.; SHANG, J.Q. "Analysis of electrokinetic sedimentation of dredged Welland River sediment". *J Hazard Mater*, v. 85(1–2), pp. 91–109, 2001.

MONIZ, A. **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975.

MURAOKA, A.B.; LINARE`SJ, K.; VARRET, F. "Two-dimensional Ising-like model with specific edge effects for spin-crossover nanoparticles: a monte carlo study". **Phys Rev B84**, 2011.

OCHSNER, T. E.; & HORTON, R. RA. "New Perspective on Soil Thermal Properties Soil". **Sci Soc Am J**, v. 65, 2001.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**, London: Routledge, pp. 435, 1987.

OLIVEIRA, J.R.A. **Caracterização das Propriedades Termo-Hidráulicas de Materiais Artificiais para Reaterro de Cabos Elétricos de Potência**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

OLSEN, H.W. "Liquid Movement through kaolinite under hydraulic, electric, and osmotic gradients". **Am Assoc Pet Geol Bull**, v. 56(10), pp. 2022–2028, 1972.

OU, C.Y.; CHIEN, S.C.; CHANG, H.H. "Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: field tests". **Can Geotech Journal**, v.46(6), pp. 727, 2009.

PACHECO, A.O. **Aplicação do cone resistivo em solos saturados**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.

PAGE, M.; & PAGE, C. "Electroremediation of Contaminated Soils". **Journal of Environmental Engineering** , p. 208-19, 2002.

PAMUKCU, S.; WEEKS, A.; WITTLE, J.K. "Electrochemical extraction and stabilization of selected inorganic species in porous media". **Journal Hazard Mater**, v.55(1–3), pp. 305–318, 1997.

PERRIN, J. "Mecanisme de l'e1ectrisation de contact et solutions colloYdales". **J Chem Phys**, v. 2, pp. 601–651, 1904.

PESSOA, T. O.A. **Avaliação da Influência da Mineralogia, Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**. (Mestrado Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC. Rio de Janeiro, 2006.

PEVZNER, M.E. "Control of rock deformations in quarries [in Russian]". **Paper presented at the Nedra**, Moscow, 1978.

PEVZNER, M.E.; VALER'YANOVA, L.I.; BELEN'KII, P.G. "Electrochemical stabilization of soils during rock excavation". **Paper presented at the 8th all-union conference on soil stabilization and strengthening** [in Russian], Leningrad, 1971.

PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. São Paulo, pp. 247, 2000.

PUGH, R.S. "Some observations on the influence of recent climate change on the subsidence of shallow foundations". **Proc Inst Civil Eng Geotech Eng**, v.155(1), pp. 23–25, 2002.

QUINCKE, G. "Ueber die fortfuhrung materieller theilchen durch strmende electricitat". **Ann Phys**, v. 113, pp. 513–598, 1861.

RAIJ, B. V. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Revista Científica do Instituto Agrônômico de São Paulo** , pp. 32, 1971.

RAIJ, B. VAN. Propriedades eletroquímicas de solos. In: **Simpósio avançado de química e fertilidade do solo**. Piracicaba, pp. p.9-41,1986.

RAZALI, F. B. M. N.; OSMAN, A. B. S. S. B. "Non-quantitative correlation of soil resistivity with some soil parameters". **National Posgraduate Conference (NPC)**, Kuala Lumpur, pp. 1-4, 2011.

REDDY, K.R.; URBANEK, A.; KHODADOUST, A.P. "Electroosmotic dewatering of dredged sediments: bench-scale investigation". **Journal Environ Manage**, v. 78(2), pp. 200–208, 2006.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. R. **Bras. Ci. Solo**, 12:211-216, 1988.

RENO, W. E. "Thermal Conductivity of Kaolinite Clay as Function of Type of Exchange Ion, Density and Moisture Content". Highway Research Record, v.34, 1967.

REUSS, F.F. "Sur un nouvel effet de l'électricité galvanique" In: **Memoires de la societe imperiale des naturalists de Moscow**, v. 2, pp. 327–337, 1809.

REYNOLDS, J. M., **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics**. New York, John Wiley and Sons, 1997.

REZENDE, I. F. **Modelagem dos fluxos de água por gradiente térmico e por eletro-osmose associados aos eletrodos de aterramento**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

REZENDE, I. F.; GARCIA, J.F.S. Tópicos especiais em propriedades elétricas, térmicas e hidráulicas de solos. In: Relatório interno PEC/COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, jan. 2016.

RHOADES, J.D., INGVALSON, R.D. "Determining salinity in field soils with soil resistance measurement". **Soil Sci Soc Am Journal**, v. 35, pp. 54–60, 1971.

RICHARDS, L. A.; & FIREMAN, M. "Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils". In: **Soil Science**, v.5, pp. 395-404, 1943.

RITTIRONG, A.; SHANG, J.; MOHAMEDHASSAN, E.; ISMAIL, M.; RANDOLPH, M. "Effects of electrode configuration on electrokinetic stabilization for caisson anchors in calcareous sand". **Journal Geotech Geoenviron Eng**, v. 134(3), pp.352–365, 2008.

ROBERTSON, P. K., LUNNE, T., POWELL, J. J. M. "Geo-environmental Applications of Penetration Testing". Geotechnical Site Characterization. Robertson and Mayne (editors), Balkema, Rotterdam, pp. 35-47, 1998.

ROZAS, F.; CASTELLOTE, M. "Electrokinetic remediation of dredged sediments polluted with heavy metals with different enhancing electrolytes". **Electrochim Acta**, v. 86, pp.102–109, 2012.

SCHAAD, W. "Praktische Anwendung der Elektro-osmose im Gebiet des Grundbaues". **Bautechnik**, v.35, pp. 6–11, 1958.



SCHAAD, W., HAEFELI, R. "Electrokinetic phenomena and their application in soil mechanics". **Schweizerische Bauzeitung**, v. 65, pp. 216–217, 223–226, 235–238, 1947.

SCHINDLER, U. "Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit imteilgesättigten Boden an Stechzylinderproben". **Arch. Acker - Pflanzenbau Bodenkd**, v.24,pp.1 – 7, 1980.

SCHINDLER, U., DURNER, W., VON UNOLD, G., MÜLLER, L., WIELAND, R. "The evaporation method – Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup". **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.173 (4), pp. 563 – 572, 2010.

SCHINDLER, U., DURNER, W., VON UNOLD, G., MÜLLER, L.. "Evaporation Method for Measuring Unsaturated Hydraulic Properties of Soils: Extending the Measurement Range". **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, pp. 1071 – 1083, 2010.

SCHMIDT, C. A. **Aplicação da técnica eletrocinética em laboratório a dois tipos de solos argilosos**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

SEGALL, B.A.; BRUELL, C.J "Electroosmotic contaminant-removal processes". **Journal Environ Eng Asce**, v. 118(1): pp. 84–100, 1992.

SHANG, J.Q. "Electokinetic dewatering of clay slurries as engineered soil covers". **Can Geotech Journal**, v. 34(1), pp. 78–86,1998.

SHANG, J.Q. "Electrokinetic sedimentation: a theoretical and experimental study". **Can Geotech Journal**, v. 34(2): pp. 305–314, 1997.

SHANG, J.Q., Dunlap, W.A. "Improvement of soft clays by high-voltage electrokinetics". **Journal Geotech Eng ASCE**, v.122(4), pp. 274–280, 1996.

SHANG, J.Q., MOHAMEDHASSAN, E.; ISMAIL, M.A. "Electrochemical cementation of offshore calcareous soil". **Can Geotech Journal**, v. 41(5), pp. 877–893, 2004.

SILVA, E. F.; ASSIS JUNIOR, R. N.; & SOUZA, J. I. Efeito da qualidade da água de irrigação sobre atributos hídricos de um Neossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** , pp. 389-396, 2005.

SILVA, EVANIMEK BERNARDO SABINO. **Remediação eletrocinética de solo carbonífero poluído com petróleo**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Instituto de Química, Programa de Pós-graduação em Química., Natal, 2016.

SILVEIRA, A. **Estudo em Modelo Físico 2D de Biorremediação Eletrocinética de Solo Argiloso Contaminado com Óleo de Produção**. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

SPOSITO, G. **Surface reactions in natural aqueous colloidal systems**. *Chimia*, v.43, pp.169-176, 1989a.

TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. Cambridge, University Press, 1990.

TERZAGHI, K., PECK, R.B., MESRI, G. **Soil mechanics in engineering practice**, 3rd edn. Wiley, New York, 1996.

UEHARA, G. ; GILLMAN, G. **The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays**. Boulder: Westview, pp. 170, 1981.

UEHARA, G. **Mineralo-chemical properties of oxisols**. Malásia, Malásia: Proceedings Bangucoque: Soil Survey Division, 1978.

VAN GENUCHTEN, M.TH. "A closed-form equation for predicting the hydraulic

VARADACHARI, C.; CHATTOPADHYAY, T. **Complexation of humic substances with variable charge clays**. Boulder: Westview Press, pp. 170, 1981.

VELTEN, R. Z., LIMA, D. C., FONTES, M. P., & CARVALHO, C. A. "Electroosmosis in the remediation of tropical soils contaminated with cadmium: effect of the incubation time". **Soils and Rocks**. Brazilian Association for Soils Mechanics and Geotechnical Engineering (ABMS); Portuguese Geotechnical Society (SPG), 2012.

VILLAS, J. P. "Soil Heating Around the Ground Electrode of an HVDC System by Interaction of Electrical, Thermal, and Electroosmotic Phenomena". **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18 (3), pp. 874-881, 2003.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos**. 1 ed. São Paulo, Artiber, 2002.

WATABE, T., TSUCHIDA, T., TANAKA, M., ODA, Y., SAKAI, Y. "Geoenvironmental Cone Penetrometer with Efficient Ground Water Sampling". In **Proceedings of the 4th Conference on Environmental Geotechnics (4th ICEG)**, v. 1, pp 71-76, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

WEEMES, I.A. **Development of an Electrical Resistivity Cone for Groundwater Contamination Studies**. Master Thesis, Department of Civil Engineering the University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1990.

WU, W. **Theoretical model and numerical simulation of electro-osmotic consolidation on soft clay**. Tsinghua University, Beijing, 2009.

YAN, S.; SINGH, A.N.; FU, S.; LIAO, C.; WANG, S.; LI, Y.; HU, L. "A soil fauna index for assessing soil quality". **Soil Biol Biochem**, v. 47, pp. 158–165, 2012.

YANG, M.; CHOI, B.; PARK, H.; HONG, W.; LEE, S.; PARK, T. "Development of a glucose biosensor using advanced electrode modified by nanohybrid composing chemically modified graphene and ionic liquid". **Electroanalysis**, v. 22, pp. 1223–1228, 2010.

YONG, R.N.; WARKENTIN, B. P.; PHASUNGCHEWIT, Y. ET AL. "Buffer Capacity and Lead Retention in Some Clay Minerals", *Water, Air and Soil Pollution*, v.53, pp. 53-67, 1990.

YUAN, C.; WENG, C.H. "Sludge dewatering by electrokinetic technique: effect of processing time and potential gradient". *Adv Environ Res*, v. 7(3), pp. 727–732, 2003.

YUKAWA, H.; YOSHIDA, H.; KOBAYASHI, K.; HAKODA, M. "Fundamental study on electroosmotic dewatering of sludge at constant electric current". **Journal Chem Eng Jpn**, v. 9: pp. 402–407, 1976.

YUKSELEN-AKSOY Y, REDDY KR “Effect of soil composition on electrokinetically enhanced persulfate oxidation of polychlorobiphenyls”. **Electrochim Acta**, v.86, pp 164–169, 2010.

ZHINKIN GN, KALGANOV VF. **Electro-chemical treatment of clayey soils in the beds of structures**. Stroiizdat, Moscow, 1980.

ZHOU, Y. D. “Finite – Difference Model for One- Dimensional Electro-osmotic Consolidation”. **Computers and Geotechnics**, pp. 152- 165, 2013.

## **ANEXO I – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA AMOSTRA EM LABORATÓRIO**

Objetivo: Reconstituir em laboratório amostras homogeneizadas e menos rígidas a partir das amostras indeformadas coletadas com amostrador Denison em Triunfo, RO. Estas amostras reconstituídas servirão para a continuidade da pesquisa com eletrocinética visando a influência da mineralogia (expressa pelo PCZ) e da estrutura sobre o fenômeno da eletro-osmose e sobre os efeitos da eletrocinética sobre as propriedades geotécnicas em solo tropical.

### Processo de Fabricação:

Realizado em 2 etapas:(1) fabricação de material seco e caracterização física, mineralógica e físico-química; (2) preparação de amostras úmidas para moldagem dos corpos de prova dos ensaios eletrocinéticos e geotécnicos com diferentes líquidos (água deionizada, soluções reconstituídas em laboratório).

### ***Preparação do material seco e caracterização:***

1. Levantamento das amostras de Triunfo, RO, disponíveis no laboratório, ainda não usadas (dentro dos amostradores) e usadas no projeto de 2012 e na pesquisa da Carla Fabris (2016), porém sem aplicação de eletrocinética. ✓ (25/04)
2. Descrição das amostras com base nos perfis de sondagem correspondentes e agrupamento das amostras em conjuntos semelhantes de descrição táctil-visual. ✓ (25/04)
3. Foram obtidos em 25/04 três grupos de materiais, em caráter preliminar, sendo o grupo de *Material 1* o de maior número de amostras disponíveis, que foi selecionado. Uma tabela resumo com todas as amostras, designação, profundidades, descrição de sondagem, uso já realizado no projeto ou na dissertação de Fabris (2016) ou disponível, é apresentada em seguida. A ordem de apresentação das amostras na Tabela 1(a) segue o agrupamento realizado em 25/04. A inclusão na Tabela 1(b) das amostras usadas no projeto e na dissertação, algumas não mais disponíveis, visa facilitar a comparação e análise de resultados. ✓ (26/04)

**Tabela 1 - Tabela Resumo das Amostras de Triunfo, RO – Etapa 1**

(a) Etapa 1: Seleção preliminar com base nas descrições das sondagens

<b>Mistura 1</b>			
<b>Identificação</b>		<b>Profundidade</b>	<b>Descrição táctil-visual</b>
<b>Furo</b>	<b>Amostra</b>	<b>(m)</b>	
T02	AM 05	39,00 - 39,61	Argila siltosa com areia fina, marrom variegada
T02	AM06	39,61 - 40,22	
T02	AM07	43,00 - 43,61	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela
T02	AM08	43,61 - 44,22	
T03	AM03	40,00 - 40,61	Argila pouco siltosa com areia fina, marrom e amarela
T03	AM04	40,61 - 41,22	
<b>Mistura 2</b>			
<b>Identificação</b>		<b>Profundidade</b>	<b>Descrição táctil-visual</b>
<b>Furo</b>	<b>Amostra</b>	<b>(m)</b>	
T02	AM03	18,00 - 18,61	Silte argiloso com areia fina e pedregulhos finos e médios, marrom variegado
T03	AM02	15,61 - 16,22	Argila siltosa com areia fina e pedregulhos finos e médios, marrom variegado
T04	AM02	14,00 - 14,61	Silte argiloso com areia média e pedregulhos finos, roxo amarronzado e cinza
<b>Mistura 3</b>			
<b>Identificação</b>		<b>Profundidade</b>	<b>Descrição táctil-visual</b>
<b>Furo</b>	<b>Amostra</b>	<b>(m)</b>	
T01	AM01	5,80 - 6,41	Silte argiloso com areia fina, cinza
T01	AM02	6,41 - 7,02	
T02	AM01	6,00 - 6,61	Silte argiloso com areia fina cinza e marrom arroxeadado
T02	AM02	6,61 - 7,22	
<b>Outros ( Encontrados depois)</b>			
<b>Identificação</b>		<b>Profundidade</b>	<b>Descrição táctil-visual</b>
<b>Furo</b>	<b>Amostra</b>	<b>(m)</b>	
T04	AM01	12,00 - 12,61	Areia fina pouco siltosa, com pedregulho fino, cinza claro
T04	AM01	12,00 - 12,61	Areia fina pouco siltosa, com pedregulho fino, cinza claro
T03	AM05	50,00 - 50,61	Argila siltosa cinza claro e amarelo
T03	AM01	15,00 - 15,61	Argila siltosa, com areia fina, com pedregulho fino a médio, marrom variegado
T02	AM08	43,61 - 44,22	Argila pouco siltosa, com areia fina, marrom amarelado

(b) Amostras usadas no projeto e na pesquisa de Fabris (2016)

Amostras usadas no projeto (Barbosa et al, 2012)			
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual
Furo	Amostra	(m)	
T01	AM04	15,61 - 16,22	Silte argiloso, com areia fina, cinza e marrom
<b>T02</b>	<b>AM03</b>	18,00 - 18,61	Silte argiloso, com areia fina, com pedregulho fino a médio, marrom variegado
<b>T02</b>	<b>AM08</b>	43,61 - 44,22	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela
T03	AM01	15,00 - 15,61	Argila siltosa, com areia fina, com pedregulho fino a médio, marrom variegado
T03	AM05	50,00 - 50,61	<i>Argila siltosa, cinza claro e amarela</i>
T04	AM03	23,00 - 23,61	Areia média a grossa, pouca siltosa, com pedregulho fino, amarela e marrom
Amostras usadas na pesquisa de Fabris (2016)			
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual
Furo	Amostra	(m)	
T01	AM02	6,41 - 7,02	Silte argiloso com areia fina, cinza
T01	AM03	15,00 - 15,61	Silte argiloso com areia fina, cinza e marrom
<b>T02</b>	<b>AM01</b>	6,00 - 6,61	Silte argiloso com areia fina cinza e marrom arroxeadado
T02	AM04	18,61 - 19,22	Silte argiloso, com areia fina, com pedregulho fino a médio, marrom variegado
T04	AM02	14,00 - 14,61	Silte argiloso, com areia média, com pedregulho fino, roxo amarronzado e cinza

4. Foram abertos todos os amostradores para juntar as amostras similares após verificação visual. Também foram consultados os resultados do projeto e da dissertação de Fabris (2016) para separar as amostras que apresentaram resistividade elétrica muito alta ( $> 1.000\Omega m$ ). ✓ (04/05)

**Tabela 2 - Tabela Resumo das Amostras de Triunfo, RO – Etapa 2**

(a) Etapa 2: Composição da mistura após retirada dos amostradores e análise táctil-visual

5. Desestruturação e mistura manual das amostras selecionadas para secagem ao ar. Nessa etapa não era necessário fazer a homogeneização, apenas uma mistura superficial. As amostras não selecionadas foram identificadas e guardadas no Laboratório de Geotecnia Ambiental ou na câmara úmida. ✓ (09/05)

Mistura 1				
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual	Observações
Furo	Amostra	(m)		
T02	AM01	6,00 - 6,41	Silte argiloso com areia fina cinza e marrom arroxeadado	Fabris 2016
T02	AM05	39,00 - 39,61	Argila siltosa com areia fina, marrom variegada	-
T02	AM06	39,61 - 40,22	Argila siltosa com areia fina, marrom variegada	Parte Vermelha
T02	AM07	43,00 - 43,61	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela	Parte Vermelha
T02	AM08	43,61 - 44,22	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela	Projeto 2012
T03	AM01	15,00 - 15,61	Argila siltosa, com areia fina, com pedregulho fino a médio, marrom variegado	Fabris
T03	AM02	15,61 - 16,22	Argila siltosa com areia fina e pedregulhos finos e médios, marrom variegado	-
T03	AM03	40,00 - 40,61	Argila pouco siltosa com areia fina, marrom e amarela	-
T03	AM04	40,61 - 41,22	Argila pouco siltosa com areia fina, marrom e amarela	-
T04	AM01	12,00 - 12,61	Silte argiloso, c/ areia média, c/ pedregulho fino, roxo amarronzado e cinza	Transição

Mistura 2 (Areia)				
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual	Observações
Furo	Amostra	(m)		
T02	AM02	6,61 - 7,22	Silte argiloso com areia fina cinza e marrom arroxeadado	-
T03	AM05	50,00 - 50,61	Argila siltosa cinza claro e amarelo	Projeto 2012

Mistura 3 (Marrom)				
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual	Observações
Furo	Amostra	(m)		
T01	AM01	5,80 - 6,41	Silte argiloso com areia fina, cinza	-
T04	AM01	12,00 - 12,61	Areia fina pouco siltosa, com pedregulho fino, cinza claro	Projeto 2012

Mistura 4 (Cinza)				
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual	Observações
Furo	Amostra	(m)		
T02	AM06	39,61 - 40,22	Argila siltosa com areia fina, marrom variegada	Parte Cinza
T02	AM07	43,00 - 43,61	Argila pouco siltosa com areia fina marrom e amarela	Parte Cinza

Mistura 5 (Alta Resistividade)				
Identificação		Profundidade	Descrição táctil-visual	Observações
Furo	Amostra	(m)		
T01	AM02	6,41 - 7,02	Silte argiloso com areia fina, cinza	Projeto/Fabris
T02	AM03	18,00 - 18,61	Silte argiloso com areia fina e pedregulhos finos e médios, marrom variegado	Projeto 2012



- Foram preparadas quatro bandejas para secagem em estufa a 40°C (por 48 horas), por ser um processo mais rápido e menos sujeito a contaminação por poeira externa. Após a secagem, as amostras foram misturadas e homogeneizadas manualmente, retirando as pedras e pedregulhos (não os agregados) e outras impurezas. ✓ (11/05)



**Figura 1** - Bandejas preparadas para secagem



**Figura 2** - Secagem em estufa a 40°C

- Da amostra assim preparada, foi feita a separação da fração mais grossa com a peneira ASTM #30, primeiramente. Como o material passante na peneira ASTM #30 era muito fino e não possuía agregados, optou-se por utilizar a peneira ASTM #10 para separação da fração grossa, assim todo material retido na peneira #30 foi destorroado manualmente e repassado na peneira #10, e após, homogeneizado em um saco junto com o material previamente peneirado. O material retido na peneira #10 foi guardado para eventual análise posterior. ✓ (13/05)



**Figura 3** - Amostra após separação da fração mais grossa na peneira ASTM #10

- Foi separada uma parte para caracterização física (granulometria, densidade dos grãos e limites de Atterberg) e uma parte para análise mineralógica (DRX, PCZ) e físico-química (teor de matéria orgânica, capacidade tampão, capacidade de troca catiônica CTC).

- A amostra homogeneizada foi quarteada e separado cerca de 750g para caracterização física.



**Figura 4** - Quarteamento da amostra

- Foram separadas porções de cerca de 100g para DRX, 30g para TMO e cerca de 1kg para as demais análises físico-químicas.
- Além da amostra da mistura, foram também separadas porções de outros três materiais para DRX e TMO (agregados vermelhos, material cinza claro e material amarelado). ✓ (16/05)



**Figura 5-** Material separado para DRX e TMO



**Figura 6** - Amostra para TMO após passagem na peneira # ASTM 80



**Figura 7** - Material DRX após lavagem, secagem em estufa de 40°C e destorroamento.

9. Caracterização física iniciada em 16/05.

10. O resultado da caracterização física não foi satisfatório. Optou-se por repetir todos os ensaios a fim de comparar esses resultados. Nova caracterização física iniciada em 25/05.
11. Após caracterização física, foi preparada uma amostra com teor de umidade igual a 1,5 LL com água destilada para realizar um ensaio de adensamento. (procedimento iniciado no laboratório da Geomecânica em 23/05).
12. Levantamento da massa de material seco ao ar disponível para os ensaios após estes procedimentos, para permitir definir o número de ensaios eletrocinéticos, geotécnicos, de curva de retenção de água e térmicos.

***Preparação das amostras úmidas para moldagem:***

1. Definidas as soluções a serem usadas na pesquisa, preparar dois conjuntos de amostras, um com cada solução, também com umidade de 1,5 LL, misturar, homogeneizar e guardar na câmara úmida. As amostras assim reconstituídas permanecem por pelo menos 3 dias na câmara úmida para equilibrar físico-quimicamente antes do uso em ensaios.
2. Os corpos de prova foram moldados por adensamento no pendural existente no Laboratório de Geotecnia, para a tensão vertical definida pela curva de adensamento para alcançar um índice de vazios similar (não necessariamente igual) ao de campo.

## ANEXO II – LEITURA DO PH E CÁLCULOS PARA O PONTO DE CARGA ZERO

Amostra	Solução	HCl (mL)	NaOH (mL)	pH	POH	H+	OH-	pH branco	POH branco	H+	OH-	Mol/L (H+)	Mol/L (OH-)	Mol/L branco (H+)	Mol/L branco (OH-)	Mol/L (H+)	Mol/L (OH-)
1	0,2 mol. L NaCl	0,25		5,56		-5,56		2,99		-2,99		0,00000	1,00000	0,00102	1,00000	-0,00102	0,00000
2	0,2 mol. L NaCl	0,5		5,05		-5,05		2,67		-2,67		0,00001	1,00000	0,00214	1,00000	-0,00213	0,00000
3	0,2 mol. L NaCl	1		4,39		-4,39		2,44		-2,44		0,00004	1,00000	0,00363	1,00000	-0,00359	0,00000
4	0,2 mol. L NaCl	1,5		3,87		-3,87		2,27		-2,27		0,00013	1,00000	0,00537	1,00000	-0,00524	0,00000
5	0,2 mol. L NaCl	2		3,55		-3,55		2,14		-2,14		0,00028	1,00000	0,00724	1,00000	-0,00696	0,00000
6	0,2 mol. L NaCl	2,5		3,27		-3,27		2,08		-2,08		0,00054	1,00000	0,00832	1,00000	-0,00778	0,00000
7	0,2 mol. L NaCl	3		2,81		-2,81		2,02		-2,02		0,00155	1,00000	0,00955	1,00000	-0,00800	0,00000
8	0,2 mol. L NaCl	0	0	5,63		-5,63		4,96		-4,96		0,00000	1,00000	0,00001	1,00000	-0,00001	0,00000
9	0,2 mol. L NaCl		0,25	5,9	8,1		-8,1	11,1	2,9		-2,9	1,00000	0,00000	1,00000	0,00126	0,00000	-0,00126
10	0,2 mol. L NaCl		0,5	6,29	7,71		-7,71	11,6	2,4		-2,4	1,00000	0,00000	1,00000	0,00398	0,00000	-0,00398
11	0,2 mol. L NaCl		1	6,78	7,22		-7,22	11,99	2,01		-2,01	1,00000	0,00000	1,00000	0,00977	0,00000	-0,00977
12	0,2 mol. L NaCl		1,5	7,29	6,71		-6,71	12,21	1,79		-1,79	1,00000	0,00000	1,00000	0,01622	0,00000	-0,01622
13	0,2 mol. L NaCl		2	10	4		-4	12,36	1,64		-1,64	1,00000	0,00010	1,00000	0,02291	0,00000	-0,02281
14	0,2 mol. L NaCl		2,5	10,4	3,6		-3,6	12,54	1,46		-1,46	1,00000	0,00025	1,00000	0,03467	0,00000	-0,03442
15	0,2 mol. L NaCl		3	11,49	2,51		-2,51	12,6	1,4		-1,4	1,00000	0,00309	1,00000	0,03981	0,00000	-0,03672
16	0,02 mol. L NaCl	0,25		5,26		-5,26		2,86		-2,86		0,00001	1,00000	0,00138	1,00000	-0,00137	0,00000
17	0,02 mol. L NaCl	0,5		5,02		-5,02		2,61		-2,61		0,00001	1,00000	0,00245	1,00000	-0,00245	0,00000
18	0,02 mol. L NaCl	1		3,99		-3,99		2,41		-2,41		0,00010	1,00000	0,00389	1,00000	-0,00379	0,00000
19	0,02 mol. L NaCl	1,5		3,62		-3,62		2,31		-2,31		0,00024	1,00000	0,00490	1,00000	-0,00466	0,00000
20	0,02 mol. L NaCl	2		3,27		-3,27		2,19		-2,19		0,00054	1,00000	0,00646	1,00000	-0,00592	0,00000
21	0,02 mol. L NaCl	2,5		3,06		-3,06		2,12		-2,12		0,00087	1,00000	0,00759	1,00000	-0,00671	0,00000

Amostra	Solução	HCl (mL)	NaOH (mL)	pH	POH	H+	OH-	pH branco	POH branco	H+	OH-	Mol/L (H+)	Mol/L (OH-)	Mol/L branco (H+)	Mol/L branco (OH-)	Mol/L (H+)	Mol/L (OH-)
22	0,02 mol. L NaCl	3		2,64		-2,64		2,07		-2,07		0,00229	1,00000	0,00851	1,00000	-0,00622	0,00000
23	0,02 mol. L NaCl	0		5,49		-5,49		5,03		-5,03		0,00000	1,00000	0,00001	1,00000	-0,00001	0,00000
24	0,02 mol. L NaCl		0,25	5,6	8,4		-8,4	10,76	3,24		-3,24	1,00000	0,00000	1,00000	0,00058	0,00000	-0,00058
25	0,02 mol. L NaCl		0,5	5,86	8,14		-8,14	11,13	2,87		-2,87	1,00000	0,00000	1,00000	0,00135	0,00000	-0,00135
26	0,02 mol. L NaCl		1	6,39	7,61		-7,61	11,56	2,44		-2,44	1,00000	0,00000	1,00000	0,00363	0,00000	-0,00363
27	0,02 mol. L NaCl		1,5	7,51	6,49		-6,49	11,84	2,16		-2,16	1,00000	0,00000	1,00000	0,00692	0,00000	-0,00692
28	0,02 mol. L NaCl		2	10,05	3,95		-3,95	12,01	1,99		-1,99	1,00000	0,00011	1,00000	0,01023	0,00000	-0,01012
29	0,02 mol. L NaCl		2,5	10,84	3,16		-3,16	12,13	1,87		-1,87	1,00000	0,00069	1,00000	0,01349	0,00000	-0,01280
30	0,02 mol. L NaCl		3	11,08	2,92		-2,92	12,3	1,7		-1,7	1,00000	0,00120	1,00000	0,01995	0,00000	-0,01875
31	0,002 mol. L NaCl	0,25		5,16		-5,16		2,9		-2,9		0,00001	1,00000	0,00126	1,00000	-0,00125	0,00000
32	0,002 mol. L NaCl	0,5		4,79		-4,79		2,67		-2,67		0,00002	1,00000	0,00214	1,00000	-0,00212	0,00000
33	0,002 mol. L NaCl	1		3,97		-3,97		2,45		-2,45		0,00011	1,00000	0,00355	1,00000	-0,00344	0,00000
34	0,002 mol. L NaCl	1,5		3,59		-3,59		2,33		-2,33		0,00026	1,00000	0,00468	1,00000	-0,00442	0,00000
35	0,002 mol. L NaCl	2		3,3		-3,3		2,23		-2,23		0,00050	1,00000	0,00589	1,00000	-0,00539	0,00000
36	0,002 mol. L NaCl	2,5		2,94		-2,94		2,17		-2,17		0,00115	1,00000	0,00676	1,00000	-0,00561	0,00000
37	0,002 mol. L NaCl	3		2,68		-2,68		2,12		-2,12		0,00209	1,00000	0,00759	1,00000	-0,00550	0,00000
38	0,002 mol. L NaCl	0		5,53		-5,53		5,04		-5,04		0,00000	1,00000	0,00001	1,00000	-0,00001	0,00000
39	0,002 mol. L NaCl		0,25	5,71	8,29		-8,29	10,42	3,58		-3,58	1,00000	0,00000	1,00000	0,00026	0,00000	-0,00026
40	0,002 mol. L NaCl		0,5	5,99	8,01		-8,01	10,85	3,15		-3,15	1,00000	0,00000	1,00000	0,00071	0,00000	-0,00071
41	0,002 mol. L NaCl		1	6,31	7,69		-7,69	11,36	2,64		-2,64	1,00000	0,00000	1,00000	0,00229	0,00000	-0,00229
42	0,002 mol. L NaCl		1,5	8,4	5,6		-5,6	11,7	2,3		-2,3	1,00000	0,00000	1,00000	0,00501	0,00000	-0,00501
43	0,002 mol. L NaCl		2	9,97	4,03		-4,03	11,97	2,03		-2,03	1,00000	0,00009	1,00000	0,00933	0,00000	-0,00924
44	0,002 mol. L NaCl		2,5	10,5	3,5		-3,5	12,19	1,81		-1,81	1,00000	0,00032	1,00000	0,01549	0,00000	-0,01517
45	0,002 mol. L NaCl		3	10,86	3,14		-3,14	12,42	1,58		-1,58	1,00000	0,00072	1,00000	0,02630	0,00000	-0,02558