

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

USO DA TÉCNICA DE ELETROKINÉTICA PARA ESTABILIZAÇÃO DE  
UM SOLO ARENOSO

Anderson Fonini

Porto Alegre  
2008

# **Livros Grátis**

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

Milhares de livros grátis para download.

Anderson Fonini

**USO DA TÉCNICA DE ELETROCINÉTICA PARA  
ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA. ORIENTAÇÃO: PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup>. KARLA SALVAGNI HEINECK E PROF. PH.D. NILO CESAR CONSOLI

Porto Alegre  
2008

F674u Fonini, Anderson  
Uso da técnica de eletrocinética para estabilização de um solo arenoso /  
Anderson Fonini. – 2008.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Es-  
cola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto  
Alegre, BR-RS, 2008.

Orientação: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Karla Salvagni Heineck  
Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli

1. Eletrocinética. 2. Solo – Estabilização. 3. Solo reforçado – Ensaios. I.  
Heineck, Karla Salvagni, orient. II. Consoli, Nilo Cesar, orient. III. Título.

CDU-624.138(043)

**ANDERSON FONINI**

**USO DA TÉCNICA DE ELETROCINÉTICA PARA  
ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO ARENOSO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Meio Ambiente, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2008

---

**Karla Salvagni Heineck**

Dr.<sup>a</sup>. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Orientadora**

---

**Nilo Cesar Consoli**

Ph.D. pela Concordia University

**Orientador**

---

**Fernando Schnaid**

Ph.D. pela University of Oxford

**Coordenador do PPGEC**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Professor Antônio Thomé**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Professor Pedro Domingos Marques Prietto**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Professor Samir Maghous**

Ph.D. Université de Marne La Vallée, FR

Dedico este trabalho com muito amor ao meu pai Olmir, a  
memória de minha mãe e ainda para minha irmã.  
Vocês sempre serão muito especiais.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Nilo Cesar Consoli e a Professora Karla Heineck pela orientação, atenção e confiança depositada sobre a minha pessoa durante a elaboração deste trabalho;

Ao amigo Fernando Maria Mántaras pela disposição, ajuda e paciência durante a concepção do projeto do mini-cone;

Ao Professor Juan Carlos Ortiz, pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, pela ajuda concedida durante a concepção do equipamento de cravação do mini-cone;

Ao Professor Reinaldo Gonçalves, pertencente ao Departamento de Engenharia Química da UFRGS, pelo auxílio na interpretação dos resultados da pesquisa;

Ao Professor Antônio Thomé pelo incentivo para a realização do mestrado;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, seus professores, sua coordenação e quadro de funcionários, pela oportunidade, dedicação e aprimoramento científico e educacional.

A empresa Drenamac, representante dos geossintéticos Bidim, pela doação do material necessário para execução da pesquisa;

As unidades financiadoras de minha bolsa de mestrado, CAPES E CNPq, que proporcionaram a realização desse objetivo de vida;

Aos ex-colegas, mas grandes amigos da UPF (Andreas Andrade [Jacaré], José Rojas [Geladera], Luizmar Lopes Júnior [Lui], Marcelo Hansen [Gordo], Francisco Dalla Rosa [Chico] pelos momentos de descontração e troca de idéias relevantes a decisões a serem tomadas;

Aos colegas de mestrado das subáreas de geotecnia e meio ambiente pelos momentos de estudo e descontração vividos em conjunto;

A toda “família” LEGG/ENVIRONGEO composta por vários doutorandos, mestrando e bolsistas. Agradecimento em especial aos colegas Lucas Festugato e Francisco Dalla Rosa e

ao laboratorista João Nelson Diniz pela disponibilidade sempre apresentada na busca de soluções para problemas. Não poderia esquecer de agradecer ao nosso meio de locomoção, “A venenosa”, pilotada pelo João que nos locomovia de forma elegante;

Ao colega de apartamento Marcelo Hansen pelo companheirismo, momentos de descontração e discussão;

Aos amigos Mateus [Bregue], Fabiano [Bortolo] e Stevan [Tevo], os quais mesmo que de forma distante, sempre me apoiaram e esperavam o meu retorno a Passo Fundo para fazermos grandiosos churrascos;

Aos amigos expectadores dos jogos do meu time do coração, GRÊMIO, que tinham que escutar meus vários xingamentos, mas que me proporcionavam no dia seguinte uma sensação de alívio;

A três pessoas insubstituíveis em minha vida, meu sempre querido amigo e acima de tudo pai Olmir, minha estimada mãe, apesar de não estar mais entre nós, Theolides e a minha querida irmã Andréia;

A toda a minha família que sempre se mostrou interessada nos meus afazeres do mestrado, em especial ao meu avô, minha avó e minhas tias;

Finalizando, gostaria de agradecer o apoio de todas as pessoas que de alguma forma passaram em minha vida e me proporcionaram bons momentos.



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS .....	12
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	13
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 ASPECTOS GERAIS .....	21
2.2 SOLOS GRANULARES .....	22
2.3 MELHORAMENTO DE SOLOS .....	24
2.4 A TÉCNICA DE ELETROKINÉTICA .....	27
2.4.1 Fenômenos eletrocinéticos .....	28
2.4.2 Eletrodos .....	35
2.4.3 Possíveis empregos da técnica de eletrocinética .....	38
2.4.4 Injeções eletroquímicas .....	41
2.5 <i>CONE PENETRATION TEST (CPT)</i> .....	43
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>46</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	46
3.2 MATERIAIS .....	46
3.2.1 Nobreak .....	46
3.2.2 Fonte de alimentação .....	47
3.2.3 Multímetro .....	47
3.2.4 Caixas acrílicas .....	48
3.2.5 Reforços metálicos para as caixas acrílicas .....	48

3.2.6	Tubos de PVC e geotêxtil.....	49
3.2.7	Cabos elétricos.....	50
3.2.8	Eletrodos.....	50
3.2.9	Solo.....	51
3.2.10	Cloreto de cálcio.....	53
3.2.11	Silicato de sódio puro.....	53
3.2.12	Bicarbonato de sódio.....	54
3.2.13	Água carbonatada.....	54
3.2.14	Água destilada.....	54
3.2.15	<i>Miniature Cone Penetration Test</i> (MCPT).....	54
3.3	MÉTODOS.....	59
3.3.1	Montagem da célula eletrocinética.....	59
3.3.2	Execução dos ensaios.....	60
3.3.3	Programa de realização das células eletrocinéticas.....	63
3.3.4	Ensaio preliminares.....	70
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>73</b>
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES.....	73
4.1.1	Ensaio iniciais.....	73
4.1.2	Calibrações e primeiro ensaio do MCPT.....	76
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES PRINCIPAIS.....	78
4.2.1	Monitoramento da tensão.....	78
4.2.2	Eletrodos.....	81
4.2.3	Ensaio de prospecção.....	83
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>110</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	110
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
	APÊNDICES.....	118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Fenômenos eletrocinéticos. (Adaptado de Harbottle, 2003).....	29
Figura 2.2: Eletrosmose e eletromigração. ....	32
Figura 3.1: Dispositivo para medida de tensões. ....	47
Figura 3.2: Caixa acrílica com os reforços metálicos.....	48
Figura 3.3: Tudo de PVC - (A) vista dos furos na parede do tubo e (B) vista do encaixe do eletrodo. ....	49
Figura 3.4: Drenos - (A) cobertura do tubo pelo geotêxtil e (B) dreno pronto. ....	49
Figura 3.5: Eletrodos de titânio - (A) eletrodo e (B) eletrodo posicionado no interior dos drenos. ....	50
Figura 3.6: Eletrodos de aço carbono - (A) eletrodo e (B) eletrodo posicionado no interior dos drenos. ....	51
Figura 3.7: Curva granulométrica da areia de Osório. ....	52
Figura 3.8: <i>Miniature Cone Penetration Test</i> .....	55
Figura 3.9: Cortes da ponteira do MCPT. ....	56
Figura 3.10: Ponteira do MCPT. ....	56
Figura 3.11: MCPT e sistema de cravação. ....	58
Figura 3.12: Ilustração de uma célula eletrocinética. ....	60
Figura 3.13: Preparação do corpo de prova de uma célula eletrocinética. ....	62
Figura 3.14: Locais dos ensaios de prospecção anteriores à aplicação da técnica de eletrocinética.....	62
Figura 3.15: Locais dos ensaios de prospecção posteriores à aplicação da técnica de eletrocinética.....	63
Figura 3.16: Locais dos ensaios de prospecção da C_E_02.....	66
Figura 3.17: Locais dos ensaios de prospecção da C_E_04.....	67
Figura 3.18: Locais dos ensaios de prospecção da C_E_05.....	68
Figura 3.19: Locais dos ensaios de prospecção da C_E_06.....	68
Figura 3.20: Vista da célula durante o primeiro ensaio realizado. ....	70

Figura 3.21: Calibração do cone - (A) leitura zero e (B) demais leituras.....	72
Figura 4.1: Eletrodos do primeiro ensaio - (A) catodo e (B) anodo.....	73
Figura 4.2: Eletrodos do segundo ensaio - (A) catodo e (B) anodo. ....	74
Figura 4.3: Variação de tensão durante o primeiro ensaio. ....	75
Figura 4.4: Variação de tensão durante o segundo ensaio.....	75
Figura 4.5: Curva de calibração do MCPT.....	76
Figura 4.6: Nova curva de calibração do MCPT.....	77
Figura 4.7: Perfil para teste do MCPT.....	77
Figura 4.8: Monitoramento da tensão durante a C_E_02.....	78
Figura 4.9: Monitoramento da tensão durante a C_E_07.....	79
Figura 4.10: Monitoramento da tensão durante a C_E_07.....	80
Figura 4.11: Aparência dos eletrodos de titânio corroídos em comparação a um eletrodo novo. ....	81
Figura 4.12: Aparência dos eletrodos de aço carbono corroídos em comparação a um eletrodo novo. ....	82
Figura 4.13: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 01 (C_E_01).....	84
Figura 4.14: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 02 (C_E_02).....	85
Figura 4.15: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 03 (C_E_03).....	86
Figura 4.16: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 04 (C_E_04).....	87
Figura 4.17: Cimentação provocada pelo CaCO <sub>3</sub> .....	89
Figura 4.18: Ensaios de prospecção comparados. ....	89
Figura 4.19: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 04 (C_E_04).....	90
Figura 4.20: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 05 (C_E_05).....	92
Figura 4.21: Cimentação ocorrida na C_E_05 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	93
Figura 4.22: Cimentação ocorrida na C_E_06 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	94
Figura 4.23: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 06 (C_E_06).....	95
Figura 4.24: Cimentação ocorrida na C_E_07 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	96
Figura 4.25 Cimentação ocorrida na C_E_08 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	96

Figura 4.26: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 07 (C_E_07).....	97
Figura 4.27: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 08 (C_E_08).....	98
Figura 4.28: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 09 (C_E_09).....	100
Figura 4.29: Cimentação ocorrida na C_E_09 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	101
Figura 4.31: Cimentação ocorrida na C_E_10 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	101
Figura 4.30: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 10 (C_E_10).....	102
Figura 4.33: Cimentação ocorrida na C_E_11 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	103
Figura 4.32: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 11 (C_E_11).....	104
Figura 4.34: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 12 (C_E_12).....	105
Figura 4.35: Cimentação ocorrida na C_E_12 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	106
Figura 4.36: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 13 (C_E_13).....	107
Figura 4.37: Cimentação ocorrida na C_E_13 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior. ....	108
Figura 4.38: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 14 (C_E_14).....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Índices físicos da areia de Osório. (adaptado de Casagrande, 2005). .....	52
Tabela 3.2: Características do $\text{CaCl}_2$ . .....	53
Tabela 3.3: Características do $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . .....	53
Tabela 3.4: Resumo das variáveis de cada célula. ....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

$A$	Ampers
$a$	Área da seção transversal perpendicular a direção do fluxo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
$B$	Diâmetro do cone
$C_E$	Célula eletrocinética
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
$C_i$	Concentração
CIMCPT	<i>Continuous-intrusion miniature cone penetration test</i>
CNU	Coefficiente de não uniformidade
CPT	<i>Cone penetration test</i>
CPTU	Piezocone
CSH	Silicato hidratado de cálcio
$d$	Carga da partícula
$D$	Constante dielétrica do líquido
$E$	Campo elétrico
$F$	Número de Faraday
$F_e$	Força eletromotriz
$f_s$	Resistência de atrito lateral
HP	<i>Horse Power</i>
$I$	Corrente elétrica aplicada
$I_e$	Tensão aplicada
$J_{ems}$	Fluxo de massa pela eletromigração
$K_e$	Coefficiente de condutividade eletrosmótica
$M$	Massa do produto formado

MCPT	<i>Miniature cone penetration test</i>
$Mm$	Massa molar do elemento
$n$	Porosidade
$N_i^*$	Mobilidade iônica efetiva do solo
pH	Potencial hidrogeniônico
$pp$	Profundidade de prospecção
$Q$	Vazão do fluxo eletrosmótico
$q$	Espessura da zona de influência da carga da partícula
$q_c$	Resistência de ponta
RPM	Rotações por minuto
$t$	Tempo decorrido
$u$	Poro-pressão
$V$	Voltz
$Z$	Potencial Zeta
$z$	Valência
$\varepsilon$	Permicividade relativa da água nos poros
$\varepsilon_0$	Permicividade no vácuo
$\eta$	Viscosidade da água nos poros
$\sigma_1$	Tensão principal máxima
$\sigma_v$	Tensão efetiva
$\phi$	Potencial elétrico aplicado



## RESUMO

FONINI, A. **Uso da técnica de eletrocinética para estabilização de um solo arenoso.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A tentativa de modificar algumas propriedades dos solos é antiga. Alguns autores fazem considerações a tentativas ocorridas a três mil anos atrás. Com o crescimento populacional e o desenvolvimento de novos sistemas de produção ocorridos após a Revolução Industrial no século XVIII, houve uma intensa ocupação territorial exigindo obras de infra-estrutura e obras complementares, tornando cada vez mais comum o melhoramento de solos. Uma técnica *in situ* passível de aplicação para melhorar as propriedades mecânicas dos solos é a técnica de eletrocinética associada à injeção de soluções químicas. Esta é caracterizada pela aplicação de um baixo gradiente elétrico através de eletrodos num meio poroso inundado com soluções químicas. Nesta pesquisa, foram realizados ensaios associando as soluções de cloreto de cálcio com água carbonatada, cloreto de cálcio com bicarbonato de sódio além de cloreto de cálcio com silicato de sódio. Para verificação da ocorrência da cimentação entre as partículas de areia, após a saturação do corpo de prova com as devidas soluções, mas anterior à aplicação da diferença de potencial elétrico ao solo, foram realizados três ensaios de prospecção com um *Miniature Cone*, desenvolvido nesta pesquisa. Esses foram comparados a outros três ensaios que foram realizados após o período de aplicação da técnica. Todas as associações resultaram em regiões cimentadas não homogêneas, sendo que os melhores resultados foram obtidos com a associação das soluções de cloreto de cálcio e silicato de sódio. A aplicação da técnica de eletrocinética associada a injeções de soluções químicas mostrou se complexa e difícil de prever devido ao número de variáveis que podem modificar o seu resultado final.

### Palavras-chave:

Palavras-chave: eletrocinética; MCPT; água carbonatada; cloreto de cálcio; silicato de sódio

## **ABSTRAC**

FONINI, A. **Uso da técnica de eletrocinética para estabilização de um solo arenoso.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The attempt to change some soil properties of the soil is not new. Some authors describes attempts occurred three thousand years ago. With population growth and the new production systems development that occurred after the Industrial Revolution in the eighteenth century, there was an intense territorial occupation requiring infrastructure works and complementary works, becoming the soils improvement usual. One of the in situ soil improvement techniques is the eletrokinetics associated with injection of chemical solutions. This technique is characterized by the application of a low electrical gradient through electrodes in a porous media flooded with chemical solutions. In this study, tests were carried out associating the solutions of calcium chloride with soda water, calcium chloride with sodium bicarbonate, and calcium chloride with sodium silicate. To verify the occurrence of the cementation among the sand particles, after the samples flooded with the appropriate solutions, but prior to the application of electric potential difference in the soil, three exploration tests were performed with a Miniature Cone, developed in this study. These tests were compared to other three tests that were carried out after the application of the technique. All associations resulted in not homogeneous cemented regions, and the best results were obtained with the combination of the solutions of calcium chloride and sodium silicate. The application of the eletrokinetics technique associated with injections of chemical solutions is proved to be complex and difficult to be predicted due to the number of variables that can change its final result.

### **keywords:**

keywords: eletrokinetics; MCPT; soda water; calcium chloride; sodium silicate

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O solo natural constitui simultaneamente um material complexo e variável de acordo com a sua localização. Contudo, devido à sua universalidade e baixo custo, apresenta normalmente uma grande utilidade enquanto material de engenharia. Não é comum que o solo de um determinado local cumpra, total ou parcialmente, os requisitos necessários. Terá então de ser tomada uma decisão relativa à solução mais indicada para cada caso, e que irá geralmente contemplar uma das seguintes hipóteses: (i) aceitar o material original e ajustar o projeto às restrições por ele impostas; (ii) remover o material do seu local original e substituí-lo por material de qualidade superior ou (iii) alterar as propriedades do solo existente de forma a criar um material capaz de responder às necessidades da tarefa prevista. (CRISTELO, 2001).

A tentativa de modificar algumas propriedades dos solos é bastante antiga. Alguns autores fazem considerações a tentativas ocorridas a cerca de três mil anos atrás. Com o crescimento populacional e o desenvolvimento de novos sistemas de produção ocorridos após a Revolução Industrial no século XVIII, houve uma grande ocupação territorial exigindo obras de infra-estrutura e obras complementares, tornando cada vez mais comum o reforço de solos.

Existem várias técnicas que podem ser empregadas na tentativa de reforçar os solos. A mais comum é a compactação, a qual é definida como uma técnica que visa o aumento da densidade do solo de forma mecânica. Dependendo do tipo de solo (coesivo, granular e/ou orgânico), métodos diferenciados são utilizados para a compactação. Outra técnica utilizada, que pode apresentar uma eficiência superior a anterior citada, é a estabilização físico-química. Tal pode ser realizada adicionando várias substâncias ao solo como a cal e o cimento ou ainda

soluções químicas como soluções de cloreto de cálcio, de amônio, de potássio, de silicato de sódio, entre outras.

Em relação aos custos necessários para aplicação, a compactação destaca-se entre as técnicas citadas por ser relativamente econômica. Todavia, aplicada isoladamente, não atende às necessidades em qualquer situação. Pode ser necessária, como ocorre frequentemente, sua combinação com outra substância aglomerante.

Quando se adiciona ao solo soluções químicas procurando obter melhorias de suas propriedades, dependendo do tipo de solo e a necessidade de rapidez de resultados, é conveniente a submissão do sítio em questão a alguma técnica complementar que permita um rápido deslocamento das soluções independentemente do tipo de solo. Nesse sentido, a técnica de eletrocinética é aquela que atende a todos esses requisitos.

A técnica de eletrocinética é caracterizada pela aplicação *in situ* de um baixo gradiente elétrico através de eletrodos sobre uma massa de solo. Esses podem ser constituídos de vários materiais, embora, alguns deles sejam mais propícios à ocorrência de reações químicas. Um gradiente elétrico, quando aplicado no solo, provoca três fenômenos básicos: (i) a movimentação dos íons metálicos em direção a um eletrodo, (ii) o deslocamento de partículas carregadas e (iii) a movimentação da água contida nos poros do solo em direção ao catodo. Os itens (i) e (ii) têm o sentido do deslocamento influenciado pelas cargas dos íons e das partículas, respectivamente.

Combinações entre íons provenientes das soluções químicas e submetidos a uma corrente elétrica podem promover a formação de substâncias aglomerantes que ligarão as partículas do solo proporcionando um ganho de resistência ao mesmo. No entanto, ensaios específicos devem ser realizados para diagnosticar quais as condições mais próximas das ideais devem ser aplicadas almejando-se um melhor resultado.

Para determinar os ganhos de resistência do solo propiciado pela técnica, poder-se-á utilizar um *Cone Penetration Test* (CPT). De acordo com Ferreira & Machado (2003), esse equipamento foi desenvolvido na Holanda por volta do ano de 1940 e pode ser definido como um ensaio geotécnico de campo realizado com um equipamento de cravação operado hidráulicamente, que permite a cravação de hastes de 1 m de comprimento, marcadas de 20 em 20 cm, nas quais está acoplada uma ponteira mecânica cone-atrito que possibilita a leitura independente da resistência à penetração da ponta cônica denominada de resistência de ponta

( $q_c$ ); e a resistência à penetração total denominada de resistência de cone-atrito, da qual por subtração se obtém a resistência da luva cilíndrica de atrito, denominada de resistência de atrito lateral ( $f_s$ ).

Além do CPT convencional, ou seja, com área de ponta de  $10 \text{ cm}^2$ , existem mini-cones, com áreas em torno de  $2 \text{ cm}^2$ , que podem ser usados com diversos fins dentre os quais podem ser citados simulações em centrífugas, estudos de expansão de cavidades, diagnósticos dos efeitos das condições de contorno, dentre outros. Os mais simples conseguem registrar apenas a carga de ponta ( $q_c$ ), porém, alguns mais modernos conseguem captar além da carga de ponta ( $q_c$ ) e do atrito lateral ( $f_s$ ) a poro pressão ( $u$ ).

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo promover o estudo da aplicação da técnica de eletrocinética em um solo granular. Essa técnica foi aplicada com a finalidade de promover melhorias nas propriedades mecânicas do solo, onde foram adicionadas soluções químicas que, condicionadas a um gradiente elétrico, combinaram-se gerando uma cimentação e proporcionando um ganho de resistência por parte do solo.

A construção de conjuntos de equipamentos utilizados para simulação da aplicação da técnica de eletrocinética em campo, assim como um equipamento de dimensões reduzidas de prospecção para determinar o ganho de resistência do solo (MCPT), foram objetivos deste trabalho, desde a etapa de projeto até a etapa de validação dos resultados obtidos. Os equipamentos foram confeccionados com material inerte, com o intuito de evitar reações químicas indesejadas no momento em que fosse aplicado um gradiente elétrico ao solo. Por fim, o último e principal objetivo caracterizou-se por verificar se houve ganho em termos de resistência mecânica do solo após a aplicação das soluções combinadas com a técnica de eletrocinética.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é composta por cinco capítulos que estão divididos da seguinte maneira:

Capítulo 1: Introdução - apresenta as considerações iniciais, com a problemática e a justificativa da realização da pesquisa, os objetivos, além da organização da dissertação;

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica – contém uma revisão com os tópicos de interesse para o desenvolvimento da pesquisa;

Capítulo 3: Materiais e Métodos – estão descritas as principais características dos materiais utilizados neste estudo, o método experimental, bem como os ensaios realizados;

Capítulo 4: Apresentação e Análise dos Resultados – apresenta os resultados obtidos, as análises e discussões dos resultados;

Capítulo 5: Conclusões e Sugestões – contém as conclusões deste estudo, bem como as sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS GERAIS

Os solos possuem frentes de estudo em várias áreas, as quais o definem diferentemente. Isso não significa que existam definições incorretas sobre o tema, mas que as definições são baseadas em características consideradas importantes a cada ciência.

O termo solo, como é usado pelos engenheiros e adotado em Mecânica dos Solos, cobre uma faixa muito mais ampla de variação de materiais do que o usado em outras áreas. Para o agrônomo, solo é a terra em que forças orgânicas são proeminentes e que é adaptado para suportar a vidas de plantas. Para o geólogo, solo é um material cobrindo uma superfície relativamente fina onde se encontram as raízes. Para a interpretação genérica de engenharia, o termo solos inclui todos os materiais terrosos, orgânicos, inorgânicos, que ocorrem numa zona que cobre a crosta do nosso planeta. Esse termo tem origem no latim *solum* que possuía um significado semelhante ao atual e pode ter vários significados que dependem do campo profissional que está sendo considerado. (TSUTSUMI, 2006).

Tanto a geologia como as ciências agrárias possuem como principais instrumentos de classificação dos solos a pedologia e a geologia. Estas, nos últimos anos, tornaram-se relevantes no sistema de classificação também para a engenharia civil, a qual se utiliza de suas características para pré-determinar as propriedades dos solos que de alguma forma serão utilizados.

De acordo com Pinto (2002), para a engenharia civil, os solos são constituídos de um conjunto de partículas com água - ou outro líquido - e ar nos espaços intermediários. As partículas, de maneira geral, encontram-se livres para se deslocar entre si. Em alguns casos, pequena cimentação pode ocorrer entre elas, porém num grau extremamente mais baixo do que nos cristais de um metal ou nos agregados de um concreto. O comportamento dos solos depende do movimento das partículas sólidas entre si e isso faz com que ele se afaste do

mecanismo dos sólidos idealizados na mecânica dos sólidos deformáveis, na qual se fundamenta a mecânica das estruturas geralmente consideradas na engenharia civil, de maneira bem mais acentuada do que os materiais tradicionalmente considerados nas estruturas.

Para Tsutsum (2006), os solos na natureza apresentam-se constituídos de três fases físicas, em maior ou menor proporção. O arcabouço do solo, constituído do agrupamento das partículas sólidas, apresenta-se entremeado de vazios, os quais podem estar preenchidos com água e/ou ar. São os solos, assim, no caso mais geral, um sistema disperso formado por três fases: sólida, líquida e gasosa. Tendo em vista que o ar é extremamente compressível e que a água pode fluir através do solo, há a necessidade de se levar em conta ocorrências dessas fases físicas, quando da avaliação quantitativa do comportamento do solo. Embora seja extremamente difícil separar os diferentes estados que a água se apresenta nos solos é de grande interesse estabelecer uma distinção entre os mesmos.

A primeira característica que diferencia os solos é o tamanho das partículas que os compõem. Numa primeira aproximação, poder-se-á identificar que alguns solos possuem grãos perceptíveis a olho nu, como grãos de pedregulho ou a areia do mar, e que outros têm os grãos tão finos que, quando molhados, transformam-se numa pasta, não podendo se visualizar as partículas individualmente. (PINTO, 2002).

## **2.2 SOLOS GRANULARES**

Os solos sendo de granulação grosseira podem ser classificados como pedregulhos ou areias, dependendo de qual dessas duas frações granulométricas predominar. Sua identificação tátil-visual proporciona grânulos arenosos, quando tocados pelos dedos. Se colocados em água, mesmo agitando o sistema, decantam rapidamente. Possuem baixíssima ou mesmo nenhuma plasticidade e geralmente apresentam um pequeno intercepto coesivo.

Eles são caracterizados a partir do CNU (coeficiente de não uniformidade), que é a relação entre o diâmetro abaixo do qual se situam 60% em peso das partículas e o diâmetro abaixo do qual estão situadas 10% das partículas. Quanto maior o coeficiente de não uniformidade, melhor graduada é a areia, sendo chamadas de areias uniformes as que possuem CNU inferior a 2. “Os solos granulares podem ser “bem graduados” ou “mal graduados”. Nestes, há predominância de partículas com certo diâmetro, enquanto que



naqueles existem grãos ao longo de uma faixa bem mais extensa. O fato de o solo ser “bem graduado” o confere menor compressibilidade e maior resistência, devido à grande variedade de diâmetro das partículas. As menores ocupam os vazios correspondentes aos maiores. (PINTO, 2002).

De acordo com Lambe & Whitman (1979), a resistência ao cisalhamento dos solos granulares secos pode ser creditada a dois grupos de fatores: o primeiro grupo inclui o índice de vazios de um solo e a tensão de confinamento a que este está submetido, o segundo grupo inclui os fatores que fazem com que dois solos sob as mesmas condições de confinamento e de compactação apresentem resistências distintas. Dentre esses fatores, destacam-se o tamanho, forma e granulometria das partículas do material.

A resistência dos solos granulares é basicamente função do atrito de rolamento e deslizamento desenvolvido entre as partículas e do imbricamento (entrosamento) entre as mesmas. A resistência ao deslizamento/rolamento desenvolve-se nos pontos de contato entre as partículas sendo proporcional à força normal no contato. A tensão confinante, atuando no sentido de aumentar as tensões normais no contato, melhora a resistência do solo. Entretanto, caso essas tensões atinjam valores de certa magnitude, as irregularidades e arestas das partículas passam a ser quebradas reduzindo o imbricamento. Para diferentes tensões confinantes, no instante da ruptura serão encontrados diferentes valores para a tensão principal maior. Quanto maior a tensão de confinamento, maior será o valor obtido para  $\sigma_1$ . (MENESES, 2004).

Os solos granulares são materiais onde o atrito é predominante. O desvio de um comportamento puramente friccional pode ocorrer devido ao efeito da tensão confinante sobre o rearranjo dos grãos. À medida que cresce a tensão confinante, as partículas do solo tendem a se aplainar nos pontos de contato. Dependendo do tipo de solo, esse rearranjo pode provocar quebra de grãos no caso de grãos angulares. Em ensaios onde o solo é submetido a tensões confinantes elevadas, o fenômeno da quebra de partículas é similar ao rearranjo e reorientação dos grãos, como de areias fofas. (COSTA, 2005).

Para Almeida (2005), a compactação de um solo granular depende da maneira com que suas partículas sólidas se dispõem. A compactação relativa fornece uma indicação do estado de compactação de uma massa de solo (natural ou manipulado). Todavia, diversas propriedades utilizadas na engenharia, como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e

permeabilidade, de um solo tornado mais denso por métodos distintos, podem variar muito. E solos distintos, no mesmo estado de compactidade, também podem apresentar diferenças nessas propriedades. É preciso que haja muito discernimento ao relacionar propriedades de engenharia ao estado de compactidade.

Segundo Pinto (2002), a compactação de solos granulares, areias, tanto em campo quanto em laboratório, se faz muito melhor por meio de vibração. Maiores densidades secas são conseguidas com a areia saturada, e depois com a areia seca. Teores de umidades intermediários podem resultar em menores densidades secas, em virtude das tensões capilares que constituem uma resistência ao rearranjo das partículas. O estado em que se encontra uma areia seca pode ser expresso pelo seu índice de vazios. Contudo, esse dado isolado fornece pouca informação sobre o comportamento da areia, uma vez que, com o mesmo índice de vazios, uma areia pode estar compacta e outra fofa. Nesse contexto, torna-se necessário analisar o índice de vazios natural de uma areia em confronto com os índices de vazios máximo e mínimo em que ela pode se encontrar. Os índices de vazios máximos e mínimos dependem das características da areias. Assim, os valores são tão maiores quanto mais angulares são os grãos e quanto mais mal graduadas as areais.

### **2.3 MELHORAMENTO DE SOLOS**

O melhoramento de solos constitui provavelmente a técnica mais antiga e, do ponto de vista técnico, a mais intrigante de todas as que são utilizadas na Engenharia Civil. Há mais de três mil anos o melhoramento de solos era já utilizado na construção dos templos da antiga Babilônia. Nesse período, os chineses usavam madeira, bambu ou palha para reforço do solo. O ideograma chinês para o termo “Engenharia Civil” não significa mais do que “solo e madeira”. (CRISTELO, 2001).

Ainda de acordo com o mesmo autor, as alterações das propriedades de um solo podem ser de ordem química, física e biológica. Contudo, devido à grande variabilidade dos solos, nenhum método será bem-sucedido em tipos de solos muito distintos. De fato, visto que as características de um solo alteram-se em intervalos de alguns metros, a escolha de um método de estabilização é normalmente condicionada pelo número e tipo de solos sobre os quais este provou ter uma ação efetiva. Deve também ser notado que a estabilização não é necessariamente um processo infalível através do qual toda e qualquer propriedade do solo é

alterada para melhor. Uma aplicação correta de qualquer método exige assim a identificação clara de quais as propriedades do solo que se pretendem melhorar.

A estabilização de solos é uma técnica antiga desenvolvida principalmente para a pavimentação. Porém, tal conjunto de processos tem sido largamente utilizado, não somente na área de pavimentos, mas em diversas outras áreas como fundações, contenção de taludes e barragens. (VENDRUSCULO, 2003).

De acordo com Ingles & Metcalf (1972), denomina-se estabilização de solos a aplicação de processos e técnicas que busquem a melhoria das propriedades mecânicas desses materiais. O aumento da resistência, da rigidez e da durabilidade são algumas das alterações mais importantes nas propriedades mecânica dos solos.

Cimentação artificial é uma forma comum de melhoramento do solo, especialmente para os de baixa plasticidade e para os solos arenosos. O objetivo é gerar uma cimentação dentro da matriz do solo através de misturas químicas com agentes estabilizantes ou então injetando um agente químico nos poros do solo sem perturbar a sua estrutura. (Huang & Airey 1991; Kucharski *et al.* 1996; Ismail *et al.* 2002a, 2002b *apud* Shang *et al.* 2004).

Entretanto, apesar das diversas aplicações da estabilização de solos, em função do comportamento mecânico e hidráulico complexo, ainda não existem metodologias difundidas de dosagem de misturas de solo-cimento e solo-cal baseadas em critérios racionais como existe, por exemplo, para o concreto, onde o fator água/cimento desempenha papel fundamental na obtenção da resistência desejada.

Na perspectiva de suprir esta lacuna no estado da arte, propostas metodológicas para dosagem de misturas de solo-cimento e solo-cal, levando em consideração unicamente a resistência mecânica, estão sendo desenvolvidas pelo grupo Consoli *et al.* 2007 e por Lopes Junior, 2007 no Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Segundo Van Impe (1989), as técnicas de melhoramento de solos são de crucial importância para a resolução de problemas relacionados aos solos de fundação. No que diz respeito às técnicas de melhoramento de solos, os seguintes grupos podem ser distinguidos: (i) técnicas de melhoramento temporárias - limitadas ao período de construção; (ii) melhoramento permanente - as técnicas são aplicadas para melhorar o solo natural sem a

adição de quaisquer materiais e (iii) melhoramento permanente com adição de materiais ao solo natural.

Para Moseley (2000), algumas das técnicas que podem ser utilizadas em melhoramento de solos são:

- Técnicas de vibração - Em 1938, foram desenvolvidos métodos e equipamentos que permitiam a compactação de solos não coesivos. Essa compactação podia ser feita até 18 m de profundidade e gerava excelentes resultados. Por volta de 1950, surgiu a técnica de colunas de rochas vibradas. Estas eram executadas em meio a um solo com baixa capacidade de suporte permitindo assim a construção de obras seguras e econômicas.
- Compactação dinâmica - A compactação dinâmica melhora solos de baixa capacidade de suporte através da compactação controlada com altos níveis de energia. A reação dos solos durante o tratamento dinâmico da compactação varia de acordo com energia recebida e o tipo de solo. A compreensão detalhada do comportamento dele, combinada com a experiência da técnica, é vital para resultados positivos.
- Drenos verticais - A utilização de drenos verticais acelera o processo de dissipação da poro pressão, aumentando a velocidade dos processos de consolidação de solos coesivos. Essa idéia surgiu em 1920, entretanto só foi patenteada em 1926 quando Daniel E. Moran propôs a utilização de drenos verticais de areia na construção de parte de uma rodovia nos Estados Unidos.
- Estabilização através de colunas de solo/cal - Esses dispositivos têm sido empregados na melhoria da capacidade de suporte de argilas moles e siltes e ainda na redução de recalques. Nessa técnica, o solo é misturado com cal e forma colunas no interior do terreno, as quais terão a função de suportar a carga aplicada sobre ele.
- Misturas no solo *in situ* - Para possibilitar a melhoria de solos *in situ*, poderão ser utilizados vários agentes, dentre os quais é possível destacar o cimento, a cal e os betumes. Esses tipos de estabilizantes são aplicados principalmente na construção de obras viárias. Na área ambiental, a aplicação da estabilização é bastante difundida,

tanto com o cimento quanto com a cal. A estabilização nessa área é utilizada para encapsular rejeitos e para bloquear o avanço de plumas de contaminação.

- Injeções químicas - Este processo implica em injetar soluções químicas prontas (sem necessidade de combinar-se a outra solução para promover a sua solidificação) ou então soluções que necessitem de combinação para preencher os vazios existentes no solo e ali promover a ligação das partículas. A viscosidade dos reagentes é uma característica muito importante que pode tornar ineficiente a técnica. Essa técnica é dita eficiente apenas para solos granulares.

Para aplicação da técnica de injeções químicas em solos de baixa permeabilidade, auxiliando na homogeneização dessas injeções e ainda promovendo as ligações químicas entre os íons presentes nas soluções, poder-se-á utilizar a técnica de eletrocinética.

## 2.4 A TÉCNICA DE ELETROKINÉTICA

Nos solos finos, uma partícula de argila, inicialmente seca, contém cátions adsorvidos à sua superfície. Pode existir, ainda, uma quantidade de cátions e ânions, na forma de sais, além do necessário para se neutralizar o sistema. Quando em contato com água, os sais se diluem, gerando uma diferença de potencial elétrico entre as fases sólida e líquida. Partindo-se do princípio de que o sistema necessita manter a sua neutralidade elétrica, o excesso de carga superficial deve ser balanceado pela carga da fase líquida igual e oposta. Na solução, a carga distribui-se por uma distância finita, a partir da superfície da partícula, formando o que se denomina de dupla camada elétrica difusa ou, simplesmente, dupla camada difusa. São vários os fatores que influenciam a espessura da dupla camada difusa, dentre eles, a concentração eletrolítica, a valência dos cátions presentes, a temperatura, as dimensões do íon e o pH. (CARVALHO *et al.* 2006).

Quincke (1861) *apud* Azam & Oey (2001a) acreditava que o comportamento físico/químico da dupla camada difusa na interface sólido/líquido era o responsável pela eletrosmose - um dos fenômenos produzidos pela aplicação da eletrocinética.

A técnica de eletrocinética é definida como transporte físico-químico de cargas, ação sobre partículas carregadas e efeitos de potenciais elétricos aplicados em transportes de fluidos em meios porosos. (ACAR *et al.* 1997).

Schmidt (2004) afirma que, de acordo com a nomenclatura para os fenômenos eletroquímicos, estabelecida por Faraday e válida até hoje, os fios mergulhados na solução são os eletrodos, catodo e anodo, e a solução que transporta a corrente é o eletrólito. O catodo é o pólo negativo ou o eletrodo para o qual a eletricidade negativa entra na solução, e o anodo é o pólo positivo ou o eletrodo para o qual a eletricidade negativa abandona a solução. O eletrólito é denominado católito (quando mais próximo do catodo) e anólito (quando mais próximo do anodo). A passagem de corrente elétrica através do eletrólito deve-se à migração de partículas carregadas presentes na solução - ou íons.

Ainda conforme o mesmo autor, as técnicas eletrocinéticas baseiam-se na aplicação *in situ* de um gradiente elétrico entre eletrodos gerando o transporte eletrocinético. Esse campo elétrico gera processos de transporte de íons, fluido dos poros e partículas eletricamente carregadas em direção aos eletrodos.

A eletrocinética utiliza uma corrente direta de baixo nível da ordem de miliampères/cm<sup>2</sup> da área de solo. Sobre a aplicação de uma corrente direta de baixo nível, o sistema água-eletrólito do solo submete-se a mudanças físico-químicas e hidrológicas que conduzem ao transporte e à remoção de íons. A corrente elétrica aplicada (ou a diferença de potencial elétrico) conduz a reações de eletrólise nos eletrodos, movimentação da distribuição de ácido-bases pelo produto químico e diferenças de potenciais hidráulicos, adsorção/desorção e reações de precipitação/dissolução, transportes de líquidos e dos íons nos poros, além de eletrodeposição. (ACAR *et al.* 1997).

Para Deotti (2005), essa técnica é normalmente utilizada em solos de granulometria fina, onde a permeabilidade é baixa. Inicialmente sua utilização estava relacionada à extração de metais pesados do solo, entretanto já existem pesquisas onde tal técnica vem sendo utilizada para a remoção de compostos orgânicos, ou como técnica auxiliar na otimização da biodegradação desses compostos. Pesquisas recentes comprovaram a capacidade de aplicação da técnica em outras áreas, dentre as quais se destaca o reforço de solos de fundações através de injeções eletroquímicas.

#### **2.4.1 Fenômenos eletrocinéticos**

Ao aplicar-se uma corrente elétrica no solo através de eletrodos, ocorrem vários fenômenos dentre os quais os mais importantes são: a eletrosmose, a eletromigração, a eletroforese e a eletrólise.

Os fenômenos citados ocorrem quando o solo é carregado eletricamente com uma corrente contínua de baixa tensão. No entanto, segundo Deotti (2005), eles desenvolvem-se somente nos solos finos pela presença de partículas eletricamente negativas e da dupla camada difusa. A configuração fundamental para que os processos ocorram envolve a aplicação de um potencial elétrico entre pares de eletrodos que devem ser posicionados no solo em lados opostos de uma massa. (CAUWENBERGHE, 1997). Os fenômenos eletrocinéticos estão apresentados na Figura 2.1.

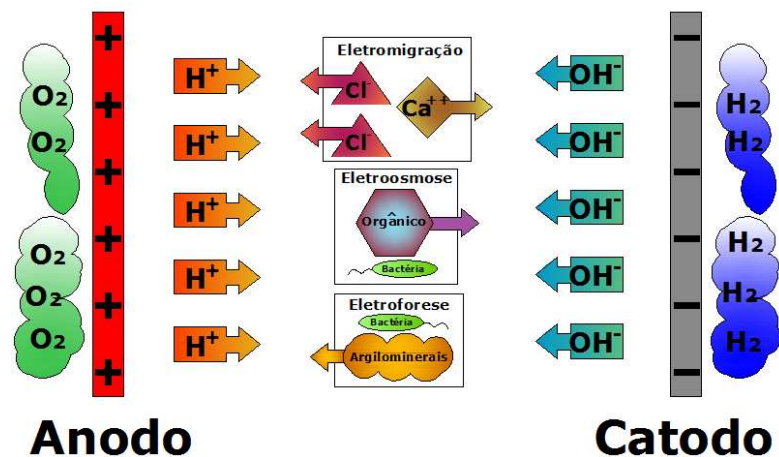


Figura 2.1: Fenômenos eletrocinéticos. (Adaptado de Harbottle, 2003).

A eletrosmose e a eletromigração são as forças motrizes primárias, (PEDRAZZOLI *et al.* 2003) e, em relação as suas velocidades, é possível afirmar que a taxa de transporte por eletromigração é 5 a 40 vezes maior do que a velocidade electrosmótica (ACAR & ALSHAWABKEH, 1993 *apud* DEOTTI, 2005).

#### 2.4.1.1 Electrosmose

De acordo com Höbelbarth & Azzam (2002), a electrosmose é caracterizada como o movimento da água existente nos poros relativo ao campo elétrico das partículas. Devido à força do campo elétrico, os íons da dupla camada, no limite entre a superfície da partícula do solo e a água dos poros, são acelerados para o eletrodo oposto ao seu carregamento. Isso resulta em um plano de deslizamento na dupla camada elétrica que separa os íons estáticos dos livres. A aceleração dos íons provoca um movimento da água contida nos poros, causando um fluxo dirigido da água.

Assim, se um potencial elétrico for aplicado em uma massa de solo úmida, os cátions serão atraídos para o catodo e os ânions para o anodo. Há um excesso dos cátions no sistema para neutralizar a carga negativa das partículas do solo. Como esses cátions migram para o catodo, arrastam a água com eles, causando o movimento dela. Os ânions, por sua vez, também arrastam a água consigo enquanto migram ao anodo, entretanto esse fluxo geralmente é muito menor do que o fluxo para o catodo. Conseqüentemente, o fluxo da água se dá em direção ao catodo. (MITCHELL, 1976). Segundo Alshawabkeh *et al.* (1999), para fins práticos, o volume do fluxo eletrosmótico é descrito por uma equação análoga à lei de Darcy (Eq. 2.1).

$$Q = K_e \cdot I_e \cdot a \quad (2.1)$$

onde,  $Q$  = vazão do fluxo eletrosmótico ( $m^3/s$ );  $K_e$  = coeficiente de condutividade eletrosmótica ( $m^2/V \cdot s$ );  $I_e = \nabla(-\phi)$  = tensão aplicada ( $V/m$ );  $\phi$  = potencial elétrico aplicado ( $V$ ) e  $a$  = área da secção transversal perpendicular à direção do fluxo. Azzam e Oey (2001a) afirmam que o coeficiente de condutividade eletrosmótico, ( $K_e$ ), depende da constante dielétrica e viscosidade da água, potencial zeta e porosidade do meio.

Azzam e Oey (2001b) relatam que, conforme a teoria de Helmholtz-Smoluchowsky, a determinação do coeficiente de condutividade eletrosmótico em condições de saturação do meio -  $K_e$  ( $m^2/V \cdot s$ ) - é dada pela Equação 2.2.

$$K_e^* = (\mathcal{E} \cdot \mathcal{E}_0 \cdot Z / \eta) \cdot n \quad (2.2)$$

onde,  $\mathcal{E}$  = permissividade relativa da água nos poros;  $\mathcal{E}_0$  = permissividade no vácuo ( $8,854 \times 10^{-12} C/V \cdot m$ );  $\eta$  = ( $Kg/m \cdot s$ ) a viscosidade da água dos poros;  $Z$  = ( $V$ ) potencial zeta e  $n$  = porosidade.

Para que haja um entendimento do potencial zeta, Pivelli & Kato (2005) explicam que quando uma partícula coloidal é submetida a uma diferença de potencial, ela migra para o pólo de sinal contrário à sua carga primária. Os contra-íons que se encontram na camada compacta estão fortemente atraídos à partícula e são capazes de migrarem junto com ela. Todavia nem todos que estão na camada difusa possuem essa capacidade. É possível imaginar um plano no interior da camada difusa que corresponde ao limite da capacidade de



acompanhamento da partícula, isto é, as cargas que estão até esse plano são capazes de acompanhar a partícula, enquanto as que estão fora não têm essa capacidade. O plano em questão é chamado de plano de cisalhamento. O potencial máximo de repulsão eletrostática ocorre exatamente na superfície da partícula: é ele que tem que ser neutralizado para a desestabilização da partícula, porém é muito difícil de ser medido. Por outro lado, o que pode ser medido é o potencial manifestado no plano de cisalhamento, que é o chamado potencial zeta. Isso acontece em virtude de o potencial zeta corresponder ao potencial das cargas que estão dentro do plano de cisalhamento, que possibilita ser medido por eletroforese, uma vez que essas cargas migrarão com a partícula para o pólo de sinal contrário. O potencial zeta é dado pela Equação 2.3.

$$Z = \frac{4\pi dq}{D} \quad (2.3)$$

onde,  $Z$  = potencial zeta;  $d$  = carga da partícula;  $q$  = espessura da zona de influência da carga da partícula e  $D$  = constante dielétrica do líquido.

#### 2.4.1.2 Eletromigração

De acordo com Deotti (2005), a eletromigração corresponde ao transporte iônico no fluido intersticial do solo devido à carga do íon e ao campo elétrico aplicado. Os íons negativos são transportados para o eletrodo de carga positiva e os íons positivos para o eletrodo de carga negativa, sendo separados de acordo com a sua carga. Tal fenômeno ocorre unicamente em substâncias eletricamente carregadas, contudo independem da presença da dupla camada difusa. O que interfere na eletromigração é, portanto, a mineralogia, superfície específica e estrutura do solo. Além disso, esse processo é o grande responsável pela condução da corrente elétrica, o que inclui a migração de  $H^+$  e  $OH^-$  para o eletrodo de carga contrária. (Reddy & Saichek, 2003).

Segundo Dean (1992) *apud* Alshawabkeh *et al.* (1999), a mobilidade dos íons livres das soluções, ou seja, a velocidade com que eles se movimentam está diretamente associada à intensidade do campo elétrico. Essas velocidades variam de  $1 \times 10^{-8}$  a  $1 \times 10^{-7}$   $m^2/v\cdot s$ .

Na Figura 2.2, é possível visualizar dois fenômenos que ocorrem durante a aplicação da técnica de eletrocinética - eletrosmose e eletromigração - além de ter uma idéia qualitativa da distribuição da velocidade da água entre as partículas.

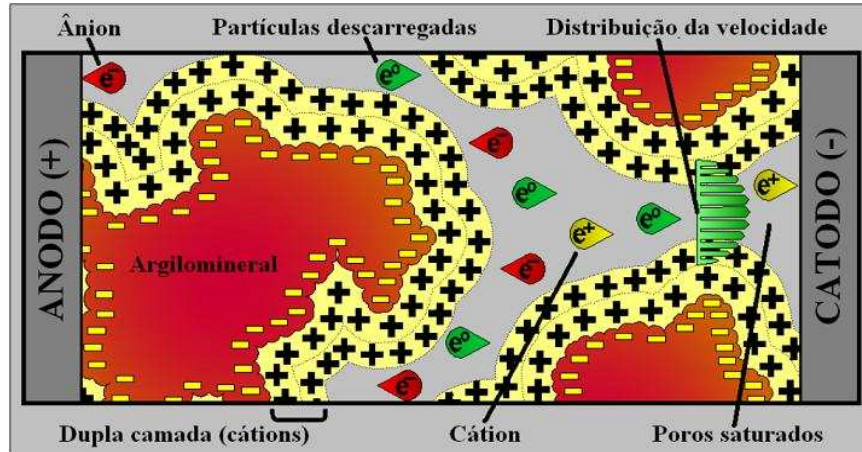


Figura 2.2: Eletrosmose e eletromigração.

Para Azzam e Oey (2001a), o fluxo da massa devido à eletromigração em um eletrólito depende do gradiente elétrico aplicado, da mobilidade iônica e ainda da concentração de um determinado íon no eletrólito. Considerando que a mobilidade iônica efetiva do solo seja como ( ), o fluxo da massa por unidade secção transversal no solo pode ser dada pela Equação 2.4.

$$J_{ems} = u_i^* \cdot I_e \cdot c_i \quad (2.4)$$

onde,  $J_{ems}$  = fluxo de massa pela eletromigração;  $u_i^*$  = mobilidade iônica efetiva do solo;  $I_e$  = tensão aplicada e  $c_i$  = concentração.

### 2.4.1.3 Eletroforese

O tipo mais familiar de experiência electrocinética consiste na aplicação de um gradiente elétrico em uma solução contendo partículas carregadas, determinando a sua taxa de movimento. Se as partículas forem íons moleculares, o fenômeno será chamado condutância iônica. No entanto, se elas forem unidades maiores, como moléculas de proteína ou partículas coloidais, o fenômeno será chamado eletroforese. (ADAMSON & GAST, 1997).

Se uma corrente elétrica for aplicada a uma massa de solo, os colóides carregados eletricamente serão atraídos eletrostaticamente a um dos eletrodos e repelidos pelo outro. As partículas negativamente carregadas de argila movem-se em direção ao anodo. Esse processo chama-se eletroforese e envolve o transporte discreto da partícula através da água. Já a eletrosmose envolve o transporte da água através de uma rede contínua da partícula do solo. (MITCHELL, 1976). A força produzida pelo fenômeno da eletroforese em uma única

partícula de argila é dada pela Equação 2.5. (HUNTER, 1981 *apud* SHANG & DUNLAP, 1996).

$$F_e = d \cdot E \quad (2.5)$$

Onde  $F_e$  = força da eletroforese;  $d$  = carga elétrica da partícula e  $E$  = campo elétrico.

Acar (1997) afirma que, em depósitos de argilas moles submetidos a uma corrente elétrica, a eletroforese tem, no transporte de partículas carregadas, uma menor contribuição quando comparada com a eletromigração e a eletroosmose.

Referindo-se ambientalmente, Acar e Alshwabkeh (1993) *apud* Deotti (2005) destacam que, na remediação eletrocinética, a eletroforese tem importância apenas quando são introduzidos surfactantes e, na biorremediação eletrocinética, somente se os microorganismos forem partículas eletricamente carregadas.

Mitchell (1976) cita ainda como fenômenos decorrentes da aplicação de uma corrente no solo o potencial de sedimentação e o potencial de escoamento. Potencial de sedimentação é inverso à eletroforese: o movimento de um grande número de partículas carregadas em uma direção, por exemplo, durante a sedimentação de sólidos, produz uma corrente elétrica na direção do movimento das partículas. Tal fato é causado pelo efeito de arraste viscoso da fase líquida que retarda o movimento dos íons da camada difusa relativo aos íons das partículas. Potencial de escoamento é o fenômeno inverso a eletroosmose: quando um líquido é forçado a escoar em um meio poroso sob aplicação de um gradiente hidráulico, as cargas da dupla camada são deslocadas na direção do fluxo e sua acumulação na corrente de saída causa o crescimento de um campo elétrico que induz a uma corrente elétrica de volta (por condução iônica através do líquido) contra a direção do escoamento de líquido.

#### 2.4.1.4 Eletrólise da Água

De acordo com Schimidt (2004), a lei de Faraday para a eletrólise estabelece que “o número de equivalentes grama de uma substância depositada, liberada, dissolvida ou que reage com um eletrodo é igual ao número de faradays que atravessa o eletrólito”. Um equivalente grama é igual à massa atômica do elemento dividida pela sua valência e o número de equivalentes grama é igual à massa  $M$  depositada dividida pelo valor do equivalente grama do elemento. O número de faradays é igual à corrente elétrica multiplicada pelo seu tempo de

atuação dividida pelo valor de um faraday (F). A expressão matemática dessa lei é apresentada na Equação 2.6.

$$M = (I \times t \times Mm) / (z \times F) \quad (2.6)$$

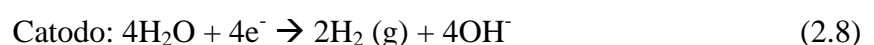
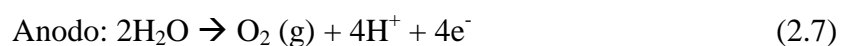
onde,  $M$  = massa do produto formado;  $I$  = corrente elétrica em ampers;  $t$  = tempo decorrido em segundos;  $Mm$  = massa molecular do elemento;  $z$  = valência e  $F$  = número de Faraday ( $F=96519$  Coulomb [A.s]).

Segundo Acar & Alshawabkeh (1996), quando a técnica da eletrocinética é aplicada sem condicionar o fluido de processo aos eletrodos, a corrente elétrica aplicada conduz a reações de eletrólise neles, gerando um meio ácido no anodo e um meio alcalino no catodo.

Para Guaracho (2005), a variação do pH nos eletrodos resulta da eletrólise da água. A solução torna-se ácida no anodo porque os íons hidrogênio são produzidos e o gás oxigênio é liberado, conseqüentemente seu pH poderia cair até abaixo de 2. No catodo, a solução torna-se básica, onde os íons hidróxidos são gerados e o gás hidrogênio é liberado. Nesse caso, seu pH poderia aumentar até acima de 13, sendo que em ambos os casos dependeria da corrente total aplicada.

O ácido gerado no anodo vai avançar através do solo em direção aos catodos. Esse avanço é regido por diferentes mecanismos, incluindo transporte iônico, migração devido ao gradiente elétrico, advecção (fluxo eletrosmótico) e a difusão (gradientes de concentração). O meio alcalino desenvolvido no catodo devido à produção de  $\text{OH}^-$  tende a deslocar-se para o anodo por difusão e por migração iônica. No entanto, a resistência proporcionada pelo fluxo eletrosmótico irá retardar esse avanço. O avanço dessa frente rumo ao anodo será muito mais lento do que o avanço da frente ácida rumo aos catodos, em virtude do motivo anteriormente exposto e também devido à mobilidade iônica de  $\text{H}^+$  ser aproximadamente 1,76 vezes maior do que a do  $\text{OH}^-$ . (ACAR *et al.* 1997).

De acordo com Reddy & Saichek (2003), as reações primárias de hidrólise que ocorrem nos eletrodos são representadas pelas Equações 2.7 e 2.8.



## 2.4.2 Eletrodos

Os eletrodos são elementos que têm a função de transferir a corrente elétrica para o solo. São extremamente simples, constituídos na maioria das vezes por uma barra metálica com um encaixe na parte superior, onde é conectado o condutor. De acordo com o material de sua constituição, eles podem apresentar vidas úteis bastante distintas. Em decorrências disso, são chamados de eletrodos inertes (ex.: grafite e platina) e não inertes (ex.: ferro e cobre).

Os eletrodos metálicos possuem tendência a ceder elétrons, sendo a facilidade dessa transação determinada pela reatividade do metal. Quanto mais nobre o metal, menos reativo ele é e maior a sua resistência em ceder elétrons. Existem inúmeras citações de utilizações dos mais variados tipos de materiais para constituição de eletrodos, cujas algumas utilizações e resultados estão exemplificados a seguir.

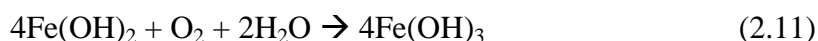
Azzam & Oey (2001a) afirmam que, quando os eletrodos são de ferro, ocorre a reação apresentada na Equação 2.9:



Após, os íons de ferro reagirão com a água e produzirão hidróxido ferro II e hidrogênio (Eq. 2.10).



Devido à presença do oxigênio livre, o hidróxido ferro II é transformado em hidróxido de ferro III (Eq. 2.11).



O hidróxido de ferro III é propenso à precipitação em ambientes neutros e alcalinos, o que melhora as propriedades do solo.

No mesmo ano, Azzam & Oey (2001b) asseveram que, se os eletrodos utilizados forem quimicamente ativos como o cobre ou o alumínio, ocorrerá a sua oxidação no anodo, de acordo com as Equações 2.12 e 2.13, gerando uma crosta em sua superfície.



No momento em que ocorrerem essas corrosões nos anodos, acontecerá uma menor acidificação do solo devido à baixa produção de íons  $\text{H}^+$ . Essa diminuição é consequência do consumo de corrente elétrica pelas reações de oxidação e pelo aumento da resistividade no anodo imposta pela crosta.

De acordo com Shang & Dunlap (1996), para a geração de campos elétricos através de altas voltagens, podem ser utilizados eletrodos isolados de cobre. Essa isolação pode ser feita através de tubos de acrílico contendo óleo mineral de transformadores, onde o eletrodo de cobre propriamente dito deve ser imerso.

Para Acar & Alshwabkeh (1996), os eletrodos de carbono são quimicamente inertes a reações de eletrólises, o que impede e previne introduções de espécies químicas adicionais que poderiam complicar o processo eletroquímico. O seu uso, principalmente no anodo, é essencial, visto que ocorrem reações de oxidação as quais possuem um efeito altamente corrosivo. Todavia, até mesmo esses eletrodos deterioram-se com o tempo liberando partículas de carbono à solução.

Segundo Deotti (2005), em todos os seus experimentos realizados, foi observada a degradação dos eletrodos do lado do anólito, ficando os eletrodos do lado do cátodo inalterados. A presença de íon  $\text{Cl}^-$  provocou uma maior degradação do eletrodo que era constituído de aço inox. Essa liga é mais sensível à degradação com a presença do íon  $\text{Cl}^-$  quando comparado a outros íons (como Ca, Mg, entre outros). Uma opção seria a utilização de eletrodos feitos de titânio, todavia, não existem dados que assegurem a sua integridade.

Estudos têm indicado que eletrodos metálicos podem dissolver-se como resultado da eletrólise e pela introdução de produtos corrosivos no solo. A vantagem da utilização de eletrodos inertes, tais como de carbono grafite ou platina, será a não deterioração dos mesmos e ainda a ausência de íons metálicos desprendidos do eletrodo. Os eletrodos podem ser dispostos horizontalmente ou verticalmente. (GUARACHO, 2005).

Schimidt (2004) afirmou em sua tese que eletrodos de grafite degradam-se tanto no anodo como no catodo. Ainda enfatizou que a utilização de eletrodos de aço inox mantém mais elevado o pH no anólito em relação aos eletrodos de grafite. Isso ocorre devido à

oxidação do ferro no lugar da água, sendo liberados menos íons  $H^+$ , além de metais como níquel e ferro, que são liberados para o fluido.

Conforme Guaracho (2005), no reator eletroquímico utilizado pela autora em ensaios, o catodo era composto de chumbo e o contra-eletrodo (anodo) por aço inoxidável.

Alshawabkeh *et al.* (1999) ressalta que materiais quimicamente inertes em ambientes ácidos e eletricamente condutores, tais como a grafite, o titânio revestido ou a platina devem ser usados como anodo para prevenir a dissolução do eletrodo e a geração de produtos da corrosão indesejáveis. Já para o catodo, é importante que o material não sofra corrosão em ambientes básicos. As considerações relevantes na escolha dos materiais dos eletrodos são (i) propriedades de condução elétrica; (ii) disponibilidade do material; (iii) facilidade de fabricação da forma requerida para o processo e (iv) despesas de fabricação e instalação. Além dos mais variados tipos de materiais que podem constituir os eletrodos, outra variável que possui relativa importância é a distribuição deles na massa de solo, uma vez que possui relação direta com o sucesso da aplicação da técnica.

Os eletrodos podem ser instalados horizontalmente ou verticalmente e são capazes de atuar em uma ou duas direções. Um campo elétrico em uma única direção pode ser obtido por linhas de eletrodos - método mais fácil para instalação e que gera boa relação custo benefício para aplicações *in situ*. Entretanto, essa configuração pode desenvolver pontos do campo elétrico inoperantes, principalmente entre eletrodos de mesma polaridade. As configurações sextavadas, quadradas ou triangulares são exemplos de aplicações em duas direções. Em uma configuração sextavada, eletrodos formam um favo de mel, que contém um catodo cercado por seis anodos. Em uma configuração quadrada, existe um catodo cercado por quatro, oito ou mais anodos. Similarmente, em uma configuração triangular, os eletrodos dão forma aos triângulos que contêm um catodo cercado por três anodos. Tais configurações dos eletrodos em duas direções podem inibir o surgimento de pontos onde o campo elétrico seja inoperante. (ALSHAWABKEH *et al.* 1999).

Após feita a escolha do tipo de arranjo que se dará aos eletrodos, torna-se necessário estipular as distâncias entre eles. Cabe lembrar que distâncias muito pequenas não são adotadas principalmente pelo fator custo, enquanto as distâncias muito elevadas, por sua vez, não são aceitas pela demora na obtenção de resultados positivos.

Em pesquisa realizada por Acar & Alshawabkeh (1996), a distância entre o conjunto de eletrodos centrais (anodos) e os conjuntos laterais (catodos) era de aproximadamente quatro vezes a distância entre os eletrodos de mesma polaridade. Tais autores justificaram essa relação, por acreditarem que se trata de uma alternativa para se obter um campo elétrico em uma única direção.

De acordo com Alshawabkeh *et al.* (1999), os fatores que influenciam a distância entre os eletrodos incluem os custos (posição, tamanho e número) e o tempo disponível para aplicação da técnica. Um afastamento maior entre os eletrodos reduzirá o número de perfurações e dos custos de instalação, ao mesmo tempo que despenderá um tempo maior de aplicação e conseqüentemente aumentará os custos de operação. Nesse sentido, o tempo necessário de aplicação é função da taxa de transporte dos íons e do afastamento entre os eletrodos. Ainda segundo o mesmo autor, para que haja uma minoração dos pontos inoperantes dos campos elétricos quando aplicados em uma única direção, os eletrodos de mesma polaridade devem possuir uma distância igual a um terço da distância entre os eletrodos de polaridades opostas.

### **2.4.3 Possíveis empregos da técnica de eletrocinética**

A técnica de eletrocinética pode ser aplicada tanto em caráter geotécnico como em caráter geoambiental. Das inúmeras aplicações já realizadas mundialmente, a seguir serão expostas algumas delas.

#### **2.4.3.1 Remediação de solos contaminados por metais**

De acordo com a eletromigração, onde partículas carregadas são atraídas para o eletrodo catodo ou para o eletrodo anodo, dependendo da sua carga, poder-se-á realizar a remediação de solos contaminados com metais pesados através da aplicação de um campo elétrico.

Devido às reações de eletrólise, o pH próximo ao anodo torna-se ácido, promovendo uma mobilização dos íons metálicos que estão contaminando o solo. Para facilitar ainda mais esse processo, podem ser inseridas no solo soluções químicas chamadas de católitos e anólitos que atuarão em prol desse benefício.

Conforme as suas cargas elétricas, os íons irão se movimentar e alojar-se-ão próximos aos eletrodos, facilitando dessa forma a sua remoção da massa de solo. Cabe lembrar que se o solo que se encontra no entorno do anodo não for removido, ocorrerá apenas a concentração



dos metais em um determinado ponto, não os eliminando. Para completar o processo, será preciso remover o solo com altas concentrações de metais e expô-lo a outra técnica que promova a sua descontaminação. A principal vantagem da utilização dessa técnica para o devido fim é o fato de não haver necessidade de remoções, movimentações e transportes, em larga escala do solo contaminado.

Segundo Cauwenberghe (1997), a primeira aplicação da técnica de eletrocinética visando a remediação de áreas contaminadas ocorreu na Holanda em 1986. Após, essa técnica foi aplicada largamente por pesquisadores em caráter laboratorial para remoção de contaminantes metálicos. Alguns deles que podem ser citados são: Acar *et al.* (1997), chumbo; Kim *et al.* (2002), cádmio, cobre, chumbo e zinco; Suér & Lifvergren (2003), mercúrio; Pedrazzoli *et al.* (2003), chumbo; Guaracho (2005), chumbo e níquel e Deng & Jennings (2006), cromo, cobre, chumbo e zinco.

#### **2.4.3.2 Desidratação de lamas industriais**

Principalmente em países de primeiro mundo, existe uma forte preocupação em relação à disposição de lamas provenientes de tratamentos de efluentes industriais. Essa preocupação justifica-se em virtude da grande quantidade de contaminantes orgânicos e inorgânicos existentes nelas e pela sua grande quantidade de água, o que despendia imensos depósitos. De acordo com a técnica de eletrocinética, é possível acelerar a desidratação de lamas utilizando uma corrente elétrica, sendo essa desidratação regida pelo processo de eletrosmose.

Höbelbarth & Azzam (2002) promoveram tentativas de remoção da água constituinte da lama proveniente de estações de tratamento de água. Estas, segundo ensaios laboratoriais, eram contaminadas por metais pesados (chumbo, cádmio, cromo, cobre, níquel e zinco) e possuíam uma quantidade considerável de matéria orgânica. A explicação da grande concentração de metais está na alta capacidade que eles têm em associar-se à matéria orgânica. No final do processo, o qual foi bem-sucedido, obteve-se uma redução média de cerca de 35% em volume comprovando a eficácia da técnica.

#### **2.4.3.3 Consolidação de argilas moles**

Segundo Pinto (2002), o processo de adensamento é o fenômeno pelo qual os recalques ocorrem com a expulsão da água do interior dos vazios do solo. Em solos granulares (areias)

esses processos ocorrem de forma bastante rápida devido as suas altas permeabilidades; já em solos de granulometria fina, esse processo pode levar vários anos.

Na prática da engenharia, surge uma situação especial quando se deseja construir algum tipo de obra, seja ela civil ou viária, sobre depósitos de argila moles, visto que esse tipo de argila possui uma baixa capacidade de suporte e necessita de um longo período para que ocorra o adensamento. Então, uma das soluções é a colocação de uma sobrecarga, que conseqüentemente aumentará a sua tensão efetiva e a expulsão da água ocorrerá de forma acelerada. Outra alternativa é a utilização da técnica de eletrocinética. Nesse caso, a saída da água contida no solo será regida pelo fenômeno eletrosmótico e poderá ocorrer a altas velocidades.

Azzam & Oey (2001a) relatam que a utilização da eletrosmose na engenharia geotécnica para a drenagem e a estabilização de pontos em solos de baixa permeabilidade começou em 1930. Após, outros estudos foram realizados, dentre os quais, é possível citar o realizado por Shang & Dunlap (1996). Nesse estudo, aplicaram a técnica de eletrocinética com altas voltagens em um solo composto por sedimentos marinhos e, segundo eles, conseguiram grandes melhorias que foram irreversíveis mesmo após a retirada do campo elétrico.

#### **2.4.3.4 Melhoria das propriedades mecânicas do solo**

Conforme Alshawabkeh & Sheahan (2003), a estabilização eletrocinética é o método pelo qual, sob aplicação de uma corrente elétrica contínua, são alteradas as propriedades dos solos para fins de engenharia.

A técnica de eletrocinética pode ser utilizada juntamente com injeções de soluções químicas na tentativa de melhorar a capacidade de suporte de solos. Segundo Azzam & Oey (2001a), no ano de 1997, Azzam e outros pesquisadores utilizaram a técnica para melhorar as propriedades mecânicas de um solo disposto abaixo das fundações de uma igreja. A necessidade da melhoria foi em função de problemas apresentados em uma igreja nas proximidades. De acordo com o autor, investigações na torre da igreja histórica de St. Nicolaus em Walbeck-Geldern, na Alemanha, mostraram que quando os sinos soavam, a torre balançava na mesma frequência harmônica dos sinos, causando uma quantidade inaceitável de deformação abaixo das fundações.

Na tentativa de minimização dessas deflexões, foram feitas injeções com água carbonatada nas proximidades do catodo e com solução de cloreto de cálcio nas proximidades do anodo. A aplicação da corrente elétrica provocou a eletrólise da água, que juntamente com a solução de cloreto de cálcio propiciou a formação de hidróxido de cálcio. Este combinou-se com o dióxido de carbono formando assim o carbonato de cálcio, que foi o agente cimentante responsável pela fraca cimentação entre as partículas do solo.

Através desse procedimento, Azzam e os outros pesquisadores conseguiram, após 4 semanas aplicando 1V/cm, fazer as medidas da deflexão diminuírem cerca de 25% do valor original quando os sinos estavam soando. As medidas de deflexão mostraram que a injeção eletroquímica foi bem-sucedida.

Assim como o autor referido, outros pesquisadores, porém aplicando outras soluções químicas no solo, também obtiveram resultados positivos. Barker *et al.* (2004) cita alguns pesquisadores juntamente com as soluções utilizadas na aplicação de injeções eletroquímicas: Bally & Antonescu (1961), soluções de cloreto e silicato de cálcio; Dearstyne & Newman (1963), cloreto de amônio e cloreto de cálcio; Esrig & Gemeinhardt (1967), cloreto de cálcio; Caron (1968), cloreto de amônio; Caron (1971) e Peignaud (1977), silicato de sódio; Yamanouchi & Matsuda (1975), soluções de silicato, bentonita e hidróxido de alumínio; O'Bannon *et al.* (1976), cloreto de potássio; Oncescu & Ballie (1977), silicato de sódio; Anon (1998), alumínio e íons de fosfato; Ozkan *et al.* (1999), alumínio e íons de fosfato e Fujihira *et al.* (2000), silicato de sódio e cloreto de cálcio.

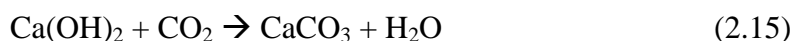
Essa técnica segue princípios semelhantes aos da eletroosmose química e da estabilização convencional, porém, possui uma vantagem especial, ela permite o tratamento em locais de difícil acesso sem grandes remoções de solo. (BARKER *et al.* 2004).

#### **2.4.4 Injeções eletroquímicas**

A aplicação da técnica de eletrocinética em uma massa de solo contaminada pode, dependendo da concentração de metais, não promover a total remoção destes. Em virtude disso, podem ser feitas injeções eletroquímicas que, através da aplicação de correntes elétricas, irão promover uma espécie de estabilização/solidificação no solo. Esse tipo de estabilização também pode ser aplicado para aumentar a capacidade de suporte de solos.

Para isso, diferentes soluções podem ser injetadas na massa de solo, contudo, algumas apresentam resultados mais rápidos. Azzam & Oey (2001a) asseveram que o processo eletroquímico no solo é complexo e, ainda pode variar em tipos diferentes de solo. A dificuldade de se conseguir uma injeção bem-sucedida pode ser amenizada através de testes em laboratório antes da realização *in situ*.

Conforme pesquisa realizada pelo mesmo autor, a introdução de água carbonatada (água com gás carbônico dissolvido) no solo, juntamente ao eletrodo catodo e uma solução contendo cloreto de cálcio no eletrodo anodo, promoverá a formação de carbonato de cálcio, que precipitará e ligará as partículas do solo de acordo com as Equações 2.14 e 2.15.



Nesse caso, a água foi utilizada para aumentar a disponibilidade de dióxido de carbono no solo. O íon cálcio, após a dissociação da molécula de cloreto de cálcio, é transportado pela corrente em direção ao catodo.

De acordo com Barker *et al.* (2004), a aplicação de uma diferença de potencial no solo causa modificações no pH do mesmo, o que acarreta a solubilização de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxidos de silício ( $\text{SiO}_4$ ). Uma vez dissolvidos, eles podem reagir com os íons cálcio, que são introduzidos propositalmente no sistema. Os produtos das reações são os géis amorfos aluminato hidratado de cálcio e silicato hidratado de cálcio, que após a cristalização formarão um sólido íntegro.

Os mesmos autores ainda no ano de 2004 aplicaram, na tentativa de estabilização de um solo argiloso, que tinha como principal mineral em sua composição a ilita, uma solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) nos eletrodos anodos e uma solução de silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) nos eletrodos catodos. Os resultados obtidos por eles demonstraram que, após 27 dias de aplicação de um potencial que variou entre 4 a 50 V, foi detectada a formação de silicato hidratado de cálcio (CSH).

Já Shang *et al.* (2004) utilizou soluções de  $\text{CaCl}_2$  e de  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  afim de proporcionar maior capacidade de suporte a um solo calcário oriundo de alto mar. O autor frisa que os sais foram escolhidos devido à alta solubilidade em água e por serem agentes cimentantes. Ele observou que utilizando um campo elétrico de 25 V/m no período de 7 dias,

soluções contendo 15% de  $\text{CaCl}_2$  e 10%  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  apresentaram os melhores resultados e conclui afirmando que o tratamento eletroquímico pode ser aplicado na engenharia *offshore* para a estabilização das fundações instaladas em solos calcários com pouca capacidade de suporte.

## 2.5 CONE PENETRATION TEST (CPT)

De acordo com Barentsen (1936) *apud* Meigh (1987), a prática de cravar hastes no solo para determinar a sua resistência é bastante antiga, ainda anterior a 1917, quando começaram a ocorrer os primeiros aprimoramentos. Entretanto foi em 1934, na Holanda, que o CPT foi apresentado, passando por modificações até os dias atuais.

Nos Estados Unidos, o procedimento está normalizado de acordo com a ASTM D3441 (1986) e, no Brasil, pela ABNT MB-3406 (1991), tanto para o ensaio com medida de poropressões (CPTU), como para o ensaio sem essa medida (CPT). (GIACHETI & QUEIROZ, 2004).

O Cone Penetration Test (CPT) é um ensaio difundido para caracterização de substratos. A popularidade do CPT para explorações subterrâneas deve-se à sua confiabilidade, rapidez, economia, a continuidade do perfil e da quantidade de informações que podem ser obtidas a partir de um único teste. (TUMAY & KURUO, 2001)

O CPT tem quatro funções principais: (i) a identificação do perfil e os tipos de solos presentes nele; (ii) fazer a interpolação dos dados obtidos com o controle da cravação; (iii) avaliar os parâmetros de engenharia dos solos e (iv) avaliar a capacidade de comportamento após receber uma carga. (MEIGH, 1987).

O ensaio consiste na cravação de uma ponteira cônica que é conectada à extremidade de um conjunto de hastes, sendo introduzida no solo a uma velocidade constante igual a 2 cm/s. O cone tem vértice de  $60^\circ$  e um diâmetro típico de 35,68 mm (que corresponde a uma área de  $10 \text{ cm}^2$ ). O diâmetro das hastes é igual ou menor ao diâmetro do cone. Durante o ensaio, a resistência à penetração da ponta do cone é medida constantemente. Também é medida a resistência de penetração de uma luva de atrito, que é alojada logo atrás do cone. (MONDELLI, 2004).

O *Cone Penetration Test* (CPT) é executado introduzindo no solo um penetrômetro com uma ponta cônica, o qual é cravado a uma velocidade constante até atingir o impenetrável ou até a cota de interesse. Os sistemas de reação para cravação do penetrômetro, em terra firme, geralmente são os caminhões. Já em campanhas realizadas no mar, o CPT é executado enviando até a sub-superfície do oceano uma plataforma da qual o penetrômetro é introduzido no solo. (RODRIGUES, 1993).

Ainda o mesmo autor afirma que o parâmetro mais importante obtido através do CPT é a resistência de ponta à sua penetração. Essa resistência à penetração reflete o estado físico e as características da massa de solo. O comportamento mecânico de uma massa de areia pode ser definido quantitativamente desde que seja conhecido o estado físico da massa de solo e as propriedades físicas do material que compõe as partículas da areia.

Ao cravar-se um cone em um solo arenoso, ocorre em seus arredores uma mudança do estado inicial de compactidade. Em areias onde a densidade relativa é baixa, o solo tende a ser compactado, sendo que o inverso ocorre em areias com densidades relativas altas.

Alguns parâmetros devem ser considerados durante a realização do ensaio, uma vez que estes podem influenciar veementemente nos resultados: a verticalidade do conjunto, a calibração dos sensores, as referências para saber a profundidade e ainda a velocidade uniforme de cravação.

Além do cone padrão, que é largamente conhecido pela comunidade geotécnica, o *Louisiana Transportation Research Center* desenvolveu um mini-cone. Este possui um diâmetro de 12,7 mm, uma luva de atrito de 150 mm e sua velocidade constante de cravação é de 20 mm/s. O dispositivo de movimentação contínua de penetração, desenvolvido no sistema CIMCPT (*Continuous Intrusion Miniature Cone Penetration Test*), minimiza os efeitos de tensão normal e do adensamento, que ocorrem freqüentemente em resultados de ensaios de cone padrão, observados durante a penetração contínua no solo. Esse equipamento foi desenvolvido para ser aplicado em ensaios da área de pavimentação em trechos inacabados e mesmo nos já concluídos sem mobilizar grandes equipamentos. Devido a sua restrição de prospecção (12 m), não é recomendado para grandes fundações. (GIACHETI & QUEIROZ, 2004).

De acordo com Tumay & Kurup (1999), após a realização de uma série de testes *in situ*, há um fator de correção para a utilização de resultados de resistência de ponta de mini-

cones (2 cm<sup>2</sup>) para cones padrão (10 cm<sup>2</sup>). O fator é de 0,85 e o valor corrigido pode ser obtido através da Equação 2.16.

$$q_{c(10 \text{ cm}^2)} = 0,85 \times q_{c(2 \text{ cm}^2)} \quad (2.16)$$

Além da utilização citada anteriormente, os mini-cones podem ser empregados em várias outras situações. Uma das opções é a sua aplicação para fazer simulações em centrífugas. No entanto, de acordo com Bolton *et al.* (1993) *apud* Gui & Bolton (1998), para a interpretação desses resultados, em geral, a resistência de ponta ( $q_c$ ) deve ser normalizada em relação à tensão efetiva ( $\sigma_v'$ ) e a profundidade de prospecção ( $pp$ ) em relação ao diâmetro do cone ( $B$ ).

Outra possibilidade de utilização foi relatada na Austrália por Joer *et al.* (1995), onde o mini-cone foi utilizado para simular prospecções de cone padrão em diferentes formações de solos calcários, facilmente encontrados em obras *offshore* naquele país. O mini-cone era cravado em uma célula triaxial modificada e, através de variações no tamanho da amostra e na tensão confinante, era possível investigar as influências das condições de contorno e também do nível de tensões sobre a resistência de ponta.

De acordo com os dados apresentados, fica claro que a aplicabilidade de mini-cones no desenvolvimento de atividades geotécnicas possui grande importância para o enriquecimento do estado da arte em várias subáreas ligadas à geotecnia.

## **3 PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

O programa experimental desta pesquisa foi dividido em três partes: a primeira remeteu-se à fase de projeto, aquisição de aparelhos eletroeletrônicos, materiais e montagem das células eletrocinéticas; a segunda caracterizou-se pelo projeto, montagem, calibração e ensaios preliminares de um *Miniature Cone Penetration Test* (MCPT), o qual apresentava dimensões reduzidas em relação aos aparelhos utilizados comumente; por fim, a última etapa foi composta pelos ensaios de prospecção anteriores à aplicação da técnica de eletrocinética, pela aplicação da técnica propriamente dita associada às injeções de soluções químicas para promover a estabilização do solo e, novamente através do equipamento de prospecção, a realização dos ensaios para determinação do ganho de resistência mecânica obtido pelo solo.

### **3.2 MATERIAIS**

Os materiais e equipamentos que foram utilizados na montagem das células eletrocinéticas não possuem grandes peculiaridades quanto as suas características, entretanto, foram utilizados com os seus cuidados mínimos para que não alterassem as suas condições iniciais e nem sofressem avarias. Ocasão diferenciada ocorreu durante a aquisição e manuseio dos materiais e equipamentos utilizados na fabricação do MCPT, os quais, devido às suas pequenas dimensões, receberam cuidados especiais.

Nos itens seguintes, serão apresentadas as informações básicas a respeito dos materiais utilizados nesta pesquisa. Será dada maior importância às características que de alguma forma poderiam influenciar no desfecho do trabalho.

#### **3.2.1 Nobreak**

Para que os ensaios não fossem prejudicados pelas faltas e oscilações de energia elétrica, foi utilizado um *nobreak* da marca SMS, modelo Net Station de 600 VA. Sua bateria



possuía uma expectativa relativa ao tempo de autonomia de 20 minutos operando com três fontes de bancada conectadas a ele.

### 3.2.2 Fonte de alimentação

Foram utilizadas fontes de alimentação simples e digitais da marca Minipa (de bancada), cujo modelo é o MPL-1303. Tais fontes possuíam dois displays de 3 dígitos (tensão e corrente) sendo capaz de fornecer uma saída variável com tensão de 0 a 30 V constante e corrente de 0 a 3 A também constante. Possuíam ajuste grosso e fino tanto para tensão como para corrente, além de proteção de sobrecarga e inversão de polaridade.

### 3.2.3 Multímetro

Foi utilizado um multímetro digital da marca Minipa a fim de medir as quedas de tensão ocasionadas pelas mudanças de resistência elétrica dos materiais transpostos pela diferença de potencial. Essas medidas foram importantes para verificar qual era a real diferença de potencial que estava sendo aplicada ao solo, visto que a oxidação e a redução dos eletrodos poderiam prejudicar a condução da corrente elétrica.

Para que não houvesse diferenças entre os pontos medidos nas várias células eletrocinéticas, foi confeccionado um pequeno dispositivo composto por um pedaço de eletroduto e pequenos pedaços de fio de cobre. Esse dispositivo garantiu que as medições ocorressem sempre na mesma posição e na mesma profundidade em todas as células eletrocinéticas. Assim foram realizadas medições em cinco pontos entre os eletrodos catodos e anodos, todos equidistantes. A Figura 3.1 mostra o dispositivo confeccionado e ainda a medição sendo realizada.



Figura 3.1: Dispositivo para medida de tensões.

### 3.2.4 Caixas acrílicas

As caixas constituintes das células eletrocinéticas foram confeccionadas em acrílico, sendo utilizada resina acrílica para a ligação das peças. Esse cuidado especial justifica-se devido à necessidade de essas caixas terem de suportar pHs extremos.

As chapas de acrílico utilizadas na confecção das caixas possuíam uma espessura de 8 mm. As caixas possuíam dimensões internas de 478 mm x 278 mm e uma altura de 320 mm. Com essas dimensões, elas apresentavam mínimas folgas para encaixarem em seus reforços metálicos, projetados para garantir rigidez ao sistema.

### 3.2.5 Reforços metálicos para as caixas acrílicas

Os reforços metálicos das caixas de acrílico, como já mencionado anteriormente, serviram para dar rigidez e prolongar a vida útil delas. Caso não fossem utilizados, ao colocar-se solo no interior das caixas, suas paredes iriam abaular promovendo uma concentração de esforços em suas arestas, as quais possuíam maior fragilidade por serem coladas, possivelmente gerando vazamentos.

Eles foram confeccionados com cantoneiras metálicas 7/8' x 1/8' e ferros chatos de 1' x 3/16'. As cantoneiras foram utilizadas em todas as arestas, sendo que, na parte superior das caixas, as abas foram voltadas para a sua parte externa, a fim de facilitar a ancoragem do MCPT. Já os ferros chatos foram utilizados para os reforços laterais e de fundo. A Figura 3.2 mostra o sistema já montado (caixa acrílica com os reforços metálicos).



Figura 3.2: Caixa acrílica com os reforços metálicos.

### 3.2.6 Tubos de PVC e geotêxtil

Os tubos de PVC – DN 40 mm foram cortados em pedaços de 290 mm de comprimento. Estes foram repletos de furos com 10 mm de diâmetro em toda a sua parede, conforme a Figura 3.3 (A). Nas posições 2/6 e 5/6 do comprimento dos tubos, foram dispostos dois pedaços do próprio tubo que promoviam a ligação de lados opostos de suas paredes, entretanto não obstruíam a passagem de líquidos. No centro dessas ligações, foi feito um orifício com 10 mm de diâmetro para que fosse possível introduzir o eletrodo, fixando e centralizando-o em relação ao diâmetro do tubo. (Fig. 3.3 (B)).

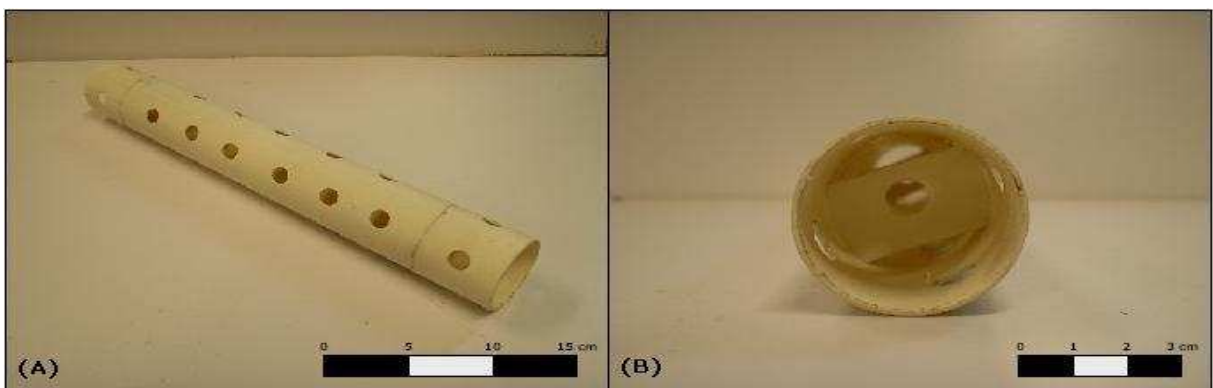


Figura 3.3: TUDO de PVC - (A) vista dos furos na parede do tubo e (B) vista do encaixe do eletrodo.

Com as suas paredes já furadas e as ligações fixas, os tubos foram cobertos por um geossintético para evitar a entrada de solo em seu interior, porém permitindo a saída de líquidos. (Figura 3.4 (A) e (B)).

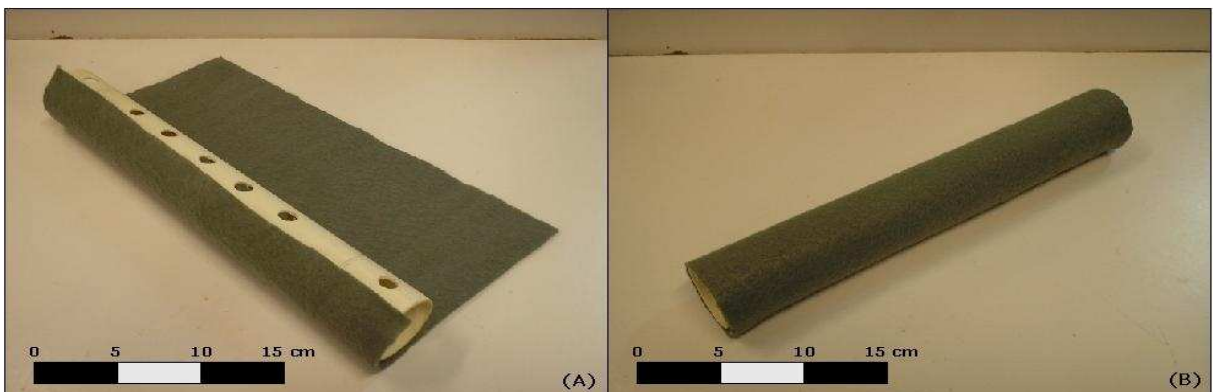


Figura 3.4: Drenos - (A) cobertura do tubo pelo geotêxtil e (B) dreno pronto.

O geossintético utilizado na cobertura dos tubos de PVC foi um geotêxtil da marca Bidim. Trata-se de um geotêxtil não tecido 100% poliéster fabricado pelo processo *spunweb* e consolidado por agulhagem, o que confere ao produto as propriedades hidráulicas, mecânicas e de durabilidade para poder desempenhar as devidas funções.

Os drenos foram confeccionados para que realizassem a função de um recipiente, cujo interior serviria para alojar o eletrodo e para distribuição das soluções que seriam adicionadas ao solo. O fato de os tubos terem comprimento inferior ao dos eletrodos pode ser explicado pela tentativa de minimização de contato das conexões dos eletrodos com líquidos, dificultando as reações de oxidação e redução nesses pontos.

### 3.2.7 Cabos elétricos

Foram utilizados cabos elétricos antichamas para a condução da corrente elétrica da fonte até os eletrodos. Eles possuem uma seção de  $0,75 \text{ mm}^2$  e 2,5 m de comprimento, permitindo assim o distanciamento da fonte em relação à célula eletrocinética.

### 3.2.8 Eletrodos

Foram utilizados eletrodos de uma liga de titânio e de aço carbono. Os eletrodos de titânio foram confeccionados com uma barra de 300 mm de comprimento e 10 mm de diâmetro, onde em uma de suas extremidades existia um parafuso para promover a ligação dos cabos elétricos a eles. Inicialmente, optou-se por utilizar esses eletrodos em virtude de sua resistência à corrosão, apesar de seu elevado custo. A Figura 3.5 (A) mostra um eletrodo de titânio utilizado e a Figura 3.5 (B) o eletrodo posicionado no interior de um dreno.

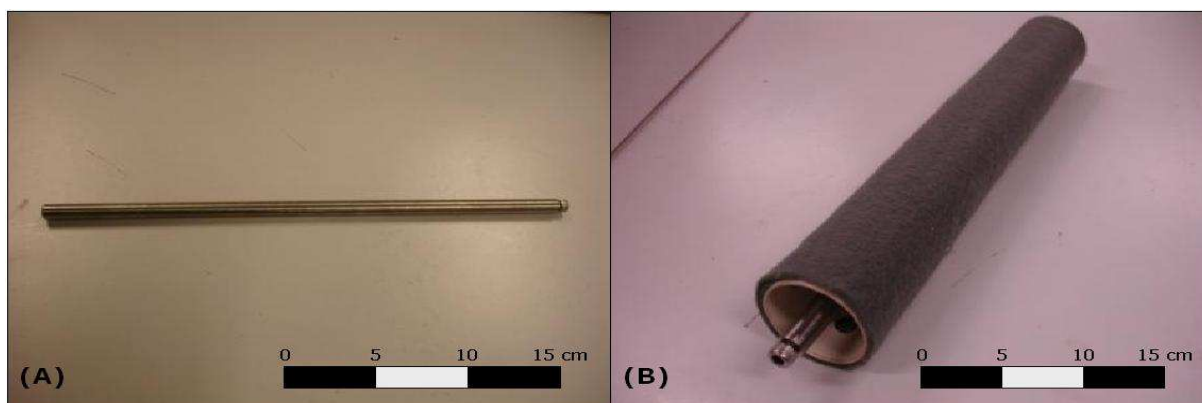


Figura 3.5: Eletrodos de titânio - (A) eletrodo e (B) eletrodo posicionado no interior dos drenos.

Os eletrodos de aço carbono eram bastante parecidos com os eletrodos de titânio, possuíam 300 mm de comprimento e 9 mm de diâmetro. Eram diferenciados apenas pelo modo de conexão do cabo elétrico, entretanto, ambas as conexões surtiam o mesmo efeito. Sua utilização pode ser embasada na tentativa de obter resultados diferenciados dos obtidos com os eletrodos citados anteriormente. A Figura 3.6 (A) mostra um eletrodo de aço carbono utilizado e a Figura 3.6 (B) o eletrodo posicionado no interior de um dreno.

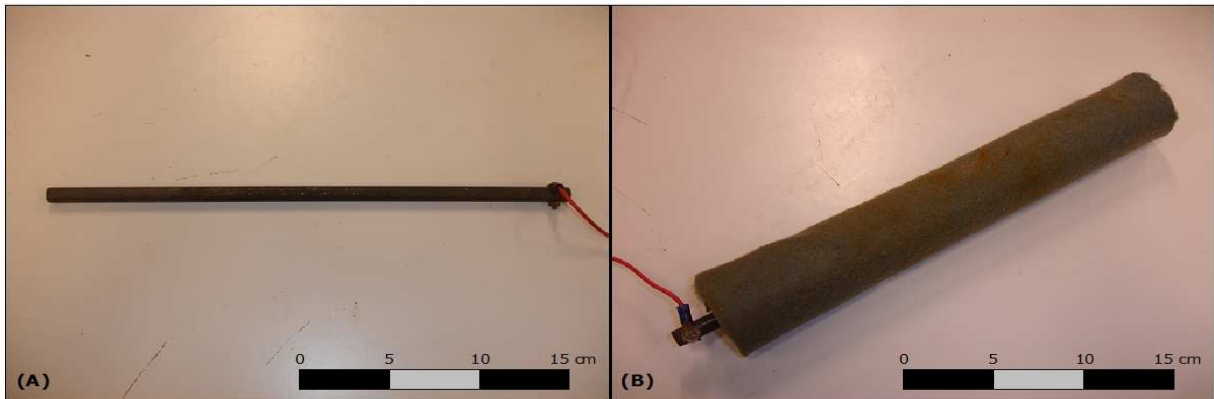


Figura 3.6: Eletrodos de aço carbono - (A) eletrodo e (B) eletrodo posicionado no interior dos drenos.

### 3.2.9 Solo

O solo utilizado foi areia proveniente do Município de Osório/RS, por ser um material vastamente estudado LEGG/ENVIRONGEO.

Essa areia possui várias propriedades semelhantes às das areias utilizadas em pesquisas na prática internacional. É classificada como uma areia fina quartzosa, proveniente de depósitos praias marinhos e eólicos e de retrabalhamento eólico atual da região costeira do estado do Rio Grande do Sul, pertencendo ao Sistema Laguna-Barreira III. (SPINELLI, 1999).

De acordo com Tomazelli & Villwock (2005), a Laguna-Barreira III encontra-se muito bem reservada no presente e seu desenvolvimento foi responsável pela implantação final da Lagoa dos Patos. Os depósitos correlacionáveis à Barreira III estendem-se, de maneira quase contínua, ao longo de toda a planície costeira, desde Torres até o Chuí. Os sedimentos praias são compostos por areias quartzosas claras, finas, bem selecionadas, com estratificações bem desenvolvidas. As areias eólicas de cobertura apresentam uma coloração avermelhada e um

aspecto maciço, sendo que algumas vezes apresentam-se bioturbadas por raízes e, comumente, intercalam níveis centimétricos de paleossolos. Em vários locais ao longo da Barreira III, a remoção da cobertura vegetal - por processos naturais ou antrópicos - possibilitou a reativação dos processos eólicos. O Sistema Lagunar III envolveu um complexo de ambientes deposicionais instalados na região de retrobarreira. Nesse contexto, as fácies aí acumuladas são representadas principalmente por areias finas, siltico-argilosas, pobremente selecionadas, de coloração creme, com laminação plano-paralela e, freqüentemente, incluindo concreções carbonáticas e ferruginosas.

Segundo Casagrande (2005), esse material caracteriza-se por ser uma areia fina (NBR 6502 – ABNT, 1995; ASTM D 2487, 1993), limpa e de granulometria uniforme (Fig. 3.7) que, conforme Spinelli (1999), tem o quartzo como material correspondente a 99% da sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Não sendo observada a presença de matéria orgânica. A Tabela 03 apresenta algumas informações importantes ao desenvolvimento do trabalho.

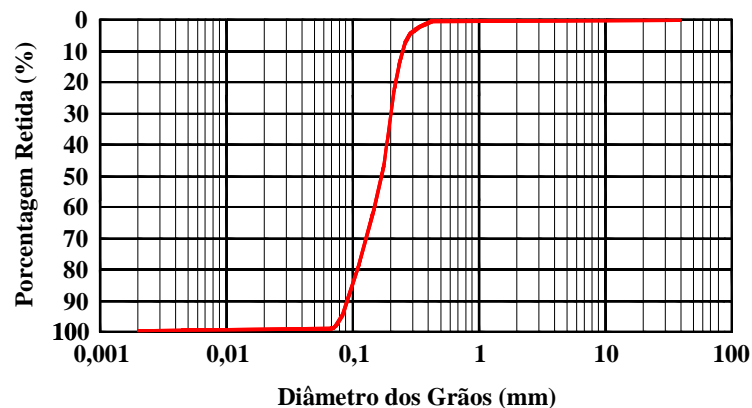


Figura 3.7: Curva granulométrica da areia de Osório.

Tabela 3.1: Índices físicos da areia de Osório. (adaptado de Casagrande, 2005).

Índices Físicos	Areia de Osório
Densidade real dos grãos ( $\gamma_s$ )	26,3 KN/m <sup>3</sup>
Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ )	2,1
Coefficiente de curvatura ( $C_c$ )	1,0
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	0,09 mm
Índice de vazios ( $e_{máximo}$ )	0,9
Índice de vazios ( $e_{mínimo}$ )	0,6

### 3.2.10 Cloreto de cálcio

O cloreto de cálcio anidro puríssimo, cuja fórmula é  $\text{CaCl}_2$  e o seu peso molecular de 110,99 g/mol, é um produto inorgânico que possui alta solubilidade em água ou álcool etílico. O cloreto utilizado no trabalho foi produzido pela empresa Vetec Química e conforme a própria empresa, possui as características apresentadas na Tabela 04.

Tabela 3.2: Características do  $\text{CaCl}_2$ .

Testes	Limites	Resultados
Cor	Branco	Branco
Aspecto	Higroscópico ou pó cristalino	Pó cristalino
Teor ( $\text{CaCl}_2$ )	Min. 96%	97,9%
Magnésio e sais alcalinos	Máx. 2%	0,05%

De acordo com a CETESB (2006), este é um sal inorgânico e a solubilidade máxima do produto (anidro) é 78,6 g/100ml de água a 25°C. Deve-se evitar o contato com a pele e com os olhos através de equipamentos de proteção individual, visto que o contato pode provocar queimaduras.

### 3.2.11 Silicato de sódio puro

O silicato de sódio puro, cuja fórmula é  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , é um sal inorgânico, miscível, levemente solúvel em água e possui peso molecular não definido. O silicato utilizado na pesquisa foi produzido pela empresa Vetec Química e, conforme a própria empresa, possui as características apresentadas na Tabela 04.

Tabela 3.3: Características do  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

Testes	Limites	Resultados
Cor	Branco	Branco
Aspecto	Higroscópico ou pó cristalino	Pó cristalino
Óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	20 – 30%	29,1%
Óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ )	20 – 30%	27,2%
Água ( $\text{H}_2\text{O}$ )	30 – 60%	41,1%

Visto ser considerado um produto corrosivo, deve ser manipulado com a utilização de equipamento de proteção individual. A proteção para as mãos deve ser feita com luvas de borracha em PVC ou látex, sendo a proteção ocular também necessária. Roupas normais em tecidos sintéticos ou algodão podem ser usadas na composição de indumentária, quando do manuseio da substância.

### **3.2.12 Bicarbonato de sódio**

O bicarbonato de sódio é um sal inorgânico de fórmula química  $\text{NaHCO}_3$ , cujo peso molecular é 84 g/mol. É um pó cristalino branco, inodoro e de sabor salgado, fracamente alcalino. É estável ao ar seco e decomposto por ar úmido ou por aquecimento. A sua decomposição começa lentamente a partir de 20°C, despreendendo dióxido de carbono a partir de 50°C ou ao entrar em contato com uma substância ácida. A 100°C converte-se em carbonato de sódio.

### **3.2.13 Água carbonatada**

Esta foi utilizada para a liberação de dióxido de carbono no solo. Optou-se por utilizar água carbonatada industrializada para que fosse mantido um padrão nas concentrações de  $\text{CO}_2$ , eliminando essa variável. A água carbonatada gaseificada que foi utilizada era da empresa Água Mineral Sarandi.

A água carbonatada, cuja fórmula é  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , é quimicamente denominada de ácido carbônico e sua formação ocorre ao diluir-se  $\text{CO}_2$  em  $\text{H}_2\text{O}$ . O baixo poder de dissolução desse gás na água faz com que rapidamente ocorra a saturação da mesma, exigindo para a composição da água carbonatada comercial que nos é fornecida a sua saturação sob altas pressões e/ou baixas temperaturas.

### **3.2.14 Água destilada**

Água destilada foi utilizada em todos os ensaios, tanto na preparação das soluções químicas que eram adicionadas ao solo como para umedecer o solo para a moldagem dos corpos de prova.

### **3.2.15 Miniature Cone Penetration Test (MCPT)**

Para que fosse possível determinar a resistência do solo, anteriormente e posteriormente a aplicação da técnica de eletrocinética associada à injeções químicas, foi desenvolvido um



*Cone Penetration Test* (CPT) com dimensões reduzidas e portanto intitulado *Miniature Cone Penetration Test* (MCPT) (Fig. 3.8).

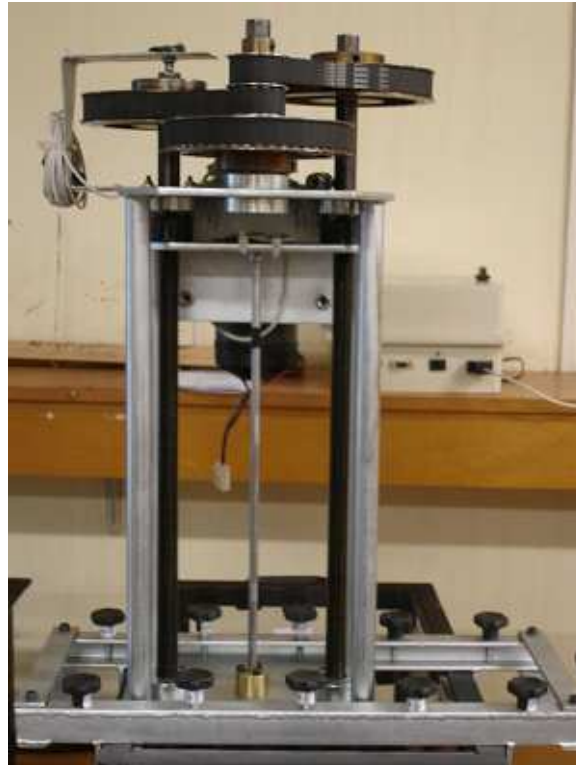


Figura 3.8: *Miniature Cone Penetration Test*.

Devido às suas pequenas dimensões, o único dado obtido por meio dele era a resistência de ponta ( $q_c$ ), o que era suficiente para atender as exigências mínimas da pesquisa. Cabe lembrar que a principal justificativa de o MCPT possuir as suas devidas dimensões foi a necessidade da cravação não interferir de forma abrupta no corpo de prova.

Em tempo, é válido mencionar que o equipamento desenvolvido nesta dissertação pode ser utilizado para correlacionar ensaios de resistência a compressão simples com ensaios de prospecção.

O MCPT é composto por duas partes: o cone (ponteiras e hastes) propriamente dito e o sistema de cravação.

### 3.2.15.1 Ponteira

A ponteira e as hastes possuíam um diâmetro de 8 mm e foram confeccionadas em aço inox AISI 420, o qual geralmente é utilizado na fabricação de peças onde há necessidade de

resistência mecânica aliada à ductilidade e resistência à corrosão. A Figura 3.9 mostra em corte o esboço da ponteira.

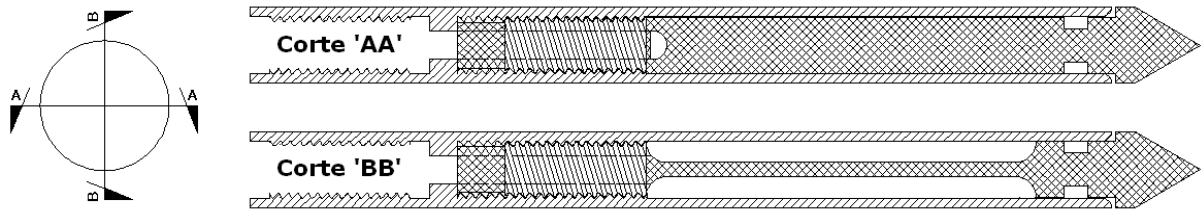


Figura 3.9: Cortes da ponteira do MCPT.

A ponteira era uma peça bastante delicada principalmente devido as suas pequenas dimensões. Em um dos extremos, possuía um cone em ângulo de  $60^\circ$ , o qual seria a extremidade penetrante ( $0,5 \text{ cm}^2$ ). Logo após, entre outros detalhes, existia uma cavidade para alocação de um o’ring que garantiu a estanqueidade no interior da ponteira. Continuando, na parte média, existia uma superfície plana com 1,5 mm de espessura e aproximadamente 40 mm de comprimento, o que determinava o ponto de maior fragilidade do sistema e conseqüentemente o limite máximo de carga que ela poderia receber. A existência dessa superfície esbelta é fundamentada na necessidade de uma superfície plana para colagem dos extensômetros. E por fim, na outra extremidade, existia uma rosca “macho” a fim de que ocorresse o seu acoplamento com a sua luva, o que garantiria a integridade da instrumentação. A Figura 3.10 apresenta uma ilustração da ponteira.

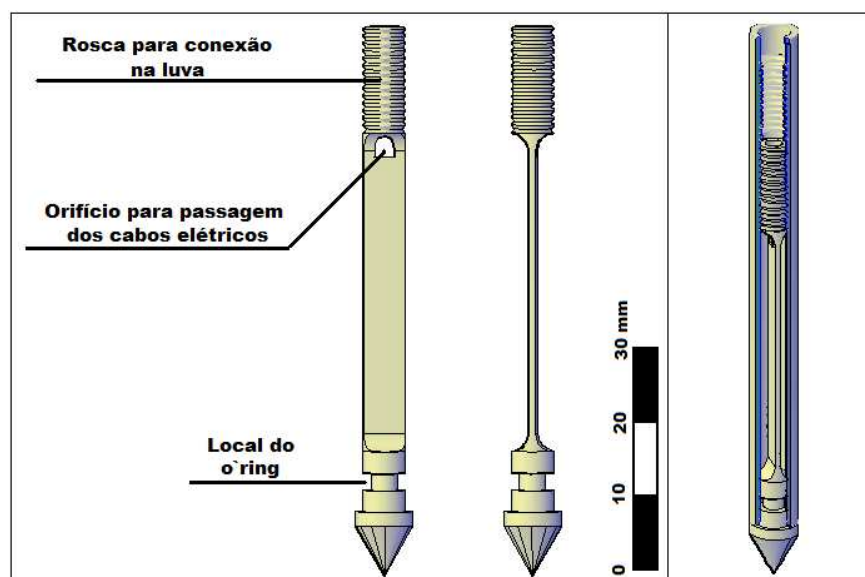


Figura 3.10: Ponteira do MCPT.

Para confecção da célula de carga, a ponteira que estava finalizada - e de acordo com o projeto especificado - foi preparada para a colagem dos extensômetros.

Os extensômetros utilizados são os PA-06-062TG-350LEN, fornecidos pela empresa Excel Sensores. O código dos extensômetros descreve as seguintes características: PA – base de poliamida com filme metálico de constantan; 06 – auto compensação de temperatura para aço; 062 – comprimento ativo da grelha; TG – forma geométrica: roseta dupla a 90°; 350 – resistência elétrica (ohms); LEN – encapsulados com fio de cobre. A colagem dos mesmos foi feita seguindo as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante e com o adesivo adquirido juntamente a ele.

Como já aludido anteriormente, a ponteira realizava coleta de dados apenas em sua ponta e podia transpor solos com resistência máxima de 10 MPa, limitada pela fragilidade da ponteira e das roscas das hastes. Os projetos da ponteira estão apresentados nos apêndices, pranchas 01 e 02.

### **3.2.15.2 Sistema de cravação**

O sistema de cravação possuía a sua estrutura confeccionada em aço carbono sendo as ligações entre as peças soldadas, aparafusadas ou encaixadas. Pode ser basicamente dividido em três partes: a primeira, na parte mais alta, uma chapa metálica de 6 mm de espessura, que possuía como função a fixação do motor e a promoção do encaixe dos fusos; a segunda parte - o corpo do sistema - era composta por quatro tubos metálicos que promoviam a sustentação da primeira parte, dois fusos de 20 mm de diâmetro e passo 2,5 mm com rosca trapezoidal, além de uma pequena chapa de aço carbono de 6 mm de espessura que promovia a ligação entre os dois fusos. Cabe lembrar que, na ligação da chapa com os fusos havia porcas metálicas aparafusadas nas chapas; a terceira e última parte - a base do sistema - também possuía uma chapa metálica de 6 mm de espessura que desempenhava a função de sustentar todo o sistema - manter em seus lugares os fusos e ainda direcionar o MCPT. Para o direcionamento do MCPT, foi confeccionada uma peça em latão com um furo central, aonde o conjunto ponteira/haste transpassava com uma pequena folga. A confecção em latão é justificada por esse material ser mais maleável do que o aço inoxidável utilizado na execução do MCPT, conseqüentemente a peça que iria desgastar-se ao longo do tempo seria ela e não o corpo do MCPT. A Figura 3.11 apresenta uma visão tridimensional do equipamento descrito. Os projetos estão apresentados nos Apêndices, pranchas 03, 04 e 05.

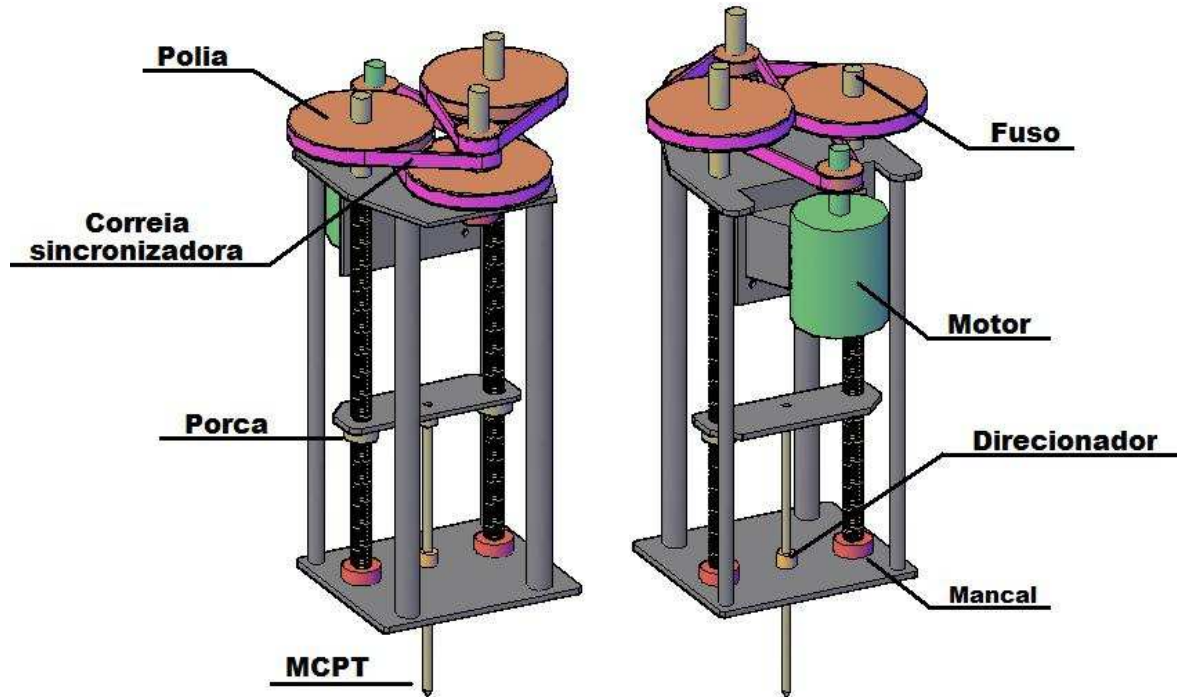


Figura 3.11: MCPT e sistema de cravação.

O conjunto descrito anteriormente era encaixado em uma peça metálica, que possibilitava a movimentação, tanto longitudinalmente como perpendicularmente, sobre a devida célula eletrocinética, permitindo assim que fossem realizados ensaios de prospecção em qualquer ponto. (Apêndices, prancha 06).

O sistema ainda dispunha de um motor trifásico de corrente contínua de 1,2 HP, disposto na parte superior do equipamento e com uma rotação que variava de 0 a 4000 RPM, sendo controlado através de um potenciômetro. O painel que continha o potenciômetro ainda era munido de uma chave inversora que controlava o sentido da rotação do motor e, conseqüentemente, a cravação e a retirada do conjunto ponteira/haste do solo.

Os fusos que proporcionam a transferência de força para a cravação do conjunto foram presos às chapas, parte inferior e parte superior, através de mancais que continham em seu interior um rolamento que permitia a sua revolução com um baixo atrito. Os fusos foram prensados nos rolamentos impedindo o seu deslocamento vertical.

A transferência do torque do motor para os fusos foi feita através de conjuntos de engrenagens sincronizadas, que promoviam uma redução de sete vezes na rotação do motor e, dessa forma, multiplicavam expressivamente o torque. A redução da velocidade foi realizada

pela necessidade de executar cravações do MCPT a velocidades entorno de 1 mm/s. O aumento do torque foi de tamanha importância para poder transpor substratos com rigidez considerada elevada para o equipamento (acima de 8 MPa).

Na tentativa de registrar a profundidade do cone, foi acoplado a um dos fusos um potenciômetro rotativo linear sem fim de curso. Esse potenciômetro deveria emitir pulsos que representariam o número de rotações realizadas pelo fuso. Como estes elementos possuíam um passo de 2,5 mm, através do número de rotações seria possível obter uma precisão milimétrica da prospecção da ponteira. Contudo, devido a um problema ocorrido na porta da placa de aquisição de dados que deveria fazer a leitura do sinal do mesmo, este não apresentou um bom funcionamento. Dessa forma, foi admitida uma velocidade linear durante a cravação, registrando-se o tempo de cravação e conhecendo-se o percurso.

Devido à falta de sensibilidade do *software Fieldchart*, utilizado para coleta de dados, o sinal gerado pelos extensômetros teve que ser amplificado. A amplificação foi realizada através de uma placa confeccionada no próprio laboratório, utilizando AmpOps, resistores e capacitores. Após essa etapa concluída, o registro dos dados fornecidos pelos extensômetros foi feito através de uma placa de aquisição ligada a um microcomputador.

### **3.3 MÉTODOS**

Os métodos foram divididos em montagem da célula eletrocinética, programa de ensaios responsável pelas respostas almeçadas ao final da pesquisa e ensaios preliminares e de calibração

#### **3.3.1 Montagem da célula eletrocinética**

A configuração básica de uma célula eletrocinética era formada pelos seguintes materiais: uma caixa acrílica com o seu reforço metálico, seis tubos de PVC devidamente cobertos com o geotêxtil, seis eletrodos, uma fonte de bancada, solo necessário para atingir a cota desejada na célula, além de dois conjuntos de cabos elétricos promovendo a ligação entre os eletrodos e a fonte. Uma ilustração da célula eletrocinética pode ser verificada na Figura 3.12.

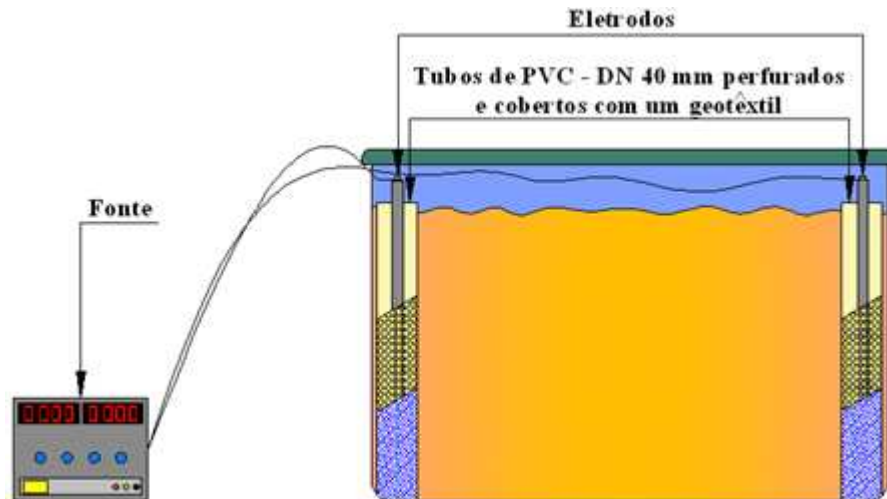


Figura 3.12: Ilustração de uma célula eletrocinética.

Os ensaios foram realizados, sempre que possível, em três unidades simultâneas, na tentativa de minimização de variáveis ocasionadas pelos fatores ambientais e pela possibilidade de execução de um maior número de ensaios num curto espaço de tempo, com exceção dos ensaios preliminares.

Na execução dos ensaios, foi mantida sempre a mesma densidade relativa do solo variando os reagentes, as concentrações e as proporções das soluções, a corrente e tensão aplicadas e ainda o tempo de exposição do solo à técnica. Cabe lembrar que as concentrações das soluções utilizadas nunca superaram a capacidade de dissolução do soluto em água.

A escolha das intensidades da voltagem e da corrente elétrica foi baseada em pesquisas já realizadas (ALSHAWABKEH & SHEAHAN, 2003; BARKER *et al.* 2004; ZHUANG & WANG, 2007; AZZAM & OEY, 2001a), na capacidade de fornecimento da fonte e também visando à minoração dos custos energéticos.

### 3.3.2 Execução dos ensaios

Os ensaios foram realizados no Laboratório LEGG/ENVIRONGEO no campus Centro da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Inicialmente foram preparadas as soluções correspondentes as células a serem realizadas. Para a preparação, foram adotados os equipamentos de segurança individual básicos, visto a periculosidade de alguns sais e ainda em virtude de algumas reações serem de dissociação exotérmica. A dissolução dos solutos

para a composição das soluções foi realizada em água destilada, sendo a solução pronta mantida em local ventilado até atingir a temperatura ambiente.

Para o início da montagem das células eletrocinéticas, foi disponibilizada uma bancada onde havia espaço suficiente para dispor as três células eletrocinéticas juntamente com as fontes, de acordo com a ilustração apresentada anteriormente. Havia um cuidado para que as células fossem mantidas a uma distância de cerca de 500 mm entre elas, facilitando a sua montagem/desmontagem e a execução dos ensaios de prospecção. Os eletrodos foram dispostos como no referido projeto, sendo de 100 mm a distância entre os de mesma polaridade e de 400 mm entre os de polaridades opostas, como citado por Acar & Alshawabkeh (1996).

Inicialmente foram ligados os eletrodos à fonte através dos cabos elétricos, respeitando as suas devidas polaridades. Após, os eletrodos foram centralizados no interior dos tubos de PVC cobertos pelo geotêxtil. Esses tubos foram posicionados nos seus devidos lugares obedecendo às distâncias citadas anteriormente. Para a fixação dos tubos ao fundo das caixas, foi utilizado cola de silicone.

Com os eletrodos posicionados, encheram cuidadosamente a caixa acrílica, com o intuito de que não houvesse movimentação dos mesmos. Cada célula foi preenchida com três camadas de solo, sendo que a massa de cada uma delas foi calculada para que no final apresentasse a densidade desejada. A compactação da areia foi realizada com um soquete de madeira nos pontos de difícil acesso e com um soquete metálico de maior diâmetro nos outros pontos, sendo que a energia de compactação não foi considerada para se atingisse a cota de interesse. Ao final, a célula eletrocinética possuía uma altura de solo igual a 280 mm de solo. A Figura 3.13 apresenta a preparação de um corpo de prova para posterior aplicação da técnica de eletrocinética (1 – adição de água ao solo; 2 – homogeneização; 3 – compactação; 4 – primeira camada finalizada; 5 – segunda camada finalizada; 6 – corpo de prova finalizado).

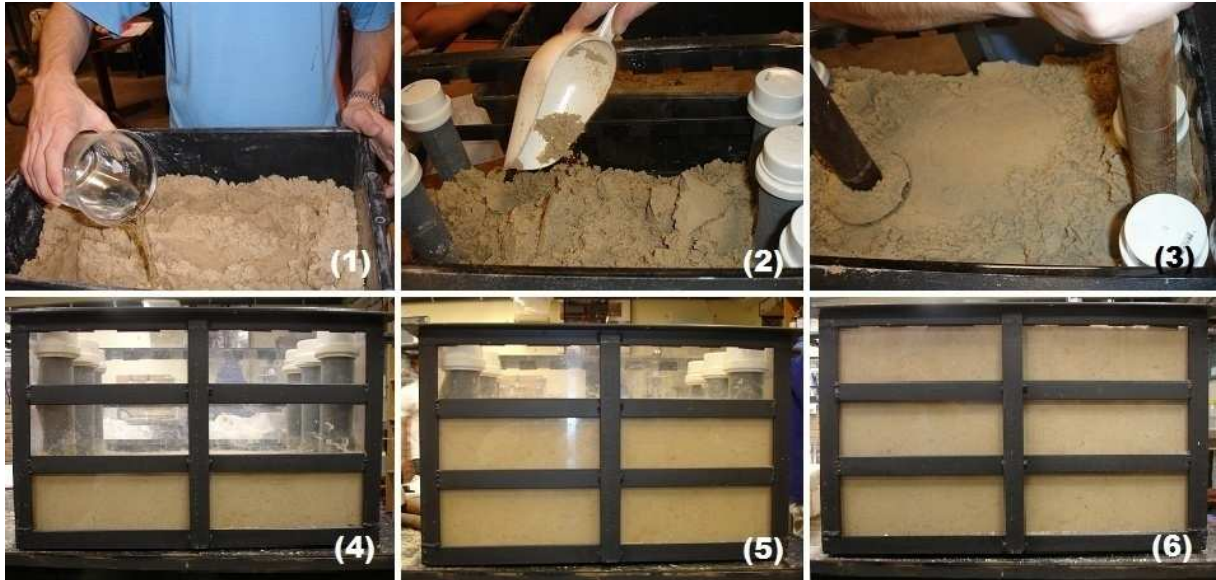


Figura 3.13: Preparação do corpo de prova de uma célula eletrocinética.

Todas as caixas foram moldadas com uma densidade relativa de 50%, o que gerou um peso específico aparente seco do solo de  $15 \text{ kN/m}^3$ . Com as soluções em temperatura ambiente, no início de cada experimento procurou-se atingir o nível mais alto possível de saturação e, almejando a sua uniformidade, foram adicionados todos os dias volumes das soluções respectivas de cada célula. Esses volumes variaram de acordo com a temperatura ambiente a qual a célula estava exposta, visto que este fator era o responsável pela sua evaporação.

Com todas as etapas anteriores realizadas, foi montado o sistema de cravação do MCPT sobre a célula eletrocinética. Foram feitas três prospecções com velocidade em torno de  $1 \text{ mm/s}$  nos pontos indicados na Figura 3.14.

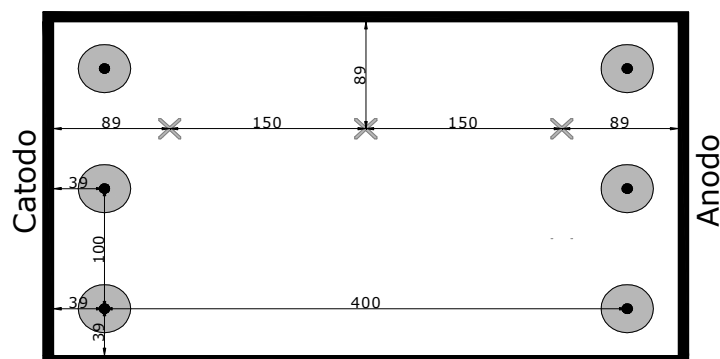


Figura 3.14: Locais dos ensaios de prospecção anteriores à aplicação da técnica de eletrocinética.



Finalizados os ensaios de prospecção, a fonte foi ligada obedecendo aos níveis de tensão e corrente elétrica pré-estabelecidos e, a partir desse momento, contabilizou-se o tempo para o término do experimento. Tanto a tensão como a corrente elétrica foram conferidas a cada 24 horas. Passado esse período, foram realizados outros 3 ensaios de prospecção para determinar se houve ganhos de resistência mecânica por parte do solo nos locais indicados pela Figura 3.15.

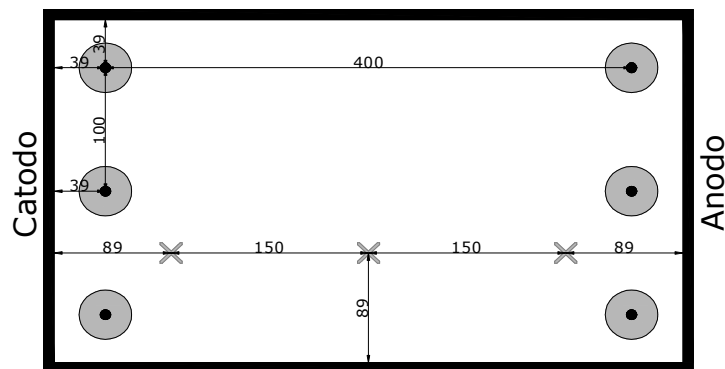


Figura 3.15: Locais dos ensaios de prospecção posteriores à aplicação da técnica de eletrocinética.

### 3.3.3 Programa de realização das células eletrocinéticas

Os experimentos foram realizados alternando as condições de tempo de exposição à técnica de eletrocinética, a concentração e as proporções das soluções, o número de ensaios de prospecção, a diferença de potencial, além da corrente elétrica. A Tabela 05 mostra um resumo das variáveis de cada célula.

Tabela 3.4: Resumo das variáveis de cada célula.

<i>Célula</i>	<i>Duração</i> (dias)	<i>Material do eletrodo</i>	<i>Número de ensaios de prospecção</i>	<i>Tensão</i> (V/m)	<i>Corrente elétrica</i> (mA/cm <sup>2</sup> )	<i>Soluções adicionadas</i>					
						<i>Anodo</i>	<i>Concentração</i> (g/l)	<i>Proporção</i>	<i>Catodo</i>	<i>Concentração</i> (g/l)	<i>Proporção</i>
C_E_01	7	Titânio	6	22,0	1,75	Cloreto de cálcio	147,01	1/2	Água carbonatada	-----	1/2
C_E_02	7	Titânio	11	55,0	2,25	Cloreto de cálcio	294,02	1/2	Água carbonatada	-----	1/2
C_E_03	7	Aço carbono	6	44,0	1,5	Cloreto de cálcio	220,51	2/3	Água carbonatada	-----	1/3
C_E_04	10	Aço carbono	12	44,0/55,0	1,5/1,87	Cloreto de cálcio	294,02	1/3	Água carbonatada	-----	2/3
C_E_05	21	Aço carbono	11	60,0	2,0	Cloreto de cálcio	110,99	1/2	Silicato de sódio	120,00	1/2
C_E_06	14	Aço carbono	9	-----	-----	Cloreto de cálcio	110,99	1/2	Silicato de sódio	120,00	1/2
C_E_07	7	Aço carbono	6	60,0	2,0	Cloreto de cálcio	110,99	1/2	Silicato de sódio	120,00	1/2
C_E_08	7	Aço carbono	6	30,0	1,75	Cloreto de cálcio	110,99	1/2	Silicato de sódio	120,00	1/2
C_E_09	7	Aço carbono	6	60,0	2,0	Cloreto de cálcio/Silicato de sódio	110,99 / 120,00	1/2	Silicato de sódio/ Cloreto de cálcio	120,00 / 110,99	1/2

C_E_10	7	Aço carbono	6	30,0	1,75	Cloreto de cálcio/ Silicato de sódio	110,99 / 120,00	1/2	Silicato de sódio/ Cloreto de cálcio	120,00 / 110,99	1/2
C_E_11	7	Aço carbono	6	-----	-----	Cloreto de cálcio/ Silicato de sódio	110,99 / 120,00	1/2	Silicato de sódio/ Cloreto de cálcio	120,00 / 110,99	1/2
C_E_12	7	Aço carbono	6	60,0	2,0	Cloreto de cálcio/ Silicato de sódio	80,00 / 90,00	1/2	Silicato de sódio/ Cloreto de cálcio	90,00 / 80,00	1/2
C_E_13	7	Aço carbono	6	60,0	2,0	Bicarbonato de sódio	100	1/2	Cloreto de cálcio	110,99	1/2
C_E_14	7	Aço carbono	6	60,0	2,0	Água destilada	-----	1/2	Água destilada	-----	1/2

### 3.3.3.1 Modificações na realização das células

Durante a realização do programa experimental, devido a alguns problemas e a indagações que foram surgindo, ocorreram algumas mudanças na metodologia proposta no item 3.3.2. A seguir, serão listadas as alterações realizadas nas células eletrocinéticas.

#### 3.3.3.1.1 Célula eletrocinética 01 (C\_E\_01)

Nesta unidade, foi utilizada a metodologia proposta para execução das células sem nenhuma modificação.

#### 3.3.3.1.2 Célula eletrocinética 02 (C\_E\_02)

Nesta, além da metodologia proposta, foram realizados cinco ensaios de prospecção extras, justificados pela tentativa de observação do incremento de resistência do solo com o passar dos dias. Os pontos onde foram realizados os novos ensaios podem ser conferidos na Figura 3.16.

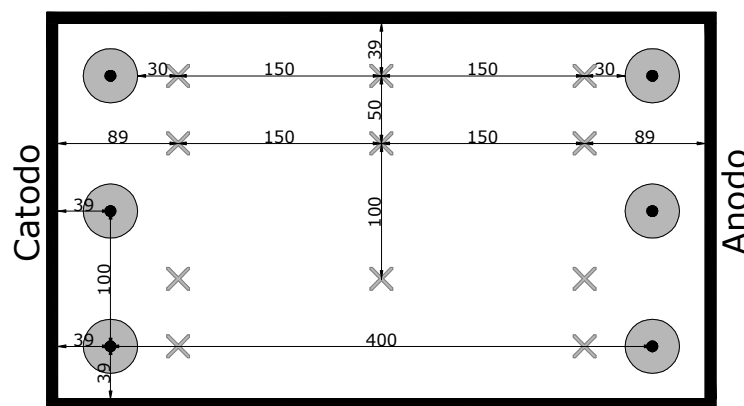


Figura 3.16: Locais dos ensaios de prospecção da C\_E\_02.

#### 3.3.3.1.3 Célula eletrocinética 03 (C\_E\_03)

Esta seguiu a metodologia proposta para execução das células, porém estabeleceu-se que a partir de então seriam substituídos os eletrodos de titânio por eletrodos de aço carbono em busca de resultados diferenciados. Outra alteração realizada foi a mudança nas proporções das soluções.

### 3.3.3.1.4 Célula eletrocinética 04 (C\_E\_04)

Nesta célula, em função da observação da formação do carbonato de cálcio próximo aos tubos de PVC durante a exumação da C\_E\_03, optou-se em fazer mais seis ensaios de prospecção próximos aos tubos, como mostra a Figura 3.17, para que fosse possível ter uma ordem de grandeza dos ganhos ocasionados pela formação desse agente cimentante. Além dessa modificação, optou-se por estender o tempo da célula por mais 3 dias, perfazendo um total de 10 dias.

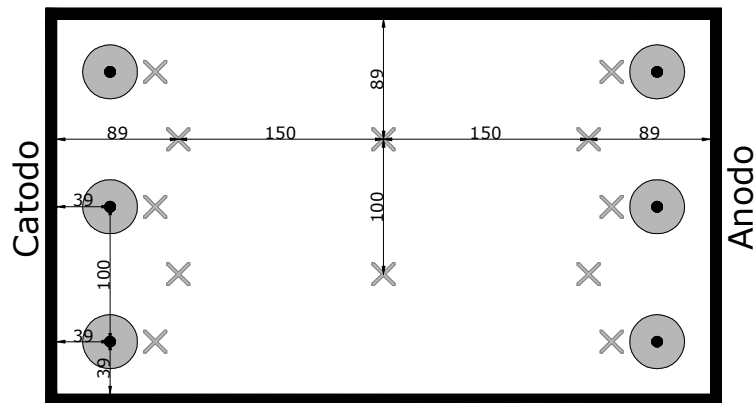


Figura 3.17: Locais dos ensaios de prospecção da C\_E\_04.

Além das modificações já citadas anteriormente, no sétimo dia foram realizadas alterações tanto na corrente elétrica como na diferença de potencial que estavam sendo aplicadas no corpo de prova. A diferença de potencial, que no início era de 44 V/m, passou para 55 V/m e a corrente elétrica de 1,5 mA/cm<sup>2</sup> passou para 1,87 mA/cm<sup>2</sup>.

Mantendo o objetivo de saber se as proporções de soluções alterariam os resultados, novamente foram utilizadas proporções diferenciadas das soluções que eram adicionadas ao solo.

### 3.3.3.1.5 Célula eletrocinética 05 (C\_E\_05)

A quinta célula foi marcada pela substituição da água carbonatada, que estava sendo inserida na nela através dos drenos existentes ao redor dos eletrodos catodos, por uma solução de silicato de sódio. Além dessa alteração, foram realizados mais cinco ensaios de prospecção. Os pontos onde foram realizados tais ensaios podem ser visualizados na Figura 3.18.

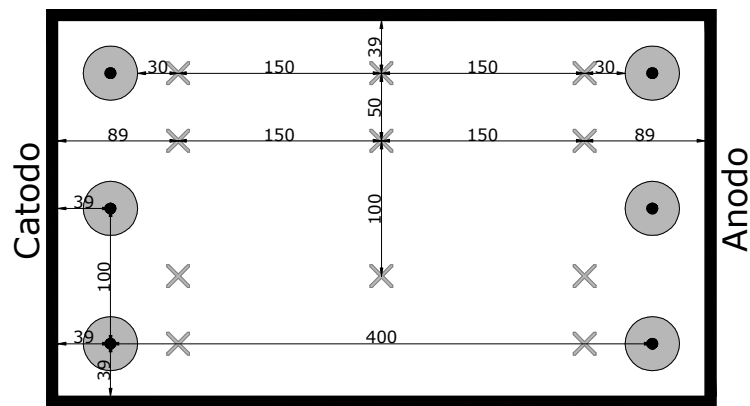


Figura 3.18: Locais dos ensaios de prospecção da C\_E\_05.

Esta célula teve a duração de 21 dias, sendo que os ensaios de prospecção foram distribuídos da seguinte maneira: três antes da aplicação da corrente elétrica e da diferença de potencial, três após sete dias de ensaio, outros três no décimo quarto dia e, por fim, mais dois no vigésimo primeiro dia.

### 3.3.3.1.6 Célula eletrocinética 06 (C\_E\_06)

Para que fosse possível evidenciar qual era o efetivo papel da aplicação tanto da corrente elétrica como da diferença de potencial nas células que estavam sendo executadas, a sexta célula foi realizada nas mesmas condições da C\_E\_05, entretanto sem a aplicação da técnica de eletrocinética. Outra modificação realizada, ainda em relação a C\_E\_05, foi que nesta, foram feitos 9 ensaios de prospecção durante os 14 dias de duração da célula. Os pontos onde foram realizados tais ensaios podem ser visualizados na Figura 3.19.

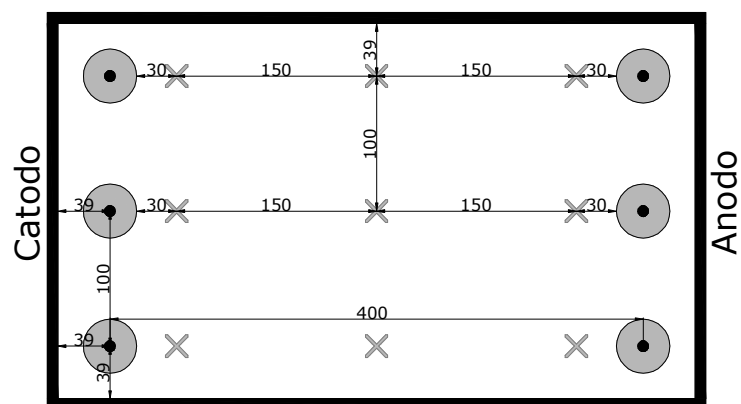


Figura 3.19: Locais dos ensaios de prospecção da C\_E\_06.

#### **3.3.3.1.7 Célula eletrocinética 07 (C\_E\_07)**

Nesta célula, também foram seguidas as mesmas configurações da C\_E\_05, todavia, esta teve uma duração de sete dias e foram realizados apenas seis ensaios de prospecção.

#### **3.3.3.1.8 Célula eletrocinética 08 (C\_E\_08)**

Outra vez na tentativa de vislumbrar o papel exercido pela diferença de potencial e da corrente elétrica, foram utilizadas as mesmas soluções com as mesmas concentrações utilizadas na célula anterior, porém com uma tensão de 30 V/m e uma corrente elétrica de 1,75 mA/cm<sup>2</sup>.

#### **3.3.3.1.9 Célula eletrocinética 09 (C\_E\_09)**

A nona célula foi marcada pela inversão tanto das soluções como dos eletrodos na metade do ensaio.

#### **3.3.3.1.10 Célula eletrocinética 10 (C\_E\_10)**

Assim como na célula anterior, optou-se por seguir com a inversão tanto das soluções como dos eletrodos na metade do experimento, entretanto foram minoradas tanto a corrente elétrica como diferença de potencial.

#### **3.3.3.1.11 Célula eletrocinética 11 (C\_E\_11)**

Ainda dando continuidade à inversão tanto de soluções como dos eletrodos, confeccionou-se a décima primeira célula. Assim como na C\_E\_06, abdicou-se da aplicação tanto da corrente elétrica como da diferença de potencial para verificar o seu efeito sobre essas novas configurações.

#### **3.3.3.1.12 Célula eletrocinética 12 (C\_E\_12)**

Esta célula possuía as mesmas características da C\_E\_09, porém com a concentração das soluções mais baixas.

#### **3.3.3.1.13 Célula eletrocinética 13 (C\_E\_13)**

Nesta unidade, a inovação aplicada foi a substituição da solução de silicato de sódio (que estava sendo inserida na célula eletrocinética através dos drenos existentes ao redor dos eletrodos catodos) por uma solução de bicarbonato de sódio.

#### 3.3.3.1.14 Célula eletrocinética 14 (C\_E\_14)

Ainda buscando algumas respostas para acontecimentos nas células anteriores, ocorreu um último experimento no qual se utilizou ao invés de soluções químicas, apenas água destilada. Esse procedimento foi adotado para que se pudesse conhecer o comportamento do solo frente à eletrólise da água. Os ensaios de prospecção realizados foram os seis propostos na metodologia.

### 3.3.4 Ensaios preliminares

A fim de iniciar a pesquisa e adquirir conhecimento sobre a técnica de eletrocinética, montagem do equipamento e realização dos experimentos, optou-se por realizar alguns ensaios preliminares.

#### 3.3.4.1 Ensaios iniciais

Com o intuito de observar a degradação dos eletrodos e a fim de obter conhecimentos gerais sobre a montagem do sistema, ainda sem a utilização do MCPT, foram realizados dois experimentos preliminares.

O primeiro experimento realizado foi somente com a metade da capacidade de solo da célula eletrocinética, conforme a Figura 3.20. A moldagem do solo ocorreu com sua umidade ótima (10%) e com uma densidade relativa de 50%, gerando assim um peso específico aparente seco dos grãos de  $15 \text{ kN/m}^3$ . O tempo de duração deste ensaio foi de sete dias.



Figura 3.20: Vista da célula durante o primeiro ensaio realizado.



Neste experimento, foram adicionadas soluções, em mesma quantidade, de cloreto de cálcio com uma concentração de 110,99 g/l nos eletrodos anodos e água carbonatada nos eletrodos catodos. Inicialmente, a adição ocorreu até a inundação do solo e, a cada dia, foi adicionada uma pequena quantidade de soluções para manter o nível de saturação. Foi aplicada uma tensão de 25 V/m, o que correspondia na fonte a uma diferença de potencial de 10 V. A corrente elétrica aplicada foi de 1,75 mA/cm<sup>2</sup>, perfazendo um total de 2,32 A.

No segundo experimento, foram mantidas as mesmas configurações do primeiro, com exceção da concentração da solução de cloreto de cálcio (que passou de 110,99 g/l para 221,98 g/l) das quantidades de soluções adicionadas aos eletrodos e do tempo de aplicação da técnica. Da quantidade total de líquidos necessários para a inundação do solo, foram utilizados 2/3 de cloreto de cálcio e 1/3 de água carbonatada, sendo que o tempo de duração do ensaio foi de 14 dias.

Nos dois experimentos, foram realizadas medidas de tensão diárias entre cinco posições diferentes da célula eletrocinética sempre na mesma profundidade.

#### **3.3.4.2 Calibração e primeiro ensaio do MCPT**

Após a realização dos ensaios descritos anteriormente e diante de todo o equipamento finalizado, surgiu a necessidade de calibração da célula de carga construída e posicionada na ponteira do MCPT. Para a realização de sua calibração, foi utilizado um suporte metálico, a fim de manter o conjunto haste/cone no prumo, uma prensa para compressão simples, um anel dinamométrico para 10 kN, além de um microcomputador.

Com as ligações elétricoeletrônicas devidamente realizadas e acopladas ao microcomputador, iniciou-se o ensaio de calibração. No intuito de fazer a coleta da leitura zero do cone, o conjunto foi içado e pendurado por um fio no próprio pórtico da prensa (Fig. 3.21a) e tomado nota do valor apresentado pelo *software FieldChart*. Já para as coletas subsequentes, o conjunto haste/cone foi posicionado abaixo do anel dinamométrico, de acordo com a Figura 3.21b, e manualmente foi sendo adicionada carga sobre o mesmo. Na ponta do cone, foi colocada uma pequena peça com um encaixe perfeito, confeccionada em latão, a fim de que a ponta não fosse danificada com o acréscimo de carga sobre o sistema. Foi estabelecido que a uma variação de 0,005 mm apresentada pelo anel dinamométrico, seria feita uma coleta. No total, foram realizadas 22.

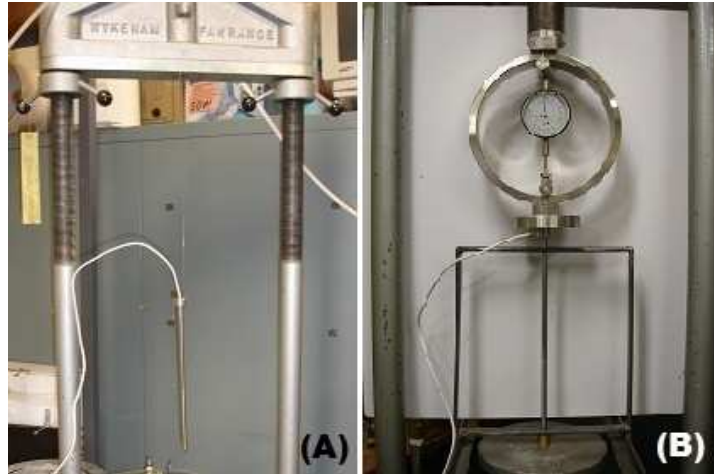


Figura 3.21: Calibração do cone - (A) leitura zero e (B) demais leituras.

Acabada a calibração, o conjunto haste/cone foi acoplado ao sistema de cravação e foram iniciados os ensaios de prospecção. Para testar o equipamento, foi moldado um corpo de prova, sem controle de compactação ou de umidade, porém com as mesmas dimensões que seriam utilizadas posteriormente nos ensaios.

Devido à quebra de uma haste do cone durante um ensaio de prospecção da célula eletrocinética 05, optou-se por calibrá-lo novamente a fim de garantir que a grande carga recebida pela ponteira não havia danificado-a. O procedimento adotado para a nova calibração foi o mesmo seguido anteriormente.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e discussões estão divididos em preliminares e principais.

### 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados a título de adquirir conhecimento prático sobre o tema proposto.

#### 4.1.1 Ensaios iniciais

Com relação aos eletrodos, em ambos os ensaios, ocorreu a corrosão dos anodos e a redução dos catodos. A única alteração visível entre os ensaios ocorreu entre os catodos, onde uma camada mais espessa de cálcio estava depositada sobre os eletrodos do segundo ensaio. Essa maior deposição aconteceu devido ao aumento da concentração da solução de cloreto de cálcio, bem como ao maior tempo de exposição à técnica. A Figura 4.1 mostra a aparência dos eletrodos do primeiro ensaio enquanto a Figura 4.2 mostra os eletrodos do segundo ensaio.

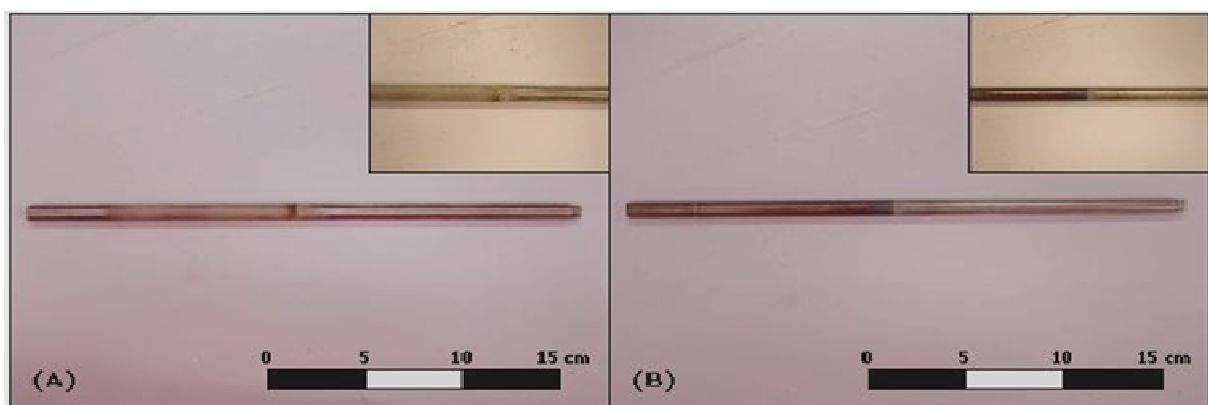


Figura 4.1: Eletrodos do primeiro ensaio - (A) catodo e (B) anodo.

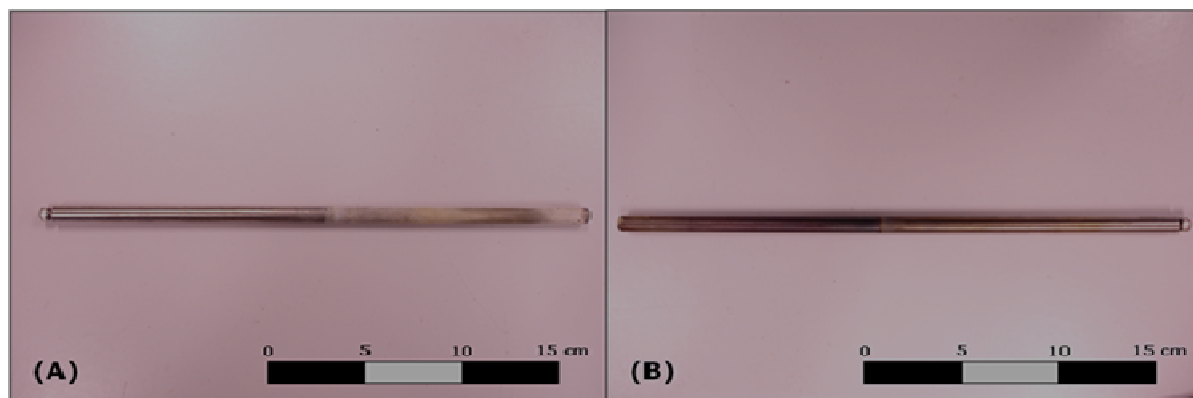


Figura 4.2: Eletrodos do segundo ensaio - (A) catodo e (B) anodo.

A mudança de aparência do eletrodo na parte central aconteceu em virtude de o ensaio ter sido realizado apenas com a metade da capacidade de solo da célula eletrocinética. Esperava-se, mesmo depois de vários ensaios, que os eletrodos oxidados não sofressem com a redução da seção ou que essa perda fosse mínima.

Os processos físicos e químicos que ocorreram durante os ensaios podem ser descritos da seguinte maneira: a fonte elétrica de bancada teve a finalidade de retirar elétrons do anodo e adicionar elétrons ao catodo. A adição da solução de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) fez com que ocorressem os seguintes fenômenos: (i) os íons de cloro com a sua carga negativa foram atraídos ao anodo e perderam um elétron; (ii) os átomos de cloro juntaram-se dois a dois, formando gás  $\text{Cl}_2$  que foi liberado ao ambiente e (iii) os íons de cálcio positivamente carregados foram atraídos para o catodo, onde cada íon recebeu dois elétrons formando cálcio. Parte desse depositou-se sobre os eletrodos catodos e o restante ficou disposto em seus arredores no solo.

As medidas de tensão nos ensaios comprovaram que a oxidação e a redução dos eletrodos interferiram de forma insignificante na aplicação da voltagem ao solo. A Figura 4.3 apresenta as variações de tensão durante o primeiro ensaio e a Figura 4.4 as variações de tensão durante o segundo.

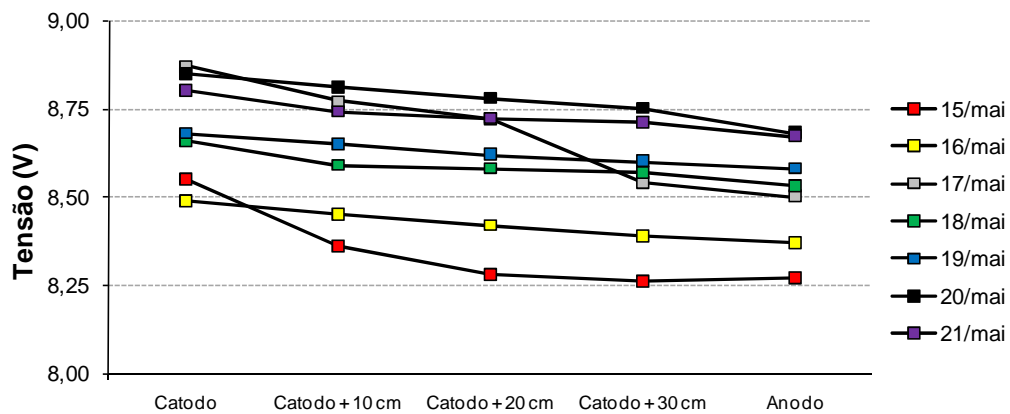


Figura 4.3: Variação de tensão durante o primeiro ensaio.

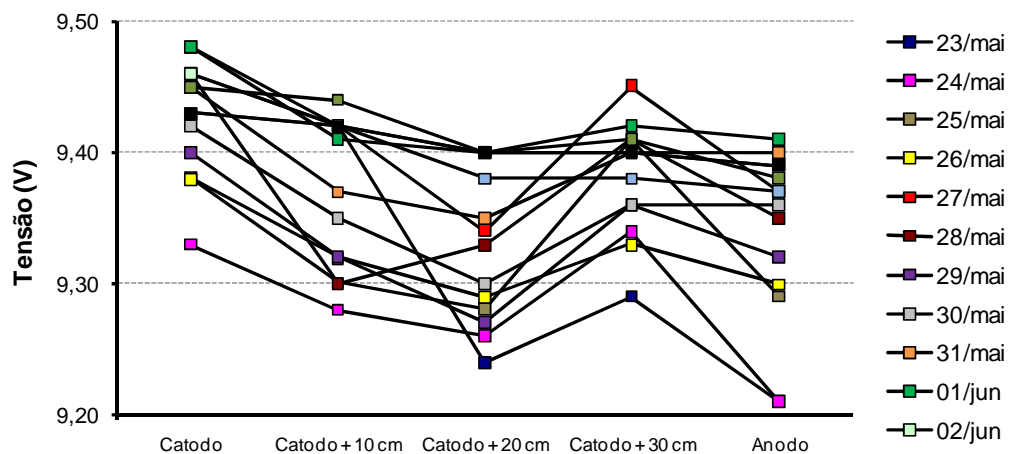


Figura 4.4: Variação de tensão durante o segundo ensaio.

Apreciando os gráficos, não é possível afirmar que a tensão caiu significativamente com o passar do tempo. A máxima queda ocorrida durante os ensaios foi inferior a 1 V, e a variação da tensão pode ser explicada pela quantidade de íons disponíveis na água. As substâncias inorgânicas dissolvidas têm carga elétrica - positiva ( $\text{Ca}^{++}$ ) ou negativa ( $\text{Cl}^-$ ) - e transmitem corrente elétrica quando são mergulhados eletrodos no sistema e se aplica tensão nos mesmos. Quanto maior for a quantidade de íons presentes, maior será a condutividade e menor será a resistividade. (BREDA, 2001). Essa afirmação explica a menor queda da tensão

ocorrida durante o segundo ensaio, que possuía uma concentração maior da solução de cloreto de cálcio.

#### 4.1.2 Calibrações e primeiro ensaio do MCPT

Através da amplificação do sinal emitido pelos extensômetros, a calibração definiu que a variação de uma unidade da leitura realizada pelo programa *FieldChart* representaria uma variação de 10,021 kPa. A calibração foi linear, como pode ser verificado no R-quadrado do gráfico apresentado na Figura 4.5.

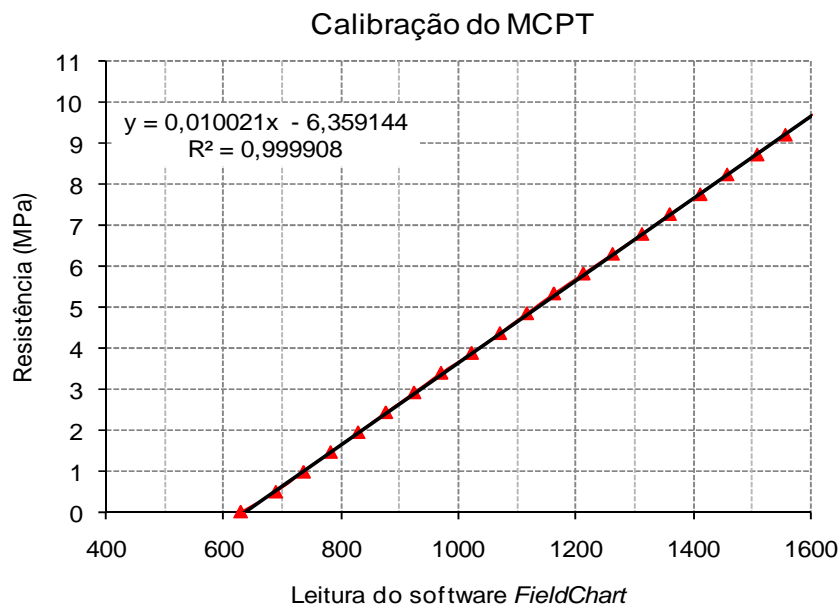


Figura 4.5: Curva de calibração do MCPT.

Após a quebra de uma haste durante um dos ensaios de prospecção, optou-se por refazer a calibração. Essa nova calibração apresentou uma constante parecida com a da calibração anterior. A alteração de uma unidade da leitura realizada pelo programa *FieldChart*, que anteriormente representava uma variação de 10,021 kPa, passou a representar 10,838 kPa. Uma mudança considerável aconteceu na leitura zero que passou de 629 para 576 unidades, modificação que aconteceu em virtude do grande esforço sofrido pela célula de carga e seu posterior descarregamento abrupto no momento da quebra da haste. A Figura 4.6 apresenta a nova curva de calibração utilizada nos ensaios de prospecção a partir da célula eletrocinética 05.

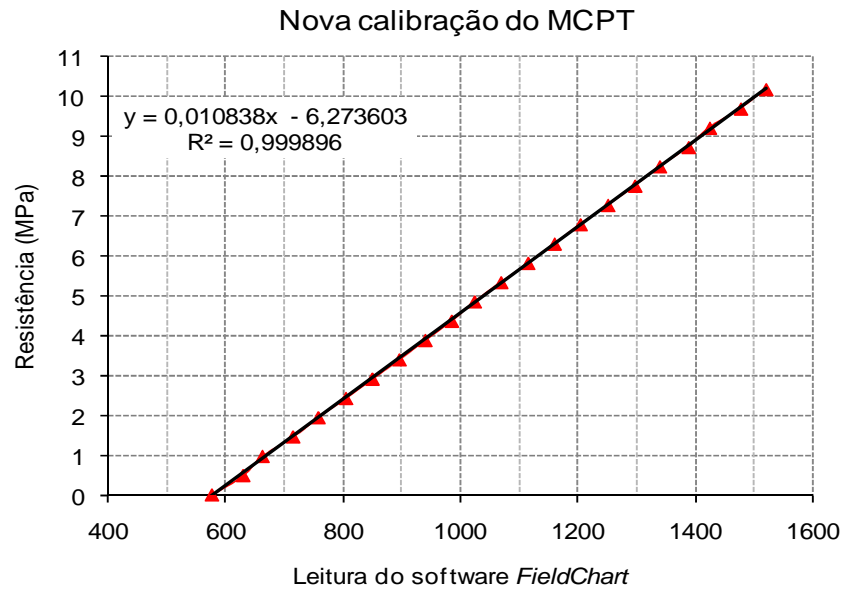


Figura 4.6: Nova curva de calibração do MCPT.

Com a primeira calibração efetuada, foi realizado o primeiro ensaio de prospecção com o equipamento. Este se comportou da maneira desejada e apresentou um perfil que caracterizou de forma verdadeira a resistência do solo no interior da célula eletrocinética (Fig. 4.7), visto que o solo havia sido compactado de maneira mais efetiva em sua porção média.

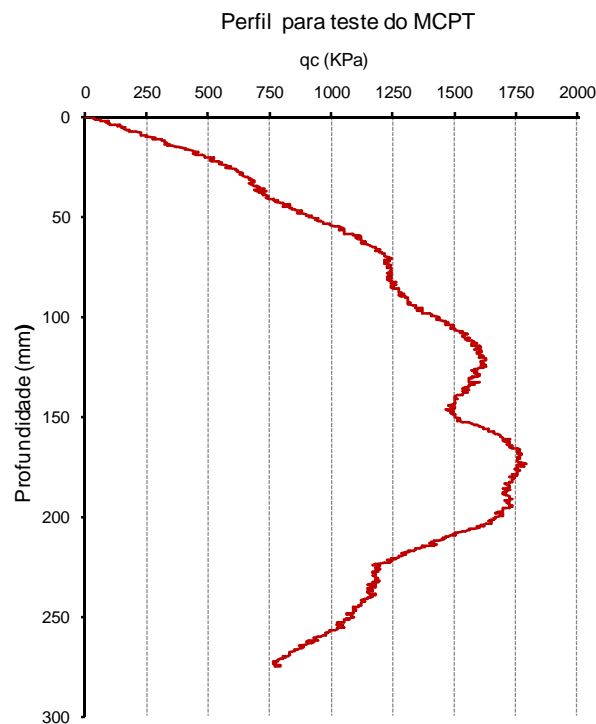


Figura 4.7: Perfil para teste do MCPT.

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES PRINCIPAIS

Neste item serão apresentados os resultados que promoveram o desfecho da pesquisa.

### 4.2.1 Monitoramento da tensão

O monitoramento da tensão que estava atuando sobre cada célula eletrocinética ocorreu entre seis pontos. A semelhança entre os comportamentos fez com que se optasse por apresentar apenas três gráficos que conseguissem representar o comportamento da tensão com o passar dos dias.

A Figura 4.8 apresenta o gráfico plotado através das leituras realizadas na C\_E\_02, sendo que no gráfico é possível perceber que o comportamento da tensão que estava chegando aos eletrodos catodos e anodos permaneceu praticamente inalterado durante o período. As outras leituras realizadas exibem uma queda gradual da tensão em quase todos os pontos durante o ensaio. Essa queda é explicada pela oxidação dos eletrodos anodos e ainda pela redução ocorrida nos eletrodos catodos. Outro fator que contribuiu para esta queda foi a redução de íons livres no sistema para que ocorresse a condução da tensão, visto que grande parte do cloro havia formando ácido clorídrico e o íons de cálcio combinaram-se formando uma deposição de cálcio precipitado sobre os eletrodos catodos.

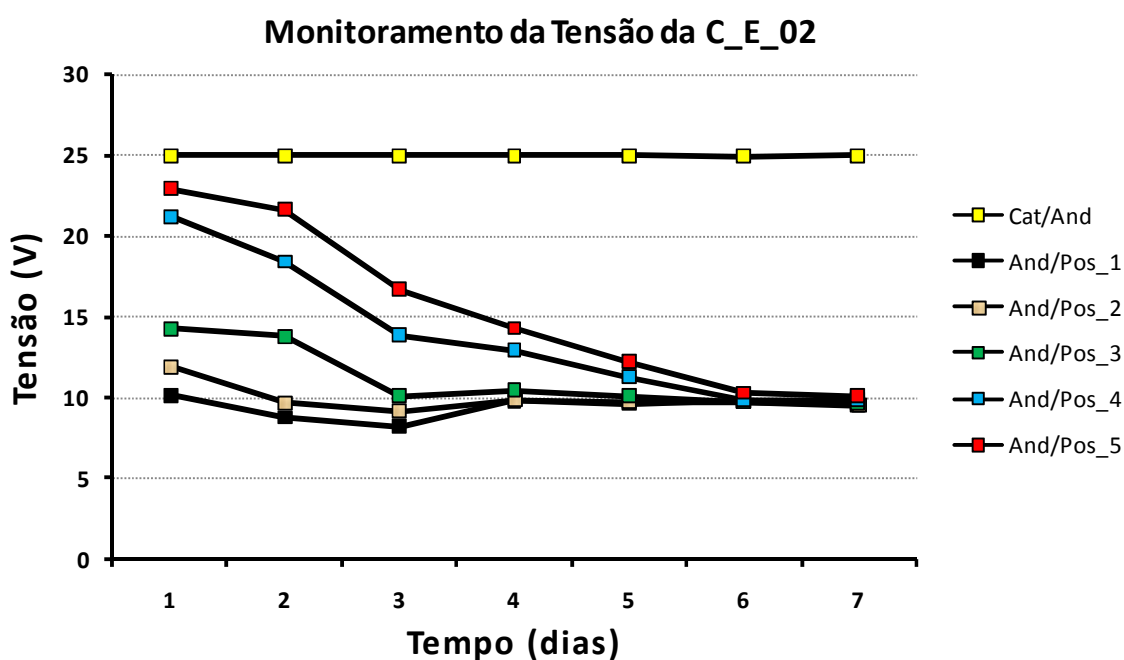


Figura 4.8: Monitoramento da tensão durante a C\_E\_02.



A Figura 4.9 apresenta o gráfico obtido através das leituras realizadas na C\_E\_07. O comportamento da tensão nos ensaios realizados com adições de solução de cloreto de cálcio junto aos eletrodos anodos e de silicato de sódio junto aos eletrodos catodos é perfeitamente representado por essa figura. As leituras demonstram a estabilidade da tensão atuante entre os pontos ou então um incremento com o passar do tempo.

Na C\_E\_07 ocorreu a formação de um perfil cimentado na parte intermediária da célula. Diante disso, é possível imaginar que a formação da barreira cimentada deveria fazer com que houvesse um aumento da resistência elétrica por parte do solo e, conseqüentemente, uma queda de tensão atuante sobre o sistema. Contudo, isso não foi verdadeiro. A formação do perfil cimentado não ocorreu em toda a profundidade da célula. Na parte superior devido às variações dos níveis das soluções, não houve a formação de concreções. Então, ao adicionar soluções nas células, mesmo com dificuldade, elas conseguiram transpor a barreira cimentada e inundaram o corpo de prova.

Como as medidas de tensões ocorreram logo abaixo da superfície e o nível de saturação iônica inicial foi inferior ao nível final, a condução da tensão foi favorecida.

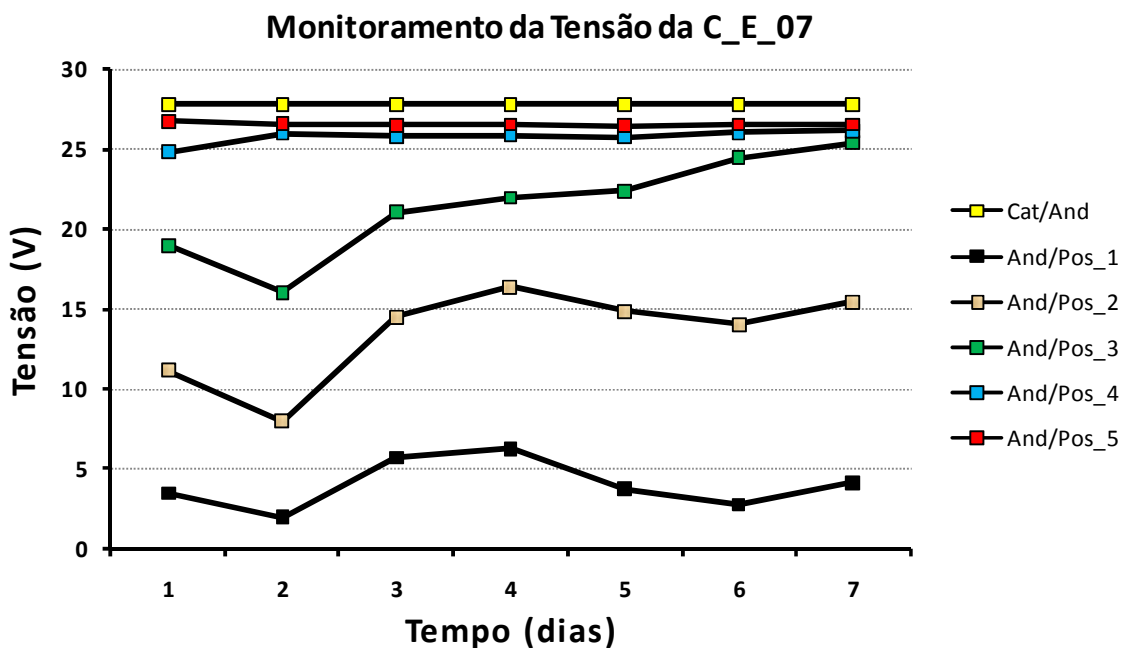


Figura 4.9: Monitoramento da tensão durante a C\_E\_07.

Apreciando a Figura 4.10, a qual corresponde ao monitoramento da tensão atuante sobre a célula eletrocinética 09, fica notório que, durante o quarto dia de ensaio, devido à oxidação e redução ocorrida nos eletrodos, aconteceu uma queda da tensão aplicada. Essa coleta de dados foi feita anteriormente à inversão dos eletrodos catodos e anodos, prevista na execução da C\_E\_09. Antes da inversão dos eletrodos, porém com eles já desacoplados da célula, os mesmos foram limpos de tal forma que foi removida quase que na totalidade a sua oxidação e redução. Essa medida fez com que, na leitura seguinte, o valor das tensões medidas se aproximasse dos valores das leituras realizadas no terceiro dia.

Na maioria das posições, ocorreu uma queda de tensão do quinto para o sexto dia. Essa queda é atribuída à formação das concreções ao redor dos drenos, como foi verificado após a exumação do corpo de prova.

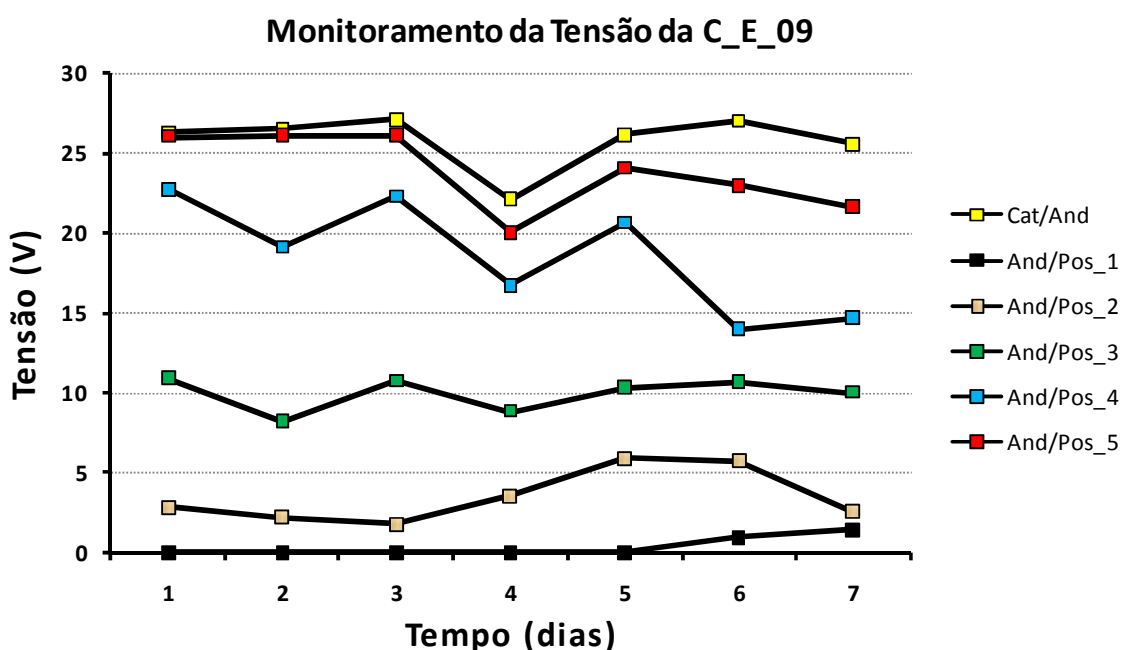


Figura 4.10: Monitoramento da tensão durante a C\_E\_07.

O comportamento apresentado pelas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 revelou pequenas quedas ou até mesmo a manutenção da tensão com o passar do tempo. Essas quedas já eram esperadas de acordo com a revisão bibliográfica, no entanto, a utilização de eletrodos ditos de sacrifício e eletrodos mais resistentes à corrosão não proporcionou mudanças vantajosas - em ambos os casos a tensão medida apresentou-se de forma aceitável.

### 4.2.2 Eletrodos

Como apresentado no programa experimental, foram utilizados eletrodos de aço carbono e de titânio classe 2 (classe que representa a nobreza da liga em uma escala decrescente de 1 a 4), para a aplicação da técnica de eletrocinética.

Devido às informações obtidas durante a realização da revisão bibliográfica, houve grande convicção de que se fossem utilizados eletrodos de titânio, não haveria problemas em relação à corrosão dos mesmos quando fossem posicionados como anodos.

Nas células eletrocinéticas 01 e 02, foram utilizados eletrodos de titânio. Os mesmos revelaram que apesar de ser uma liga muito resistente, estando bastante próxima ao topo dos materiais mais nobres, devido à presença intensa do ácido clorídrico formado através da eletrólise da água e da dissociação do cloreto de cálcio, sofreram sérias avarias durante o período da aplicação da técnica. A Figura 4.11 demonstra a aparência dos eletrodos de titânio corroídos em comparação a um eletrodo novo.



Figura 4.11: Aparência dos eletrodos de titânio corroídos em comparação a um eletrodo novo.

O comportamento não satisfatório e a busca de modificações nos resultados obtidos até o presente momento da pesquisa foram as causas que estimularam a substituição dos eletrodos de titânio por eletrodos de aço carbono nos demais ensaios.

Comparando os dois tipos de eletrodos utilizados, os eletrodos de aço carbono sofreram uma oxidação maior do que os eletrodos de titânio em um mesmo período,

entretanto, o custo desse eletrodo era insignificante quando comparado ao anterior. Essa maior corrosão aconteceu em virtude da maior reatividade do aço carbono. Frente a essas evidências, optou-se por utilizar eletrodos de aço carbono até o final da pesquisa. A Figura 4.12 demonstra a aparência dos eletrodos de aço carbono corroídos em comparação a um eletrodo novo.



Figura 4.12: Aparência dos eletrodos de aço carbono corroídos em comparação a um eletrodo novo.

Quando uma porção de uma barra metálica fica mergulhada em soluções que estão armazenadas em algum tipo de recipiente e expostas ao meio, estas são submetidas a variações de temperatura. As rápidas mudanças de temperatura do ambiente e o contato com os níveis de oxigênio contido no ar causam a formação de pilhas diferenciais. Nesta pesquisa, houve a formação de dois tipos de pilhas: as diferenciais de temperatura e de aeração.

As pilhas de temperatura diferencial ocorrem sempre que existe uma barra metálica inserida num meio com diferentes temperaturas. Isso foi comum nas células eletrocinéticas, visto que as reações que ocorriam nelas liberavam calor. Como a parte superior do corpo de prova estava exposta à atmosfera, as trocas de temperatura nessa região ocorriam intensamente, tendo como consequência que na parte superior existisse uma temperatura inferior à existente na base.

As pilhas de aeração diferenciais são formadas nos pontos onde existe diferença na concentração de oxigênio no meio. Devido à facilidade da dissolução do oxigênio em um meio aquoso, a lâmina de água próxima da interface ar-água possuía um maior nível de

oxigênio que o restante da célula. Com isso, as diferentes concentrações de oxigênio propiciavam a formação de uma pilha.

A formação das pilhas citadas anteriormente nas células eletrocinéticas transformavam energia química em energia elétrica, fazendo com que esta se contrapusesse com a energia elétrica aplicada através da fonte. Essa contraposição associada às alterações de nível das soluções, faziam com que os eletrodos fossem atacados pela oxidação de forma mais severa nas extremidades inferiores, fenômeno que foi presenciado em todos os eletrodos utilizados nas células eletrocinéticas.

### **4.2.3 Ensaios de prospecção**

No total, foram realizados 103 ensaios de prospecção divididos em 14 células eletrocinéticas. Para apresentação e discussão dos resultados, os ensaios serão divididos de acordo com os tipos de soluções químicas adicionadas em cada uma das células.

#### **4.2.3.1 Células com soluções de cloreto de cálcio e água carbonatada**

No total, foram realizados quatro ensaios adicionando soluções de cloreto de cálcio nos eletrodos anodos e água carbonatada nos eletrodos catodos (C\_E\_01, C\_E\_02, C\_E\_03 e C\_E\_04), cujos perfis estão apresentados nas Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16, respectivamente.

Apreciando os perfis de cada célula, percebeu-se que não houve ganho de resistência por parte do solo em nenhum dos pontos especificados pela metodologia. Na célula eletrocinética 02, a fim de tentar observar a evolução da possível cimentação, foram realizados, em tempos intermediários aos sete dias, ensaios de prospecção extras, mas que não apresentaram resultados diferentes dos já obtidos. É unânime que houve uma pequena queda de resistência ao comparar os ensaios anteriores e os posteriores à aplicação da técnica.

Essa queda entre os ensaios, nas proximidades dos eletrodos catodos e na parte intermediária da célula, pode ser explicada pelos seguintes fatores: diferença de compactação do solo entre os pontos, visto que o corpo de prova possuía dimensões relativamente grandes e a total uniformidade tornava-se complicada e pela liberação do gás carbônico quando a água carbonatada era adicionada ao solo.

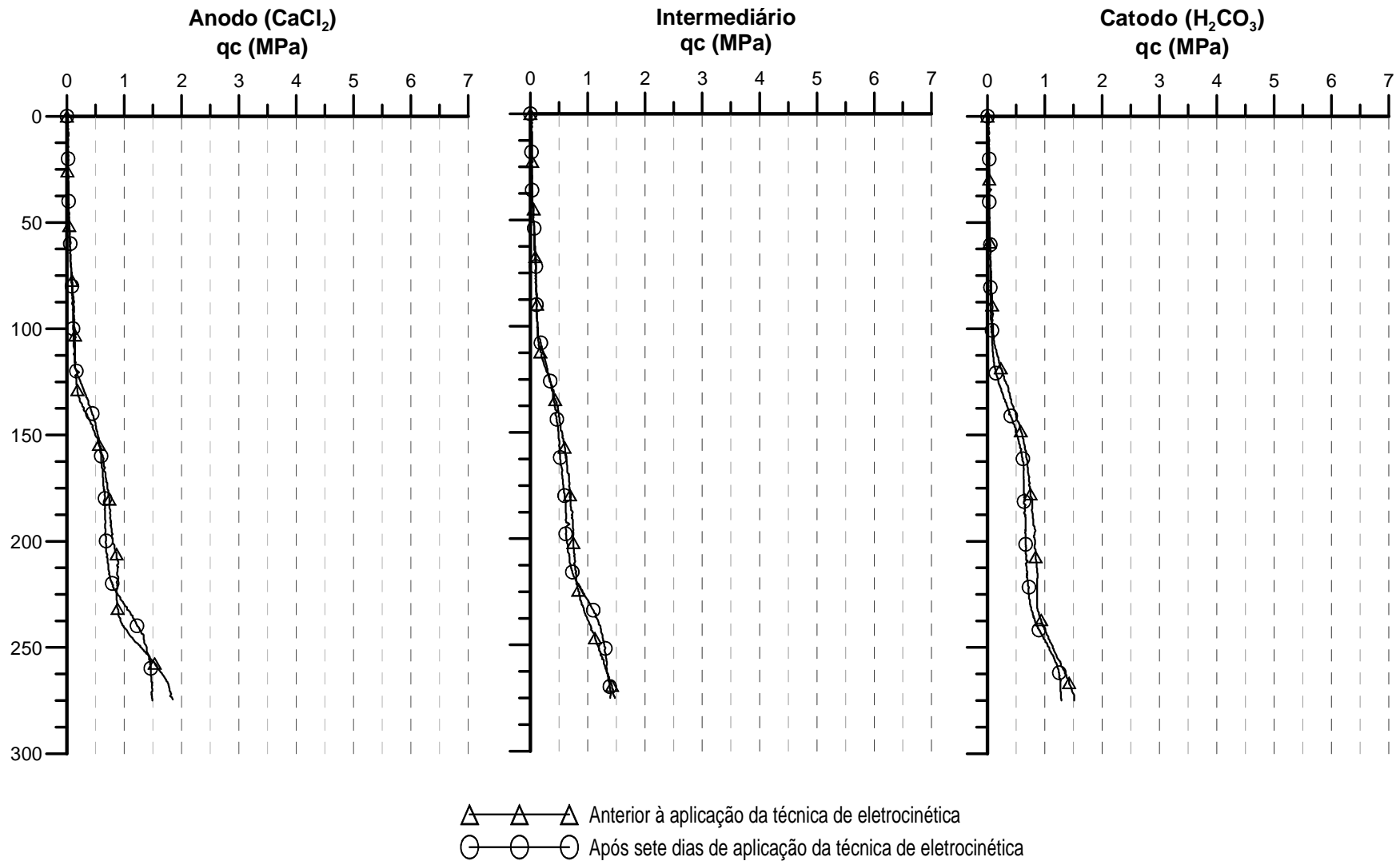


Figura 4.13: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 01 (C\_E\_01).

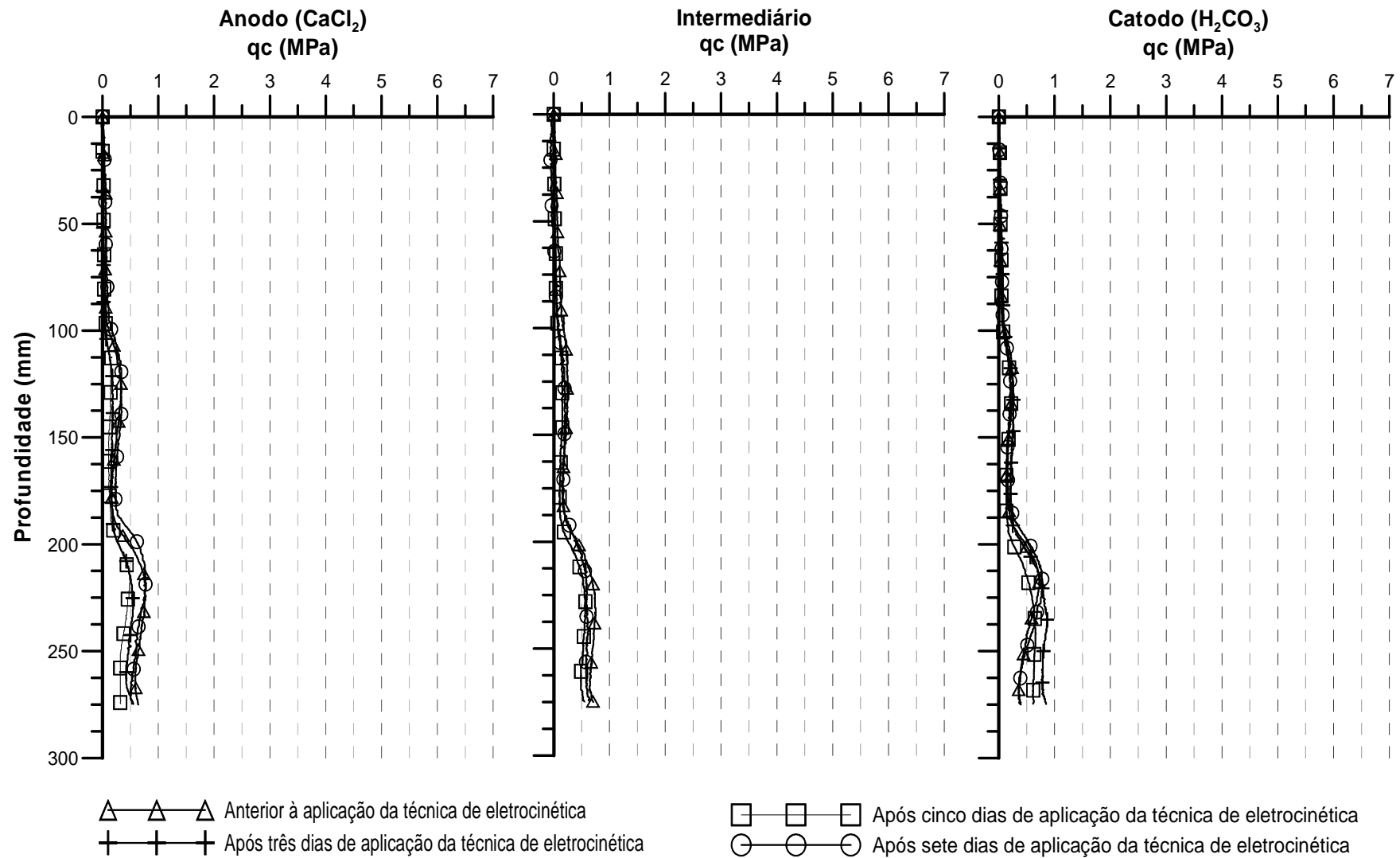


Figura 4.14: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 02 (C\_E\_02).

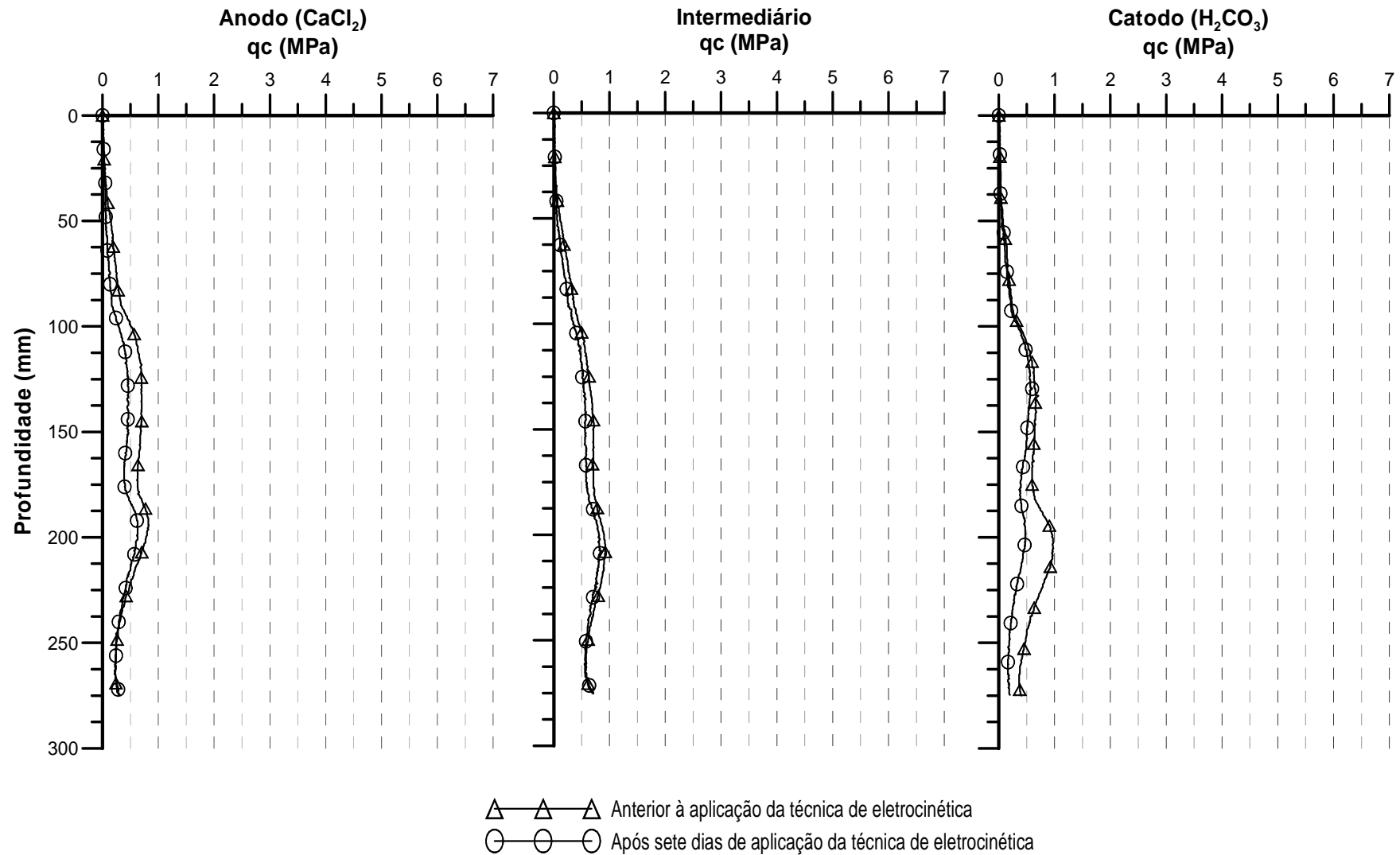


Figura 4.15: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 03 (C\_E\_03).



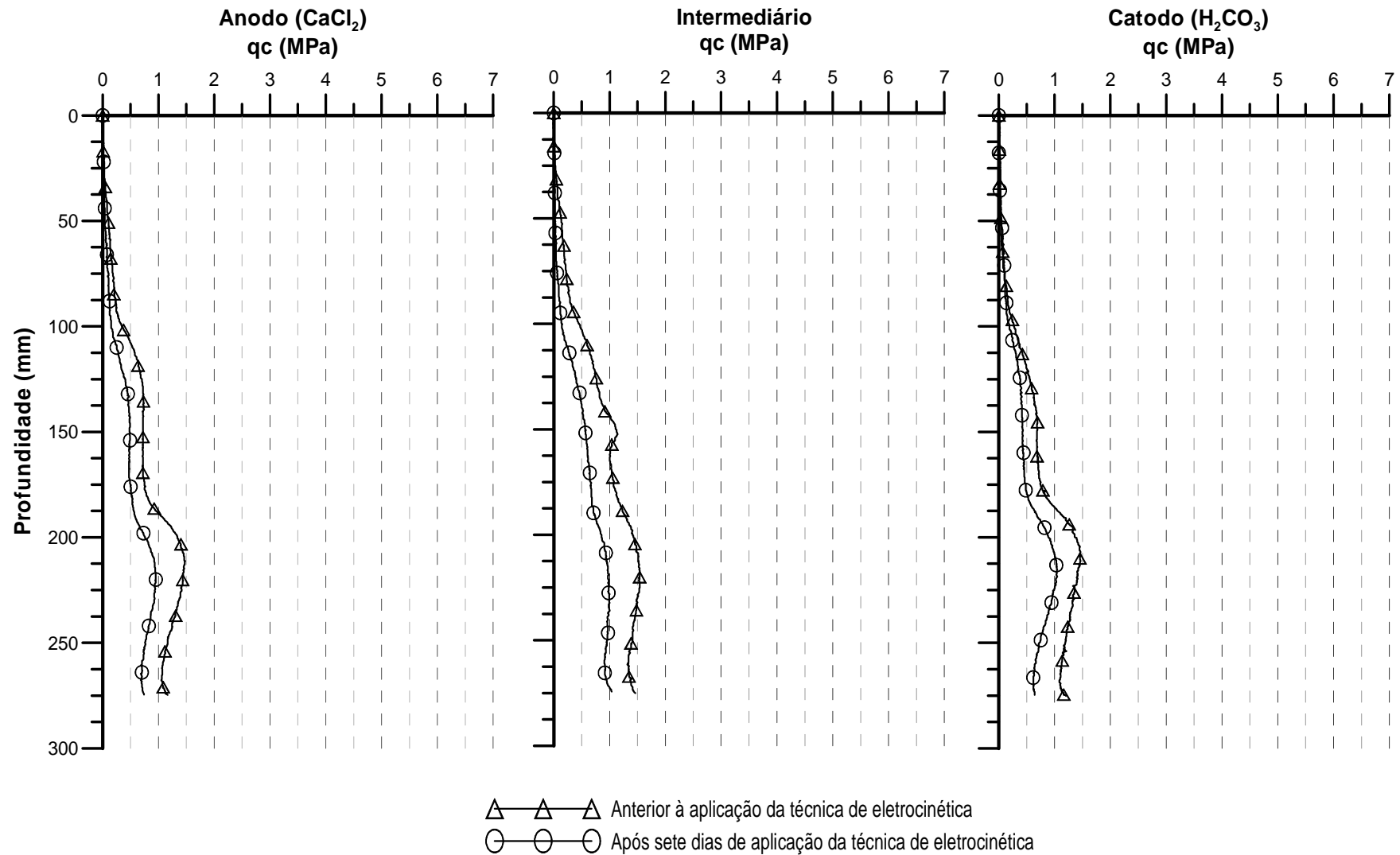
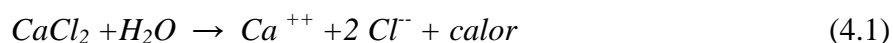


Figura 4.16: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 04 (C\_E\_04).

Devido à alta instabilidade da água carbonatada, pela sua despressurização ou então pelo aumento de sua temperatura, acontece a sua decomposição e ela volta à condição natural de seus componentes que é a  $H_2O$  e  $CO_2$ , o qual é liberado rapidamente para o meio. Essa brusca perda do  $CO_2$  desde a abertura da garrafa de água carbonatada até a sua adição nos drenos dos eletrodos catodos fez com que a quantidade de  $CO_2$  presente no meio onde se almejava que ocorressem as reações químicas para formação do carbonato de cálcio não tenham acontecido ou tenham ocorrido de forma medíocre. O volume de  $CO_2$  que foi liberado após a percolação da água no corpo de prova, mesmo sendo pequeno, fez com que aumentasse o volume de vazios do solo, diminuindo a compactidade da areia e conseqüentemente reduzindo a sua resistência. Essa queda de resistência pode ser visualizada com maior intensidade nos ensaios de prospecção realizados após os sete dias da célula eletrocinética 04 (Fig. 4.16), que recebeu um volume superior as outras de água carbonatada.

A queda de resistência ocorrida junto aos eletrodos anodos aconteceu em virtude da inserção da solução de cloreto de cálcio. A adição dessa solução provocou a liberação de íons de cálcio e de cloro de acordo com a Equação 4.1. Posteriormente, a água presente no meio associou-se com o cloro e formou o ácido clorídrico e o hipoclorito de acordo com a Equação 4.2.



Devido à agressividade do ácido clorídrico, nos arredores dos anodos ocorreram reações entre os minerais componentes da areia e o ácido clorídrico, provocando dessa forma a queda de resistência nesses pontos, tendo ocorrido em todas as células eletrocinéticas da pesquisa.

Todavia, como mostra a Figura 4.17, na célula eletrocinética 03, quando foi feito o seu desmonte, foi observada a formação de uma camada levemente cimentada ao redor dos drenos que continham em seu interior os eletrodos catodos, onde era adicionada a água carbonatada. Nessa pequena camada, houve a formação do carbonato de cálcio pela maior disponibilidade de  $CO_2$ .



Figura 4.17: Cimentação provocada pelo  $\text{CaCO}_3$ .

Os ensaios nas posições previamente estabelecidas realizados na célula eletrocinética 04 não demonstraram nenhum ganho de resistência (Fig. 4.16), enquanto os ensaios adicionais ao lado dos drenos, quando comparados, de acordo com a Figura 4.18, apresentaram o perfil estabelecido na Figura 4.19.

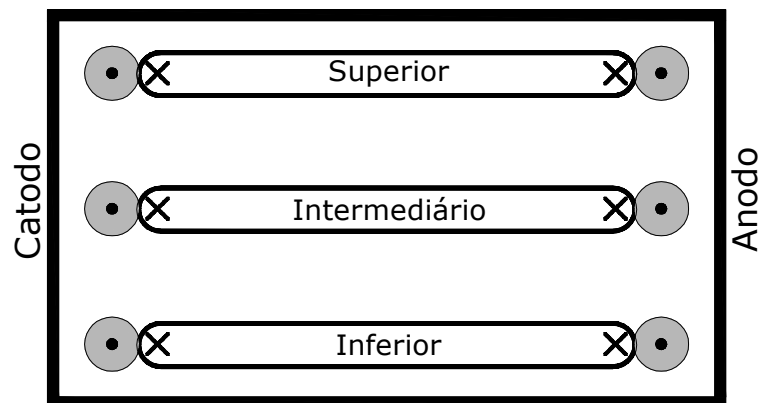


Figura 4.18: Ensaios de prospecção comparados.

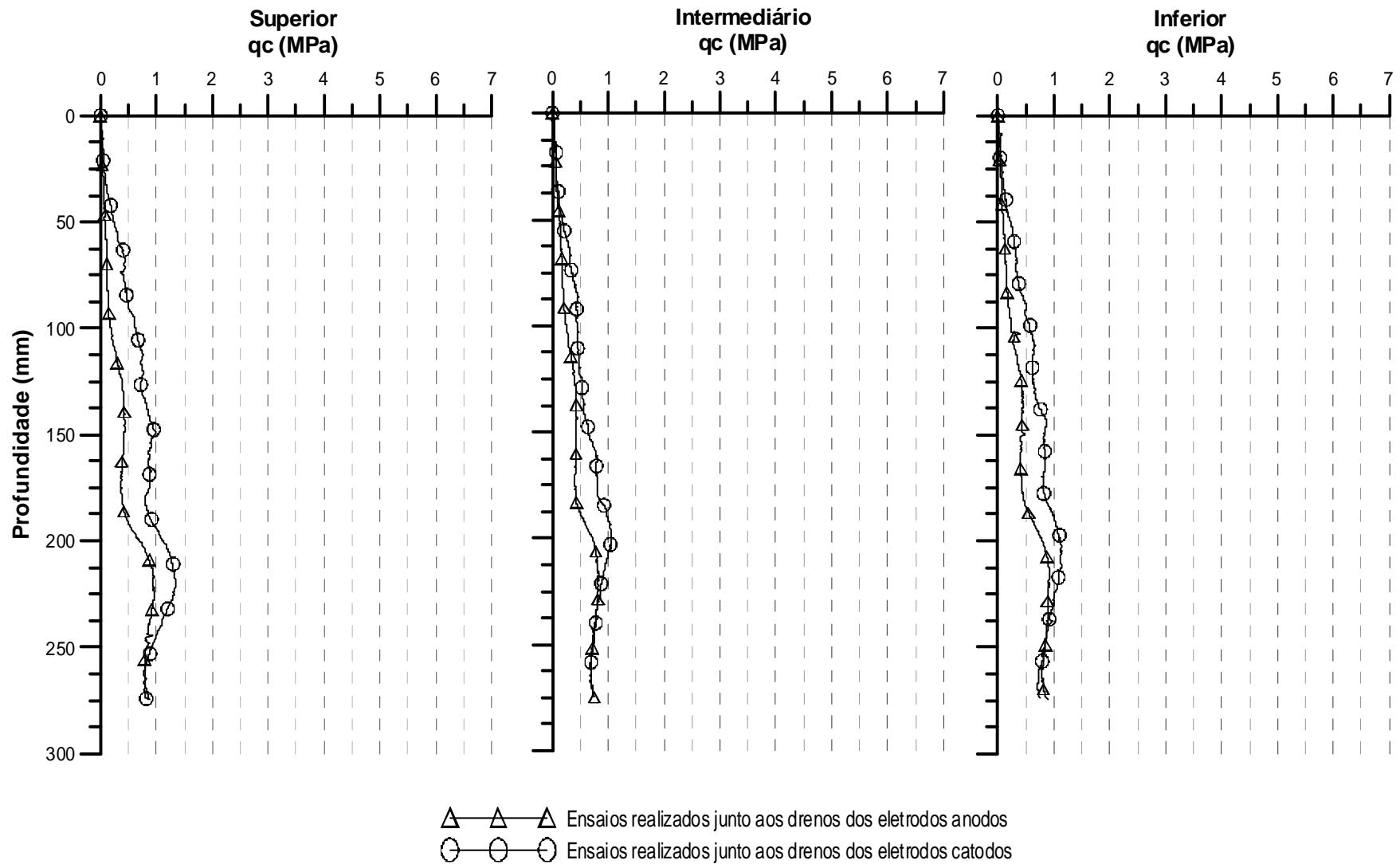


Figura 4.19: Ensaios de prospecção na célula eletrocinética 04 (C\_E\_04).

Ao comparar as Figuras 4.18 e 4.19, foi verificado que o ganho de resistência aconteceu quando o MCPT transpassou a camada cimentada.

Na parte superior das quatro células eletrocinéticas, foi possível visualizar que não ocorreu nenhuma modificação em relação à resistência do solo. Tal resistência nessa faixa permaneceu inalterada por ser um local de transição entre o meio inundado e o ambiente, sendo que isso pode ser explicado pelo fato de que, no momento em que eram adicionados os líquidos, ela ficava submersa e, ao longo das 24 h que separavam uma adição da outra, ocorria a evaporação e conseqüentemente o rebaixamento do nível das soluções. Como um dos pré-requisitos para que ocorressem os fenômenos eletrocinéticos é que o solo estivesse totalmente inundado, essa faixa de solo não estava de acordo e por conseqüência não houve a cimentação.

A não ocorrência da cimentação nas partes inferiores das células ocorreu pelo motivo de que o gás carbônico, devido à sua instabilidade, não permanecia nesses locais por tempo suficiente para que ocorressem as reações necessárias à formação do agente cimentante.

#### **4.2.3.2 Células com soluções de cloreto de cálcio e de silicato de sódio**

Foram realizados 8 ensaios (C\_E\_05, C\_E\_06, C\_E\_07, C\_E\_08, C\_E\_09, C\_E\_10, C\_E\_11 e C\_E\_13) adicionando soluções de cloreto de cálcio e de silicato de sódio nos eletrodos anodos e catodos. Em virtude dos resultados que haviam sido obtidos até essa parte da pesquisa não serem os esperados, baseado na literatura internacional (BARKER *et al.* 2004), optou-se por substituir a água carbonatada por soluções de silicato de sódio.

Na realização do primeiro ensaio (Fig. 4.20) foi possível observar os pontos positivos do uso dessa solução. Os ensaios de prospecção realizados aos sete dias quando comparados com os iniciais apresentaram resultados significativos. Nas proximidades dos eletrodos anodos, ocorreu uma pequena queda de resistência, opostamente ao que ocorreu junto aos eletrodos catodos e na porção intermediária da célula, onde houve um acréscimo da resistência ao solo.

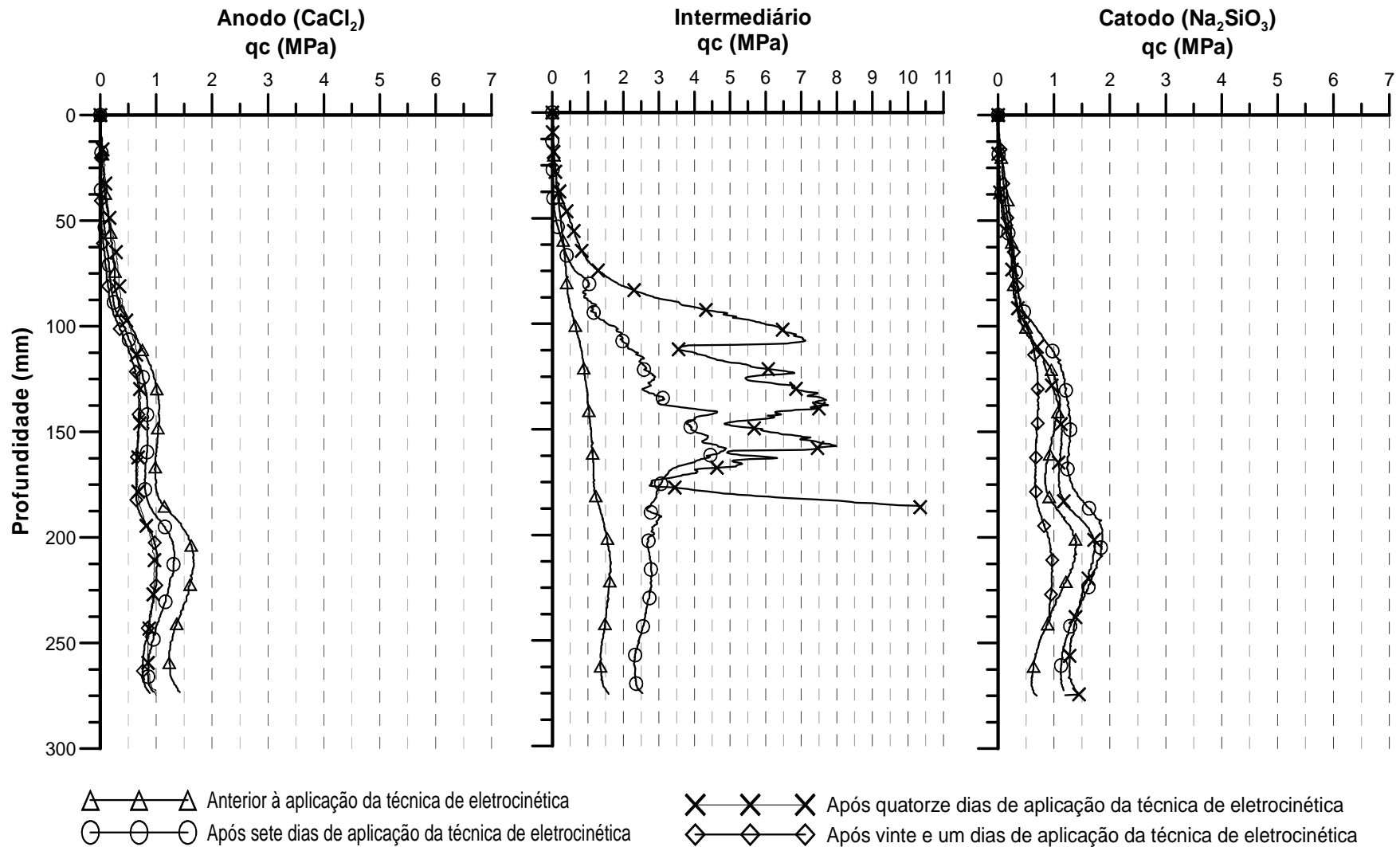


Figura 4.20: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 05 (C\_E\_05).

Com o objetivo de obter-se um amplo conhecimento sobre a utilização desses reagentes, determinou-se que esse experimento seria prolongado até 21 dias. Nos ensaios de prospecção do décimo quarto dia, tanto nas proximidades dos eletrodos catodos e dos eletrodos anodos, o comportamento permaneceu praticamente inalterado. Todavia, na posição intermediária, o acréscimo de resistência foi amplamente superior, o que provocou a quebra de uma haste do MCPT (Fig. 4.20). Em virtude disso, na posição intermediária não foi realizado o ensaio aos 21 dias e o ensaio aos 14 dias foi finalizado por volta de 190 mm de profundidade.

A queda de resistência ocorrida nas proximidades dos eletrodos anodos é explicada pelo mesmo motivo citado nas células com água carbonatada e cloreto de cálcio, ou seja, a formação e posterior reação do ácido clorídrico com o solo. O ganho de resistência na parte intermediária e nas proximidades dos eletrodos catodos é decorrente da associação dos produtos da reação do silicato de sódio com a água (Eq. 4.3), juntamente com o cálcio proveniente da dissociação do cloreto de cálcio. A união desses elementos químicos propiciava a formação do silicato hidratado de cálcio (Eq. 4.4).



O elevado ganho de resistência no ponto intermediário gerou uma espécie de barreira (Fig. 4.21), com uma condutividade hidráulica inferior ao restante do corpo de prova. Isso prejudicou o deslocamento do hidróxido de cálcio até o local onde estavam alojados os eletrodos catodos, interferindo diretamente no ganho de resistência em suas proximidades.



Figura 4.21: Cimentação ocorrida na C\_E\_05 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

A Equação 4.4 esclareceu que, para que ocorresse a formação do silicato hidratado de cálcio (CSH), seria necessária a presença de cálcio (oriundo do  $\text{CaCl}_2$ ), silicato e oxidrilas (oriundos do  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Devido a essas informações, a C\_E\_06 foi realizada sem a presença de corrente elétrica e da tensão.

A Figura 4.22 mostra que houve a formação do CSH, porém não exatamente na parte intermediária da célula, tendo como consequência o fato de ela não ser transposta pelo MCPT. Os resultados obtidos com os ensaios de prospecção (Fig. 4.23) demonstraram que, nos pontos pré-estabelecidos para as suas realizações, não houve acréscimo de resistência e, quando comparadas às Figuras 4.21 e 4.22, fica evidente o papel positivo da técnica no auxílio da cimentação.

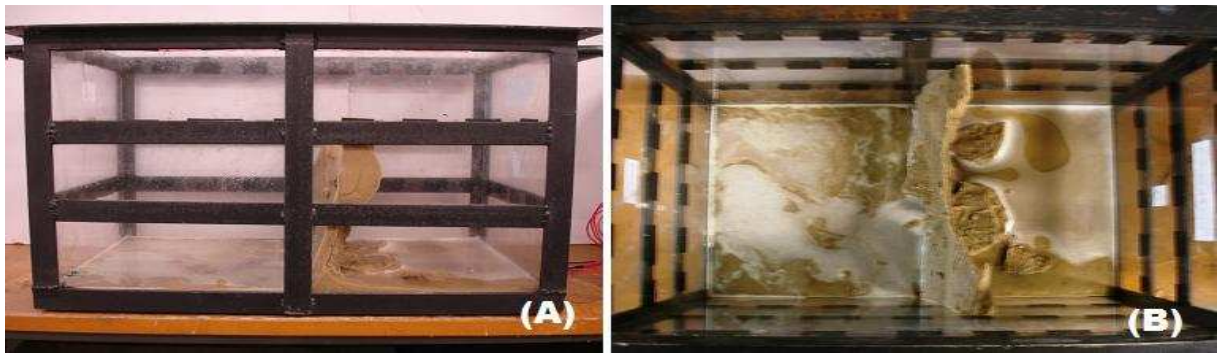


Figura 4.22: Cimentação ocorrida na C\_E\_06 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.



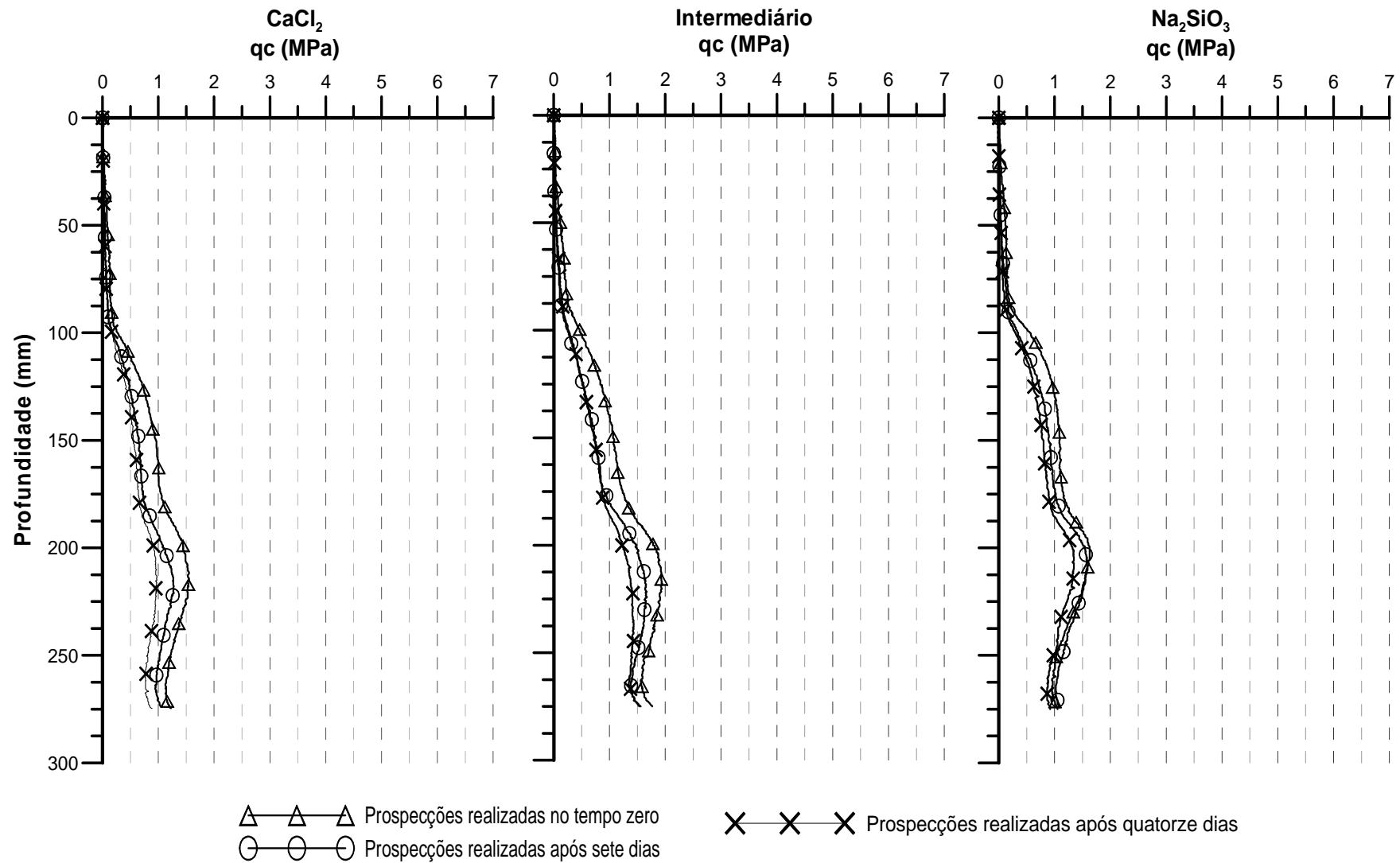


Figura 4.23: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 06 (C\_E\_06).

A C\_E\_07, representada pelas Figuras 4.24 e 4.26, foi realizada com as mesmas características da C\_E\_05, porém o tempo de duração do ensaio foi de apenas 7 dias. A realização desse ensaio explica-se pela necessidade de confirmar a repetibilidade dos resultados. Apesar de a Figura 4.20 não estar na mesma escala das Figuras 4.26 e 4.27, foi possível verificar que o comportamento delas é semelhante, contudo, se comparadas às Figuras 4.21 e 4.25, que mostram as cimentações ocorridas, seus tamanhos e espessuras são diferentes devido ao menor tempo de duração do ensaio da C\_E\_07.

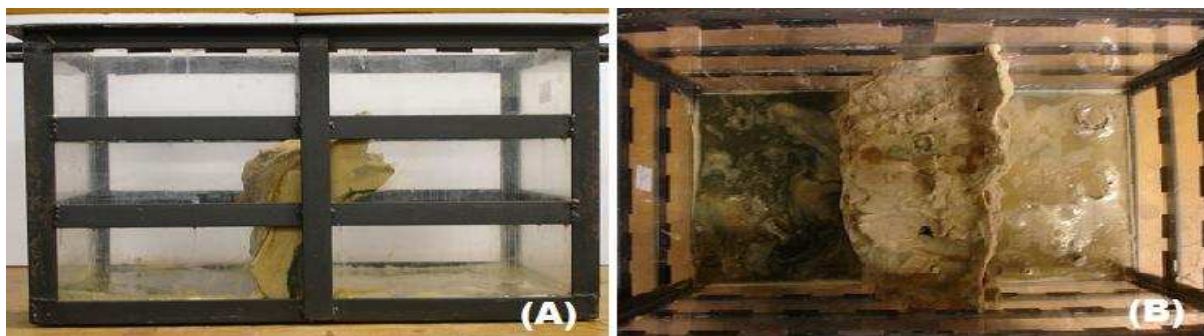


Figura 4.24: Cimentação ocorrida na C\_E\_07 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

Visando a economia de recursos energéticos em uma possível aplicação da técnica de eletrocínética *in situ*, a C\_E\_08 foi realizada com a metade da tensão e uma amperagem inferior à aplicada na C\_E\_07. A Figura 4.25 demonstra o perfil cimentado apresentado por ela.

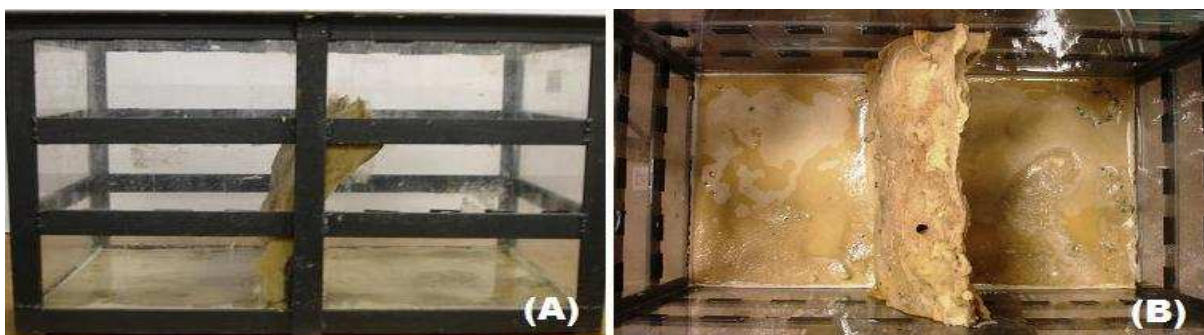


Figura 4.25 Cimentação ocorrida na C\_E\_08 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

Os resultados plotados na Figura 4.27 demonstram um comportamento praticamente uniforme em relação às células que receberam soluções de cloreto de cálcio e de silicato de sódio, entretanto há uma pequena queda do ganho de resistência se comparada, por exemplo, ao ensaio C\_E\_07 (Fig. 4.26).

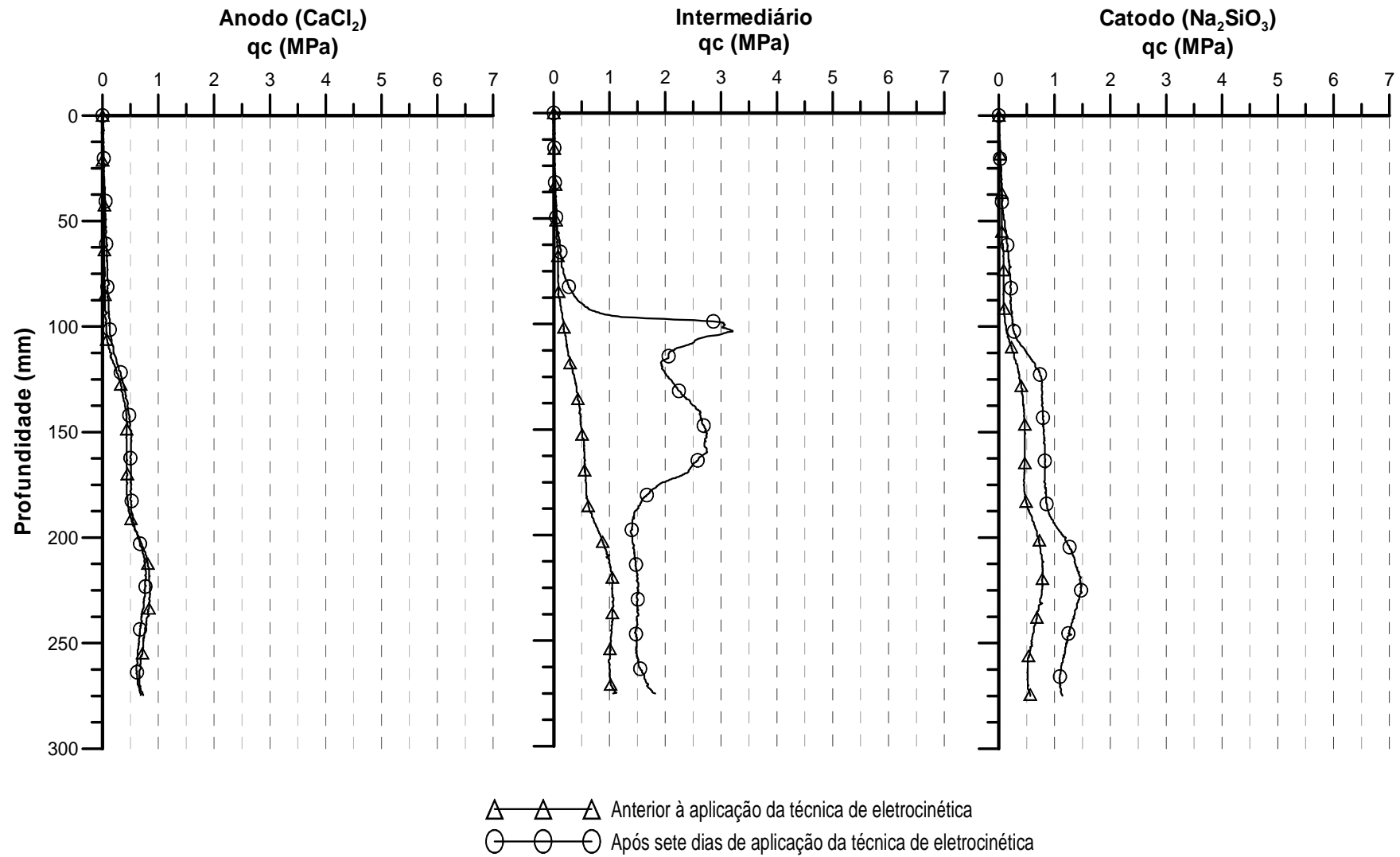


Figura 4.26: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 07 (C\_E\_07).

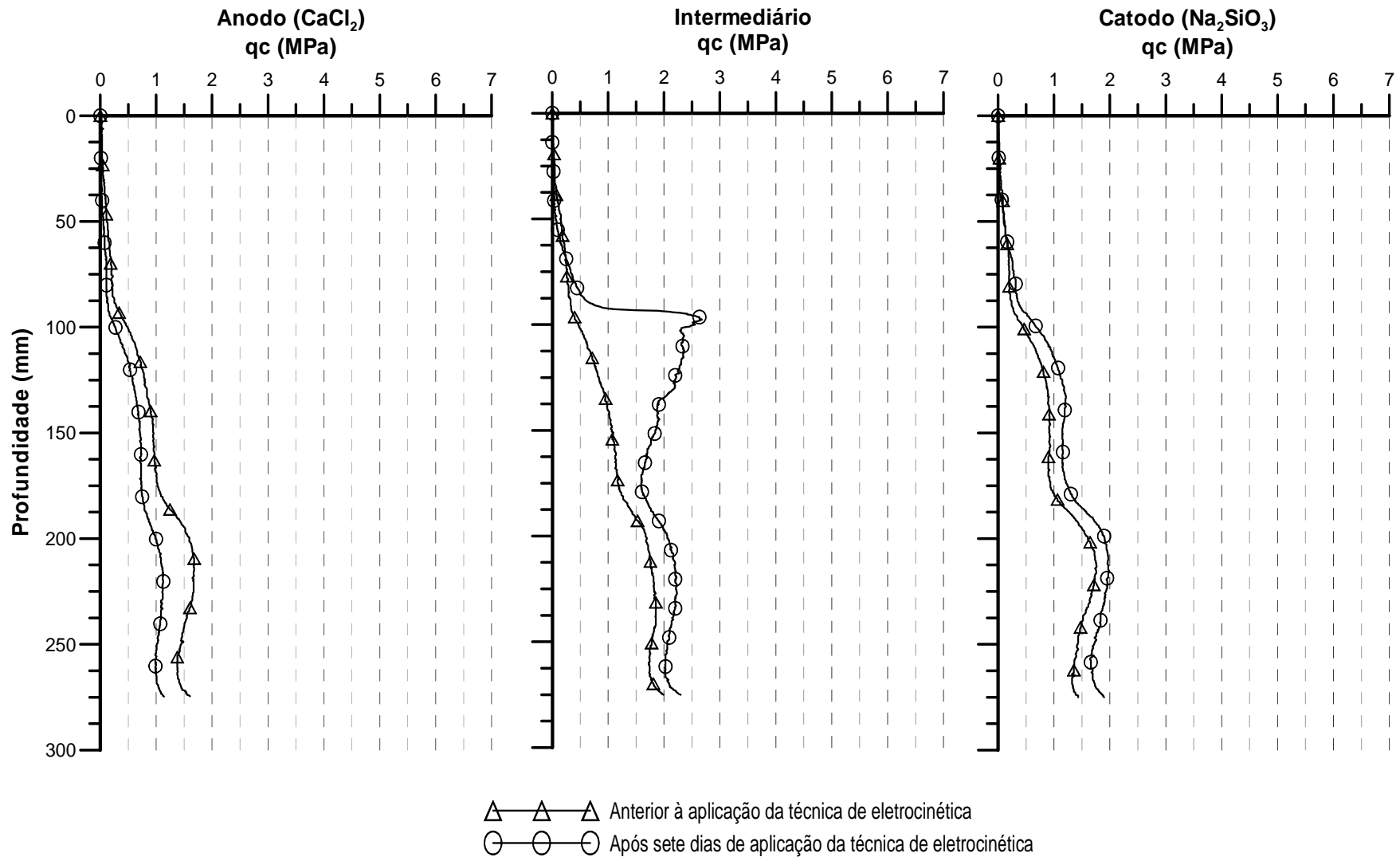


Figura 4.27: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 08 (C\_E\_08).

Os resultados obtidos com as soluções em questão, até o momento, são extremamente interessantes. Os ganhos de resistência tanto na porção intermediária quanto nas proximidades dos catodos são apreciáveis, embora, os resultados obtidos junto aos anodos deixem a desejar. Em busca de uma uniformização dos ganhos de resistência mecânica por parte solo, estabeleceu-se uma nova bateria de experimentos nos quais as soluções e a polaridade dos eletrodos, depois de decorrido metade do tempo, seriam invertidas. Ou seja, os catodos que inicialmente recebiam a solução de silicato de sódio na metade do tempo do experimento (3,5 dias), tornaram-se os anodos e começaram a receber a solução cloreto de cálcio. A mesma modificação ocorreu em relação aos eletrodos anodos que passaram a ser eletrodos catodos, porém foi substituída a solução de cloreto de cálcio pela de silicato de sódio.

Os resultados obtidos com C\_E\_09 foram positivos, visto que os perfis plotados na Figura 4.28 indicam que houve um acréscimo de resistência em todos os pontos prospectados. Esses incrementos na resistência não foram todos na mesma proporção. O maior ganho ocorreu na extremidade a qual alojava primeiramente os eletrodos catodos e posteriormente os eletrodos anodos. Parte desse ganho ocorreu já nos primeiros três dias, assim como as demais células que receberam essas mesmas soluções. Com a troca das soluções e das posições dos catodos e anodos, ocorreu a junção dos íons de cálcio, oxidrilas e silicatos, conforme foi apresentado anteriormente na Equação 4.4, o que promoveu a formação do CSH.

O ganho ocorrido no anodo que posteriormente passou a ser catodo deve-se exclusivamente aos três dias finais do experimento. Nos dias iniciais, a acidificação do ambiente gerado pela formação do HCl não permitiu a formação de nenhuma substância cimentante e ainda reagiu com o solo provocando uma queda da resistência. A adição da solução de silicato de sódio provocou a alcalinização do meio, além de inserir íons de sílica e oxidrilas que permitiram a formação do CSH.

O menor ganho ocorreu na posição intermediária e foi facilmente explicado quando se observou a Figura 4.29. A inversão das soluções fez com que ocorresse a formação de uma barreira cimentada pelo silicato hidratado de cálcio no entorno dos drenos. Essa camada cimentada de reduzida condutividade hidráulica impedia que os íons necessários à formação do silicato hidratado de cálcio se movimentassem e reagissem na porção intermediária da célula.

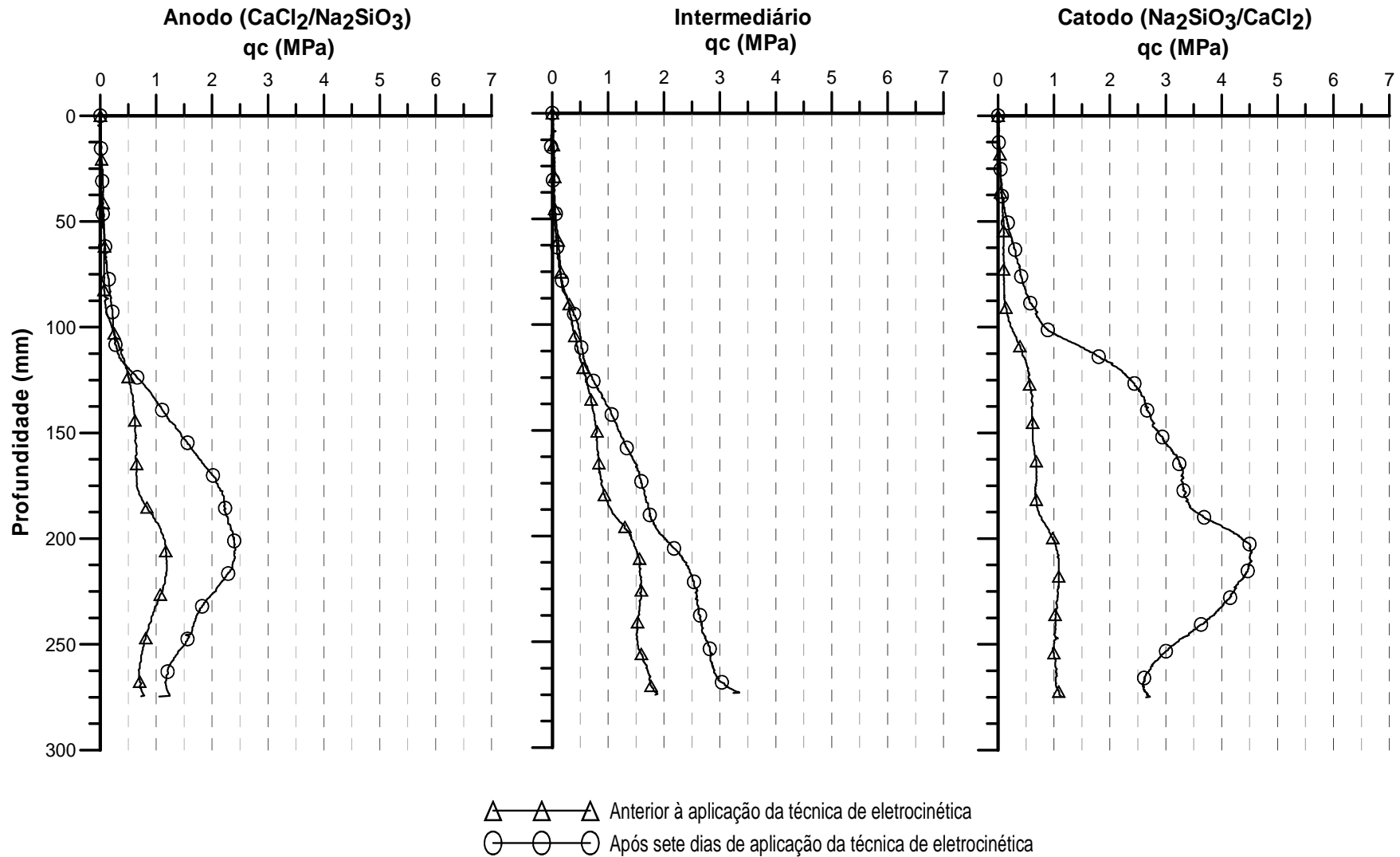


Figura 4.28: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 09 (C\_E\_09).



Figura 4.29: Cimentação ocorrida na C\_E\_09 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

Como ocorreu no ensaio da C\_E\_08, durante ensaio da C\_E\_10, com o intuito de fazer economia de recursos em uma possível aplicação da técnica de eletrocinética, optou-se pela diminuição dos valores da tensão e da corrente elétrica aplicados sobre a célula. Essa diminuição acarretou em ganhos de resistência mecânica (Fig. 4.30) menores em relação aos resultados expostos na C\_E\_09 (Fig. 4.28). É possível afirmar que a acidez provocada pela formação do HCl junto aos eletrodos anodos não conseguiu ser revertida totalmente com a adição da solução de silicato de sódio e, conseqüentemente, não houve grandes mudanças entre os resultados anteriores e posteriores à técnica. Nas outras duas posições (intermediária e catodos) foi observada uma tendência de comportamento equivalente, porém em menor proporção, a apreciada nos resultados da Figura 4.28.

A Figura 4.31 apresenta os pontos em que ocorreu a formação das cimentações da célula C\_E\_10. De forma menos pronunciada, a C\_E\_10 apresentou a mesma linha de tendência da C\_E\_09 (Fig. 4.29).



Figura 4.31: Cimentação ocorrida na C\_E\_10 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

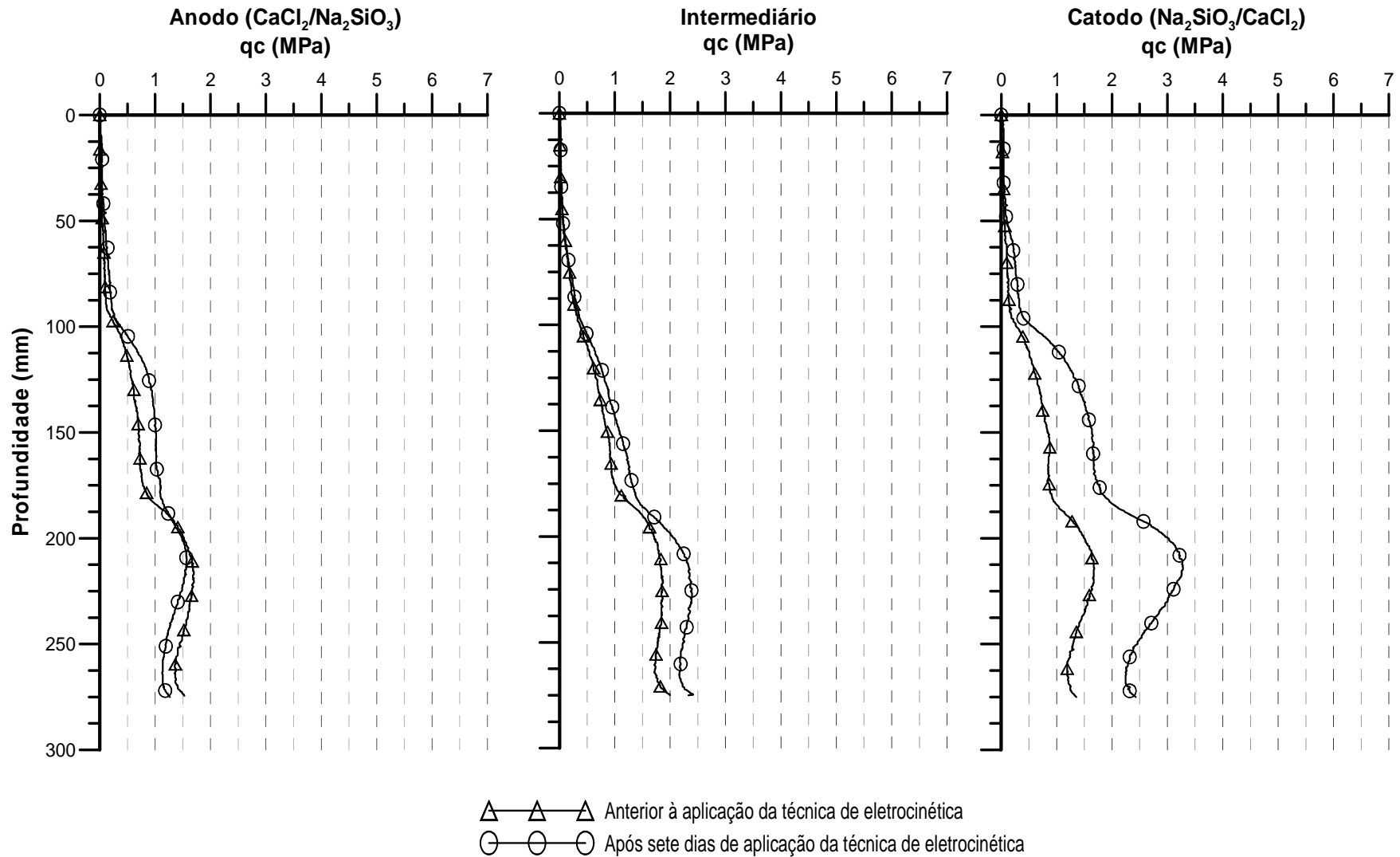


Figura 4.30: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 10 (C\_E\_10).



A décima primeira célula eletrocinética (C\_E\_11) caracterizou-se pela similaridade com a C\_E\_06. Essa semelhança foi atribuída pela não aplicação de tensão e corrente elétrica ao sistema. Os resultados (Fig. 4.32) demonstraram que houve uma queda da resistência nas proximidades dos eletrodos anodos que em seguida viraram catodos. Na parte intermediária, o comportamento permaneceu idêntico ao comportamento inicial, com um pequeno incremento na porção média do perfil, acarretado pela prospecção do MCPT por uma fina camada cimentada. Nas proximidades dos catodos, ocorreu um incremento de resistência pela ligação dos íons e formação do CSH.

A Figura 4.33, que apresenta as regiões cimentadas da C\_E\_11, demonstra a existência de um pequeno perfil na parte intermediária da célula eletrocinética semelhante à Figura 4.22.

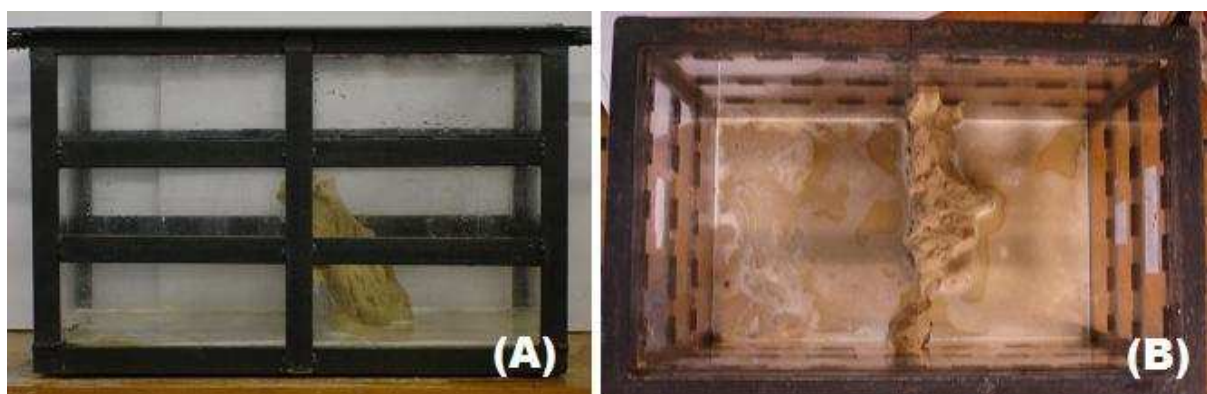


Figura 4.33: Cimentação ocorrida na C\_E\_11 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

O último ensaio realizado com essas soluções (C\_E\_12) tinha por objetivo diagnosticar se haveria alguma influência nos resultados caso as concentrações das soluções fossem reduzidas. Os resultados apresentados na Figura 4.34 possuem a mesma tendência aos apresentados na Figura 4.27, apesar de eles apresentarem variáveis diferentes. Novamente foi verificada uma queda nas proximidades dos anodos devido à reação do ácido clorídrico e um acréscimo de resistência muito pronunciado na parte intermediária da célula, em virtude da formação do silicato hidratado de cálcio. A Figura 4.35 apresenta as cimentações que ocorreram na célula C\_E\_12.

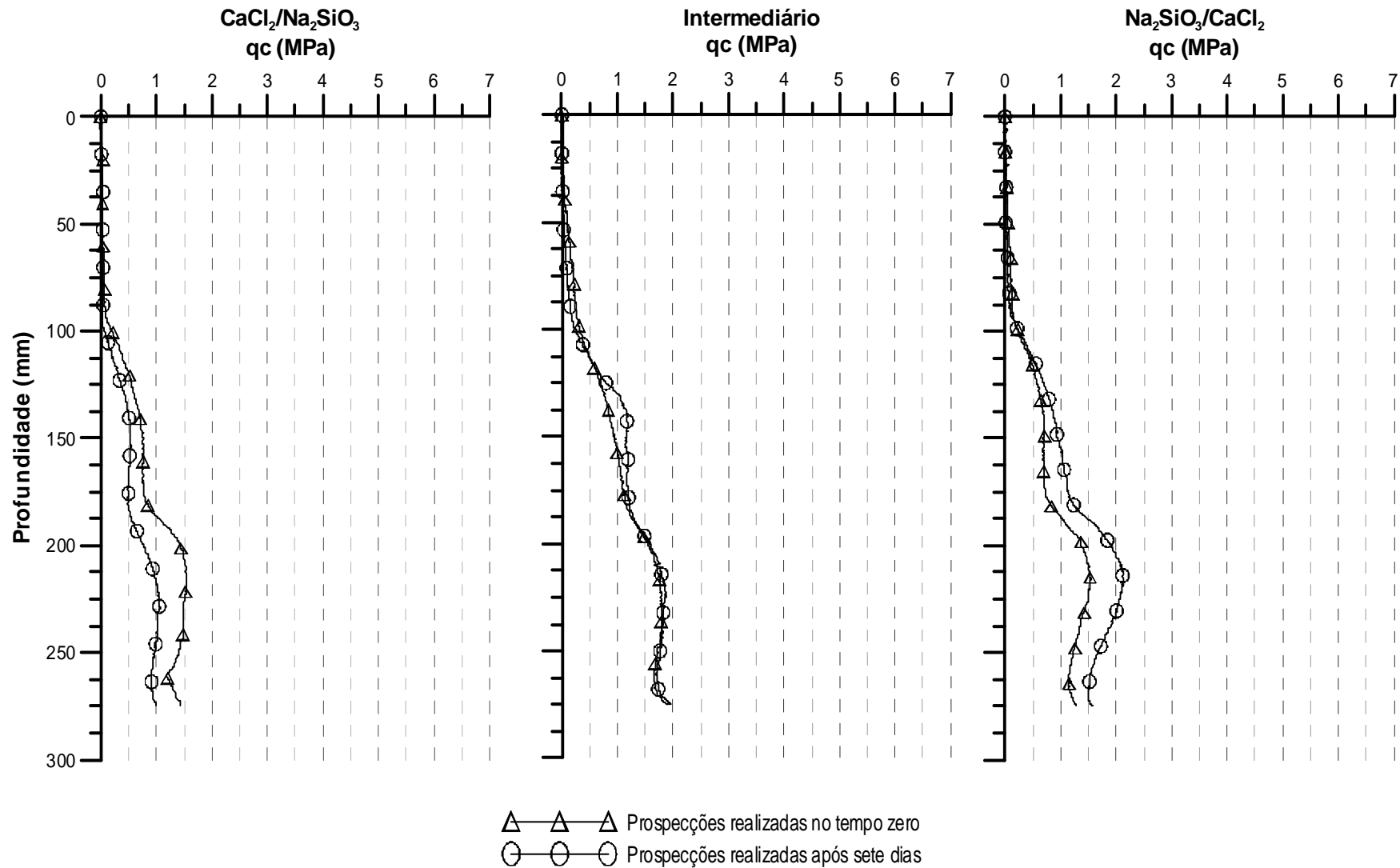


Figura 4.32: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 11 (C\_E\_11).

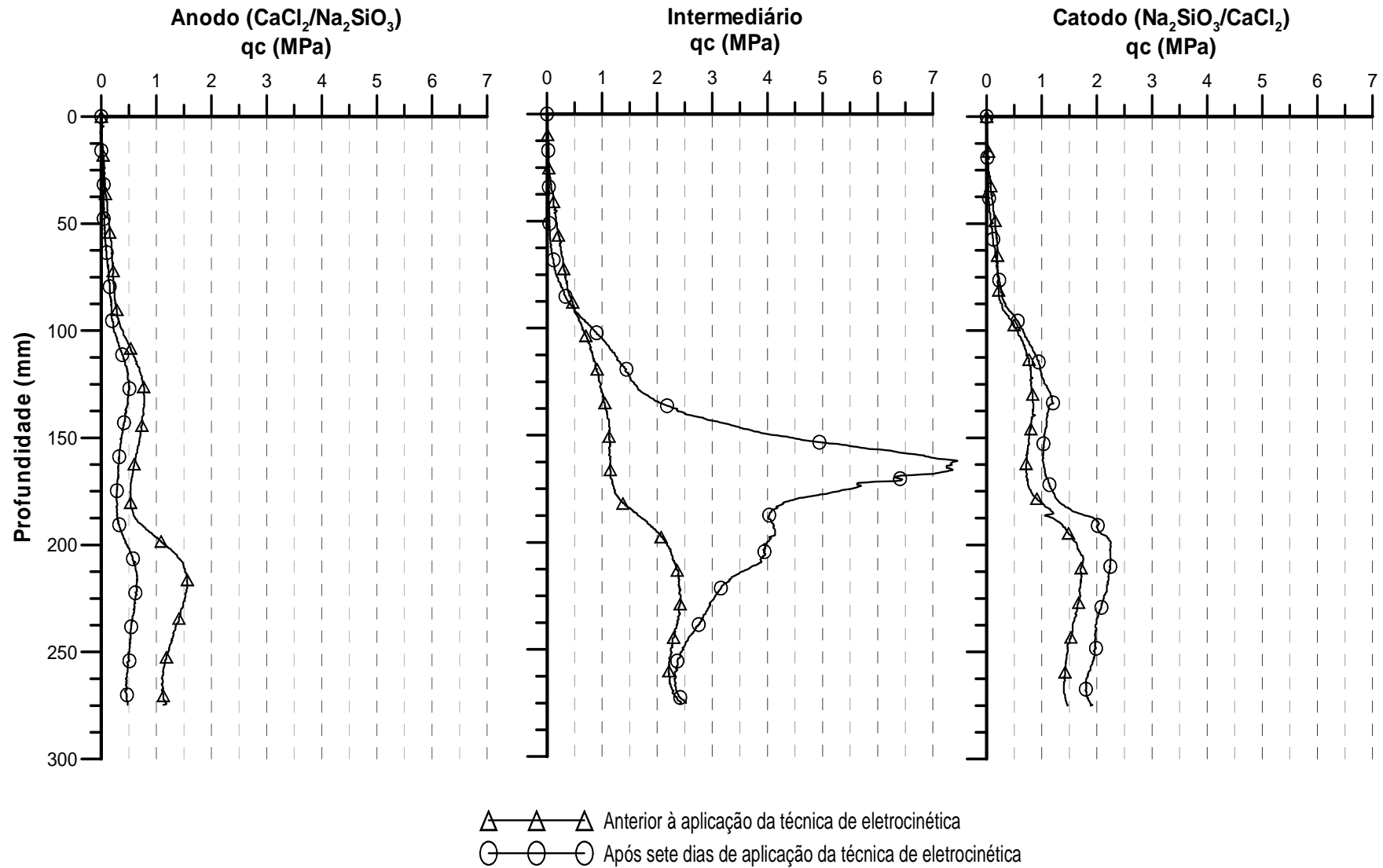


Figura 4.34: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 12 (C\_E\_12).

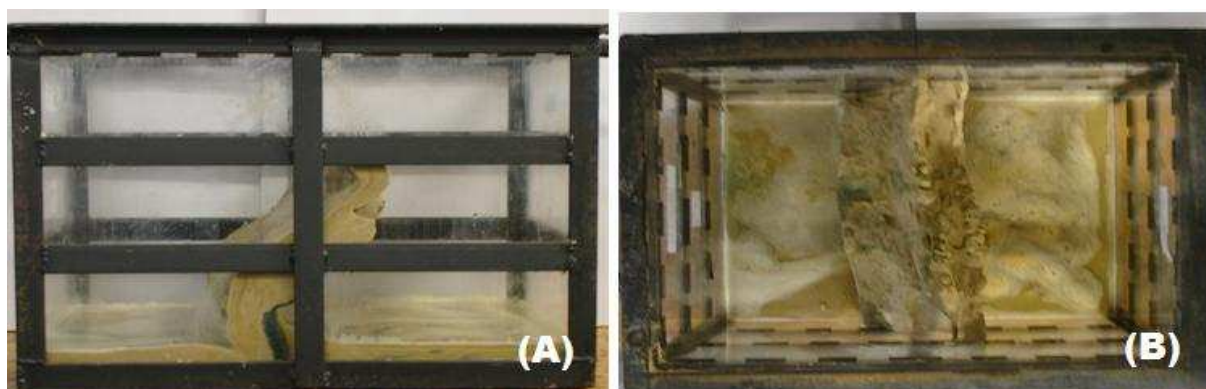


Figura 4.35. Cimentação ocorrida na C\_E\_12 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

Quando comparamos os ensaios em que ocorreu a formação de um perfil cimentado, verificou-se que a concreção nunca foi totalmente vertical, visto que sempre apresentou uma tendência a curvar-se em direção ao anodo (algumas figuras apresentam a posição do anodo no lado direito e outras no lado esquerdo), onde eram adicionadas as soluções de cloreto de cálcio.

A energia produzida pelas pilhas afetou diretamente o transporte e a velocidade dos íons no meio, fazendo com que os seus deslocamentos fossem diferentes, ocasionando a inclinação dos perfis cimentados. Devido à energia gerada pelas pilhas diferenciais, podemos atribuir essa inclinação a elas.

#### 4.2.3.3 Célula com soluções de cloreto de cálcio e de bicarbonato de sódio

O experimento designado C\_E\_13 foi realizado objetivando a formação do agente cimentante carbonato de cálcio. Ao invés de colocarmos a água carbonatada na célula diretamente, onde o gás carbônico devido a sua instabilidade seria rapidamente dissipado, optou-se por fazer uma solução com bicarbonato de sódio. Esse reagente, quando em contato com um meio ácido, libera o gás carbônico, o que poderia representar um tempo maior de permanência desse gás no solo. A adição da solução de cloreto de cálcio, devido à formação do ácido clorídrico, produzia um meio ácido e, dessa forma, propiciava a liberação do gás carbônico que reagiria com o cálcio.

Assim como nos ensaios realizados com a água carbonatada, ao ocorrer a liberação do gás, houve um aumento qualitativo significativo do volume de vazios do corpo de prova, comprovado posteriormente com a Figura 4.36, o que fez com que a resistência do solo diminuísse tanto nos arredores dos eletrodos catodos como dos eletrodos anodos.

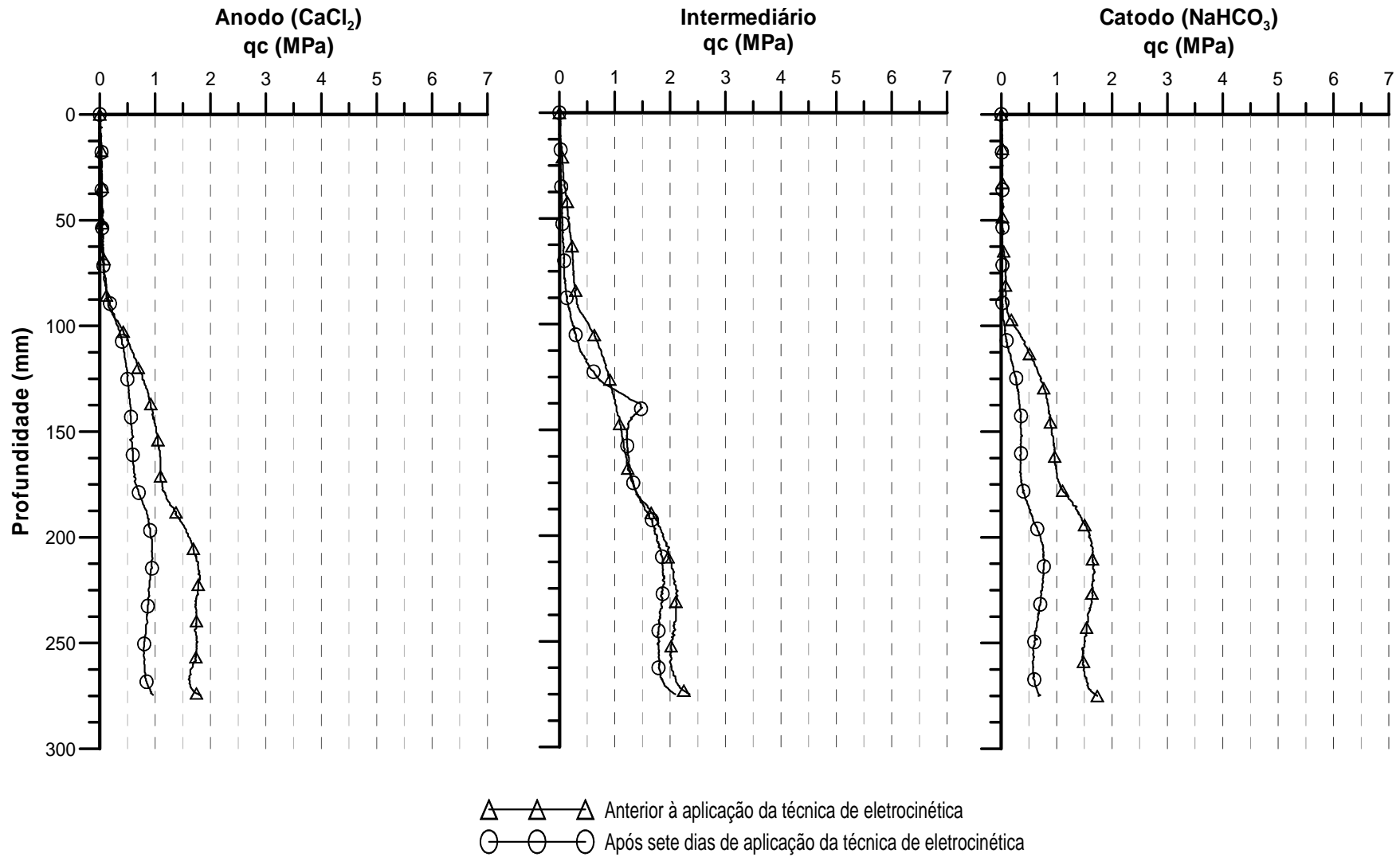


Figura 4.36: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 13 (C\_E\_13).

Os ensaios de prospecção nos pontos intermediários não sofreram com tal efeito devido à formação de um perfil cimentado, diferentemente das células que utilizavam água carbonatada e solução de cloreto de cálcio. Esse perfil pode ser observado na Figura 4.37.

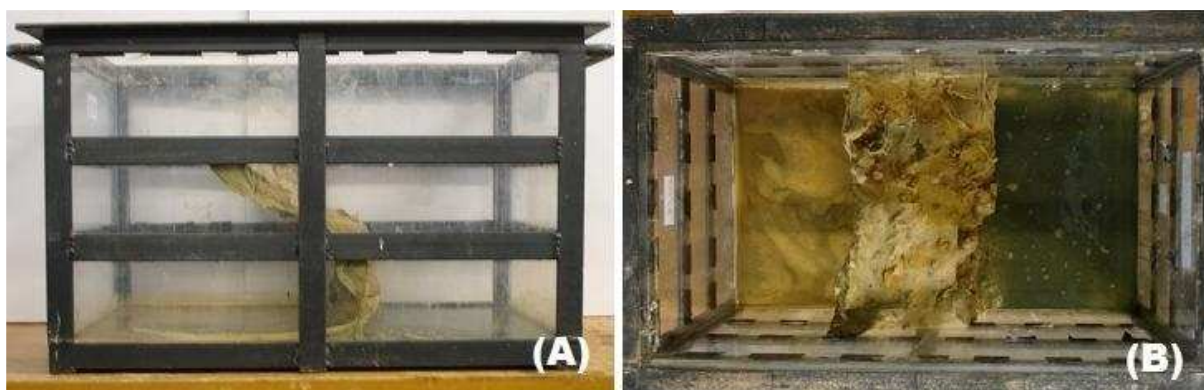


Figura 4.37: Cimentação ocorrida na C\_E\_13 - (A) Vista lateral e (B) Vista superior.

#### 4.2.3.4 Célula com água destilada

Em virtude do desconhecimento comportamental do corpo de prova frente à eletrólise da água, realizamos um experimento com a aplicação da técnica de eletrocinética apenas com adição de água ao corpo de prova.

Os resultados, que podem ser verificados na Figura 4.38, demonstraram que aparentemente não ocorreram reações que interferissem na resistência mecânica do solo. Entretanto, existe a possibilidade do MCPT, confeccionado durante essa pesquisa, não possuir sensibilidade suficiente para registrá-las.

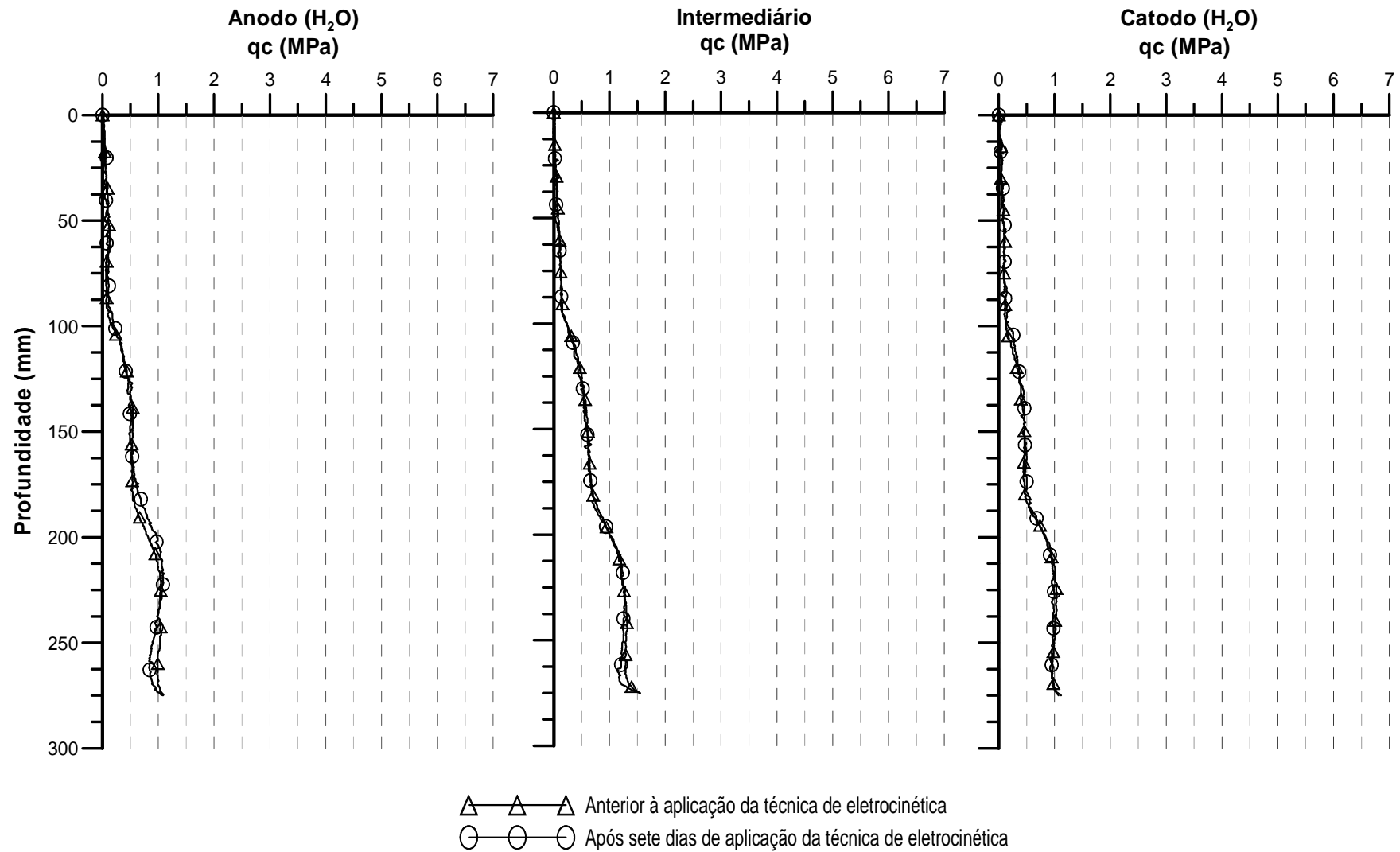


Figura 4.38: Ensaio de prospecção na célula eletrocinética 14 (C\_E\_14).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Neste capítulo, serão relatadas as principais conclusões obtidas a partir dos experimentos laboratoriais realizados, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros. Dessa forma, foram estabelecidas as seguintes conclusões.

#### a) Quanto ao *Miniature Cone Penetration Test* (MCPT)

- O equipamento desenvolvido é uma valiosa ferramenta geotécnica para usos laboratoriais, podendo vir a substituir futuramente ensaios de resistência a compressão simples;
- A máxima carga para qual o MCPT foi projetado (10 MPa) apenas não foi suficiente para a realização de ensaios de prospecção na porção intermediária das células que receberam soluções de cloreto de cálcio e silicato de sódio por tempos iguais ou superiores a quatorze dias;
- Para a identificação dos perfis requeridos neste trabalho, a resolução obtida através das ampliações realizadas eletronicamente e computacionalmente do sinal de saída dos extensômetros foram suficientes;
- Os sistemas de motorização, transferência de torque, controle de cravação e extração do cone, bem como o que permitia a movimentação e proporcionava a ancoragem do sistema completo do MCPT às células eletrocinéticas apresentaram ótimos resultados. Porém, o sistema de controle de velocidade, devido à baixa sensibilidade, não apresentou facilidade em seu manuseio, proporcionando pequenas dispersões nas velocidades de cravação.



**b) Quanto à diferença de potencial aplicada**

- A função desempenhada pela diferença de potencial associada à corrente elétrica é de fundamental importância para que haja o deslocamento dos íons e a possibilidade de formação de regiões cimentadas maiores;
- Valores de tensão maiores proporcionam uma maior movimentação dos íons e, conseqüentemente, resultados apreciáveis em um menor espaço de tempo;
- A quantidade de íons livres no sistema e as a porções cimentadas interferem diretamente na resistência elétrica do solo e, por conseqüência na condução da tensão.

**c) Quanto aos eletrodos**

- A oxidação e a redução dos eletrodos influenciaram de forma negativa, entretanto pouco comprometeram a aplicação da diferença de potencial na massa de solo, sendo que essa influência negativa aumenta com o passar dos dias do experimento;
- Quando são utilizadas soluções contendo cloro nas proximidades dos anodos, nem mesmo eletrodos de titânio classe 2 conseguem resistir às reações de oxidação e acabam deteriorando-se;
- A substituição dos eletrodos de titânio por eletrodos de aço carbono não proporcionou grandes mudanças na aplicação da diferença de potencial no solo e ainda apresentou grande vantagem econômica.

**d) Quanto à técnica de eletrocinética associada à injeção de soluções químicas**

- A aplicação da técnica de eletrocinética associada a injeções de soluções químicas objetivando a cimentação de solos é bastante complexa e exige grande conhecimento sobre o solo e ainda sobre os subprodutos cimentantes que virão a se formar;
- A utilização de solução de cloreto de cálcio nos anodos e de água carbonatada nos catodos, nas configurações realizadas neste trabalho, não se mostrou eficiente na formação do carbonato de cálcio e ainda proporcionou uma queda de resistência no

solo pelo aumento do volume de vazios, ocasionado pela liberação de gás carbônico proveniente da água carbonatada;

- A adição de solução de cloreto de cálcio nos anodos e solução de silicato de sódio nos catodos proporcionou a formação de concreções com altas resistências, em quatorze dias, superiores a 10 MPa. Todavia, a formação das concreções ocorreu apenas onde o pH era propício para a formação do silicato hidratado de cálcio;
- A alternância de soluções de cloreto de cálcio e de silicato de sódio nos eletrodos catodos e anodos proporcionou os resultados mais apreciáveis em relação a resistência mecânica, contudo, ainda assim, de forma não homogênea;
- O uso de solução de cloreto de cálcio nos anodos e de solução de bicarbonato de sódio nos catodos, quando comparada às adições de cloreto de cálcio e de água carbonatada, propiciou um resultado mais positivo, determinado pela ocorrência da formação de uma pequena concreção na parte intermediária da célula, mesmo assim os resultados foram inexpressivos;
- O uso de solutos contendo cloro em sua composição química associado com os íons de hidrogênio produzidos pela eletrólise da água propiciou a formação de ácido clorídrico. Esse ácido atuou de forma negativa inibindo reações para formação de concreções, além de reagir com algum componente do solo fazendo com que, na maioria das células eletrocinéticas, ocorresse uma queda de resistência nas proximidades dos eletrodos anodos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade deste trabalho, tendo como objetivo a evolução dos conhecimentos sobre a aplicação da técnica de eletrocinética associada com injeções de soluções químicas, seguem algumas sugestões para estudos futuros:

- Substituir o potenciômetro controlador da velocidade de cravação do MCPT por um potenciômetro multi-voltas e acoplar um *encoder* ao sistema para que seja possível o controle exato da velocidade e da profundidade de prospecção, respectivamente;

- Substituir a solução de cloreto de cálcio por uma solução de nitrato de cálcio ou ainda de acetato de cálcio, visando a não formação do ácido clorídrico;
- Modificar o modo de inserção das soluções na célula eletrocinética, de forma que a adição seja realizada lentamente e que o nível de saturação permaneça inalterado durante todo o experimento;
- Modificar a disposição dos eletrodos nas células eletrocinéticas a fim de aplicar o campo elétrico em mais de uma direção;
- Realizar medidas de pH em vários pontos da célula e após confrontar com os ensaios de prospecção tentando identificar como o pH afeta o ganho de resistência do solo;
- Realizar ensaios de microscopia eletrônica de varredura com o intuito de detectar quais os materiais formados durante a aplicação da técnica, assim como identificar as reações que ocorrem entre as soluções e o solo;
- Realizar um estudo econômico para avaliar os custos necessários para a implantação da técnica de eletrocinética associada a injeções de soluções químicas e após confrontar com outros métodos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACAR Y. B.; ALSHAWABKEH, A. N., e PARKER, R. A. in EPA - Office Research and Development. **Theoretical and Experimental Modeling of Multi-Species Transport in Soils Under Electric Fields**. 1997. EPA/600/R-97/054.

ACAR, Y. B.; ALSHAWABKEH, A. N. Electrokinetic Remediation. I: Pilot-Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite. **Journal of Geotechnical Engineering**. New York, ASCE, v.122, n. 03, p. 173-185. 1996.

ADAMSON, A. W.; GAST, A. P. **Physical Chemistry of Surfaces**. 6th. John Wiley & Sons. New York. 784p. 1997.

ALMEIDA, G. C. P. **Caracterização física e classificação dos solos**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 145p. 2005.

ALSHAWABKEH, A. N.; SHEAHAN, T. C. Soft soil stabilisation by ionic injection under electric fields. **Ground Improvement**. Birmingham, v. 7, n. 04, p. 177-185. 2003.

ALSHAWABKEH, A. N.; YEUNG, A. T.; BRICKA, M. R. Practical aspects of in-situ electrokinetic extraction. **Journal of Environmental Engineering**. New York, ASCE, v.125, n. 01, p. 27-35. 1999.

AZZAM, R.; OEY, W. The Utilization of Electrokinetics in Geotechnical and Environmental Engineering. **Transport in Porous Media**. Springer. v. 42, n. 3, Mar. 2001a, p. 293-314(22).

AZZAM, R. ; OEY, W. **Electrokinetic Dewatering of Lime Sludge with Organic Content**. In: ASIAN SYMPOSIUM ON ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT. 3rd, Yogyakarta, Indonesia, 2001b , P. 280-293.

BARKER, J. E.; ROGERS, C. D. F.; BOARDMAN, D. I.; PETERSON, J. Electrokinetic stabilisation: an overview and case study. **Ground Improvement**. Birmingham, v. 8, n. 02, p. 145-154. 2004.

BREDA, E. M. **Água grau reagente para laboratório e outros fins especiais**. Internet. Site: [http://lqes.iqm.unicamp.br/canal\\_cientifico/lqes\\_esponde/%C1GUA%20GRAU%20REAGENTE.PDF](http://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/lqes_esponde/%C1GUA%20GRAU%20REAGENTE.PDF), acesso 28/5/2007.

CARVALHO, C. A. B. de; LIMA, D. C. de; FONTES, M. P. F. **Descontaminação de solos via eletroosmose**. Projeto de Pesquisa. UFV. Viçosa. 2006. 27p.

CASAGRANDE, M. D. T. **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre. 2005. 243p.

CAUWENBERGHE, L. V. **Electrokinetics**. (1997) Internet. Site [http://207.86.51.66/download/remed/elctro\\_o.pdf](http://207.86.51.66/download/remed/elctro_o.pdf), acesso em 24/01/2007.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Manual de produtos químicos perigosos**. Internet. Site: [http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/produtos/ficha\\_completa1.asp?consulta=CLORETO%20DE%20CÁLCIO](http://www.cetesb.sp.gov.br/emergencia/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=CLORETO%20DE%20CÁLCIO), acesso em 14/03/2007.

CONSOL, N. C.; FOPPA, D. C.; FESTUGATO, L.; HEINECK, K. S. Key parameters for strength control of artificially cemented soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. Reston, v.133, n. 02, p. 197-205. 2007.

COSTA, R. S. **Um novo equipamento triaxial para ensaios de solos na condição de deformação plana**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2005. 185p.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – EENG/UM. Azurém. 2001. 214p.

DENG, X.; JENNINGS, A. A. Evaluating an Electrokinetically Driven Extraction Method for Measuring Heavy Metal Soil Contamination. **Journal of Environmental Engineering**. New York, ASCE, v.132, n. 04, p. 527-537. 2006.

DEOTTI, L. O. G. **Controle de pH na técnica de biorremediação eletrocinética**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2005. 138p.

GIACHETI, H. L.; QUEIROZ, R. C. **O ensaio de piezocone e de minicone na investigação do subsolo: alguns exemplos de aplicação**. Geociências. UNESP. v. 23.n. 1/2, p. 89-103. 2004.

GUARACHO, V. V. **Remediação eletrocinética de chumbo e níquel em solos de landfarming de refinaria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - UFPR. Curitiba. 2005. 137p.

HARBOTTLE, M. J. **The use of electrokinetics to enhance the degradation of organic contaminants in soils**. Thesis (Ph.D). St Hugh's College, University of Oxford, United Kingdom. 225p. 2003.

HÖBELBARTH, Y.; AZZAM, R. **Dewatering of Municipal Sludge Using Electrokinetics**. In: INTERNATIONAL CONGRESS IAEG. 9<sup>th</sup>. Republic of South Africa: Durban, 2002. p. 1088-1093.

INGLES, O. G.; METACALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Melbourne: Butterworths Pty, 1972, 372p.

JOER, H. A.; FAHEY, M.; RANDOLPH, M. F. Experimental modelling of the cone penetrometer resistance in uncemented and artificially cemented calcareous soil. **The University of Western Australia**, research Report No. 1158. (1995).

KIM, S. O.; KIM, K. W.; DORIS STÜBEN, D. Evaluation of electrokinetic Removal of Heavy Metals from Tailing Soils. **Journal of Environmental Engineering**. New York, ASCE, v.128, n. 08, p. 705-715. 2002.

LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. B. **Soil Mechanics, SI Version**. John Wiley & Sons. New York. 553p. 1979.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parametros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal. Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - UFRGS. Porto Alegre. 2007. 147p.

MEIGH, A. C. **Cone Penetration Testing – methods and interpretation**. Butterworths. London. 141p. 1987

MENESES, L. A. de. **Utilização de geocélulas em reforço de solo mole**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – USP. São Carlos. 2004. 99p.

MONDELLI, G. **Investigação geoambiental em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos utilizando a tecnologia do piezocone**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia)– EP/USP. São Paulo. 2004. 391p.

MOSELEY, M. P. **Ground improvement**. Blackie Academic & Professional. Glasgow. 218p. 2000.

MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. John Wiley & Sons. New York. 422p. 1976.

PEDRAZZOLI, C. D.; IRYODA, k. I.; ARAÚJO PONTE, H. de. **Remediação Eletrocinética de Chumbo em Resíduos Industriais**. ENCONTRO E EXPOSIÇÃO BRASILEIRA DE TRATAMENTO DE SUPERFÍCIES. XI. Brasil: São Paulo, 2003.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 2 ed. Oficina de Testos. São Paulo. 355p. 2002.

PIVELI, Roque Passos ; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos**. 1. ed. São Paulo: ABES, 2005. v. 1. 350 p.

REDDY, K. R.; SAICHEK, R. E. Effect of Soil Type on Electrokinetic Removal of Phenanthrene Using Surfactants and Cosolvents. **Journal of Environmental Engineering**. New York, ASCE, v.129, n. 04, p. 336-346. 2003.

RODRIGUES, R. S. **Analysis of penetration resistance in sands**. Dissertation (Doctor of Philosophy in Engineering-Civil Engineering) – UNIVERSITY OF CALIFORNIA. Berkeley. 1993. 357p.

SCHMIDT, C. A. **Aplicação de técnica eletrocinética em laboratório a dois tipos de solos argilosos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2004. 350p.

SHANG J. Q.; DUNLAP W. A. Improvement of soft clays by high-voltage electrokinetics. **Journal of Geotechnical Engineering**. New York, ASCE, v.122, n. 04, p. 274-280. 1996.

SHANG, J. Q.; MOHAMEDHASSAN, E.; ISMAIL, M. Electrochemical cementation of offshore calcareous soil. **Canadian Geotechnical Journal**. Ottawa, NRC. v. 41, n. 05, p. 877-893. 2004.

SPINELLI, L.F. **Comportamento de fundações superficiais em solos cimentados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS. Porto Alegre. 1999. 133p.

SUÈR, P.; LIFVERGRE, T. Mercury-contaminated soil remediation by iodide and electroreclamation. **Journal of Environmental Engineering**. New York, ASCE, v.129, n. 05, p. 441-446. 2003.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. Mapeamento geológico de planícies costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**. Porto Alegre. ISSN 1678-5975. n. 03, p. 109-116. 2005.

TUMAY, M. T.; KURUP, U. P. The Design and Operation of a Novel Miniature Cone Penetration Test System, **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 6, 2001.

TSUTSUMI, M. **Apostila de mecânica dos solos I**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 13p. 2006.

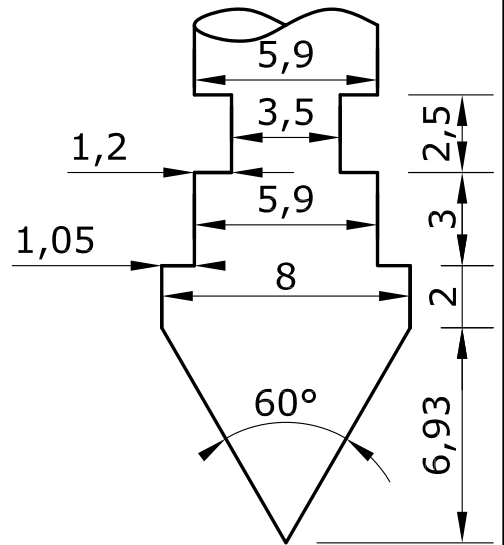
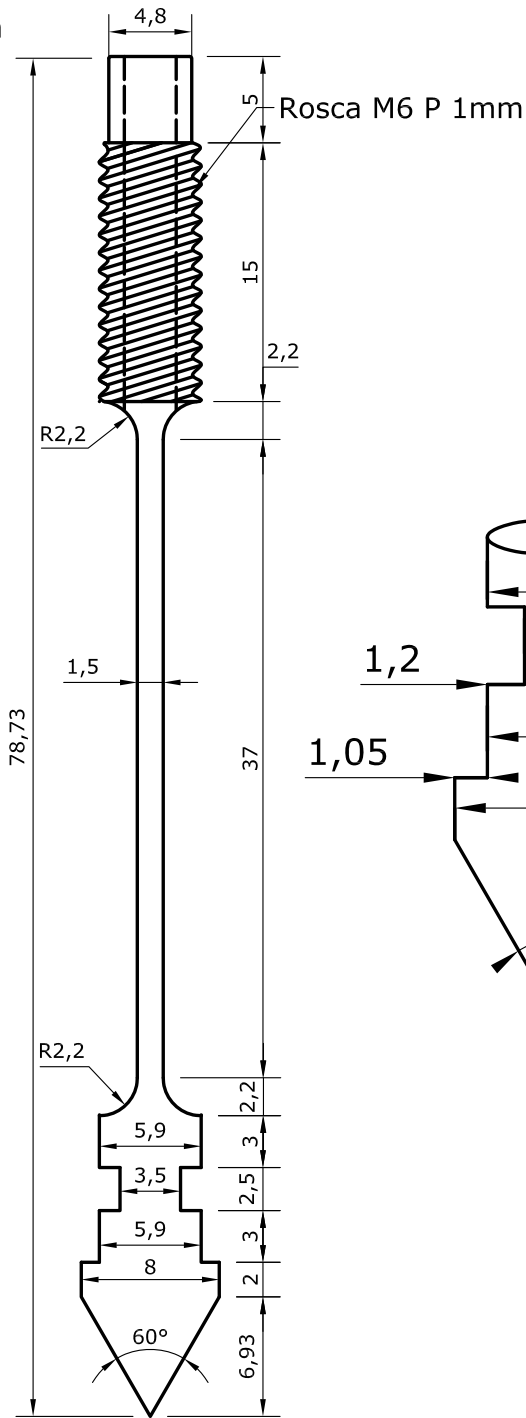
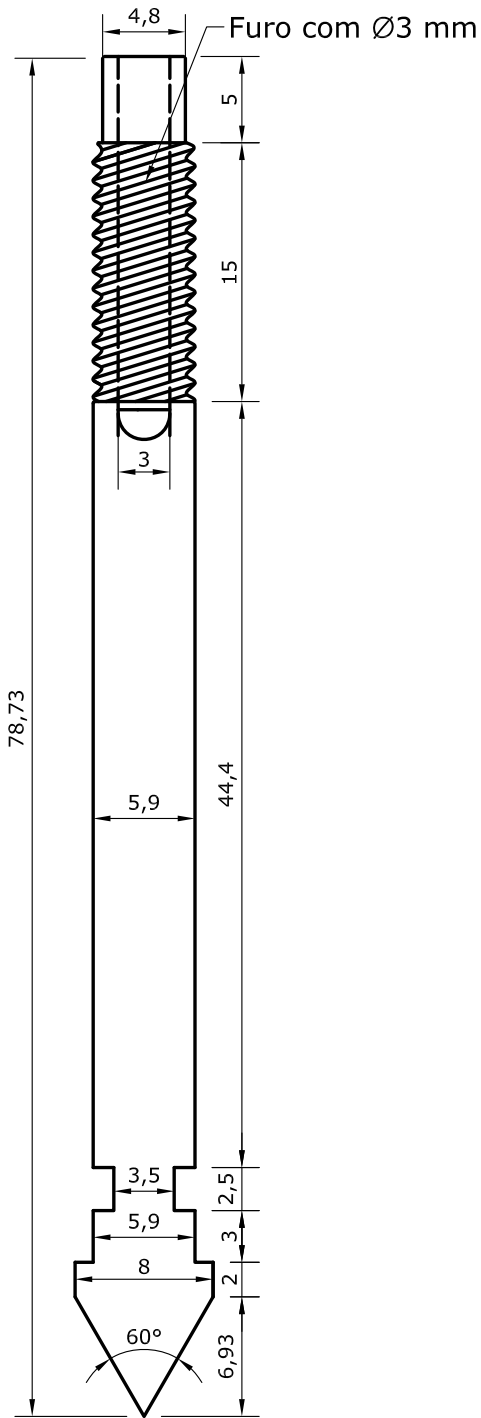
VAN IMPE W.F. **Soil improvement techniques and their evolution**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1989. 125p.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para a aplicação como reforço da base de fundações superficiais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGE/UFGRS. Porto Alegre. 2003. 248p.

ZHUANG, Y. F.; WANG, Z. Interface electric resistance of electroosmotic consolidation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, technical note, ASCE, v.133, n. 12, p. 1617-1621. 2007.

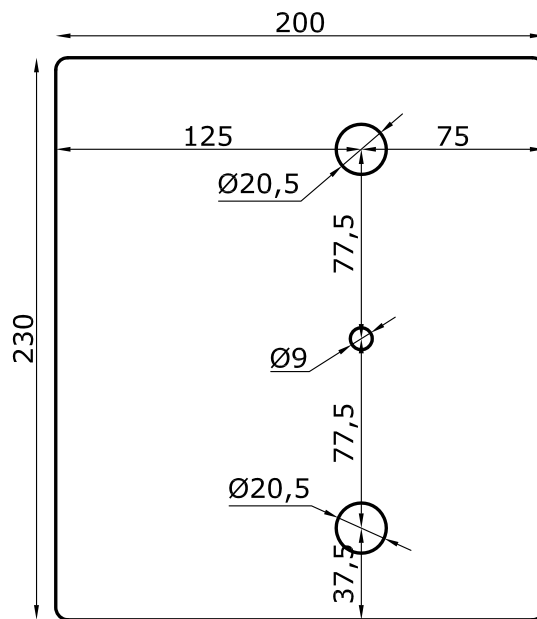
## APÊNDICES





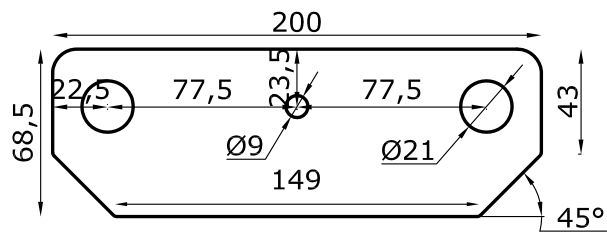
		Engenheiro Civil	
		Data: Fevereiro 2008	
TÍTULO: Ponteira MCPT		Material: Aço Inoxidável AISI 420	
LOCAL: Porto Alegre/RS		PROPRIETÁRIO: UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO	
RESP. TÉCNICO: Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756		PROPRIETÁRIO: _____	
		Prancha: <b>01</b>	





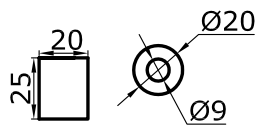
Placa metálica de ¼" de espessura  
(1 peça)

**08**




Placa metálica de ¼" de espessura  
(1 peça)

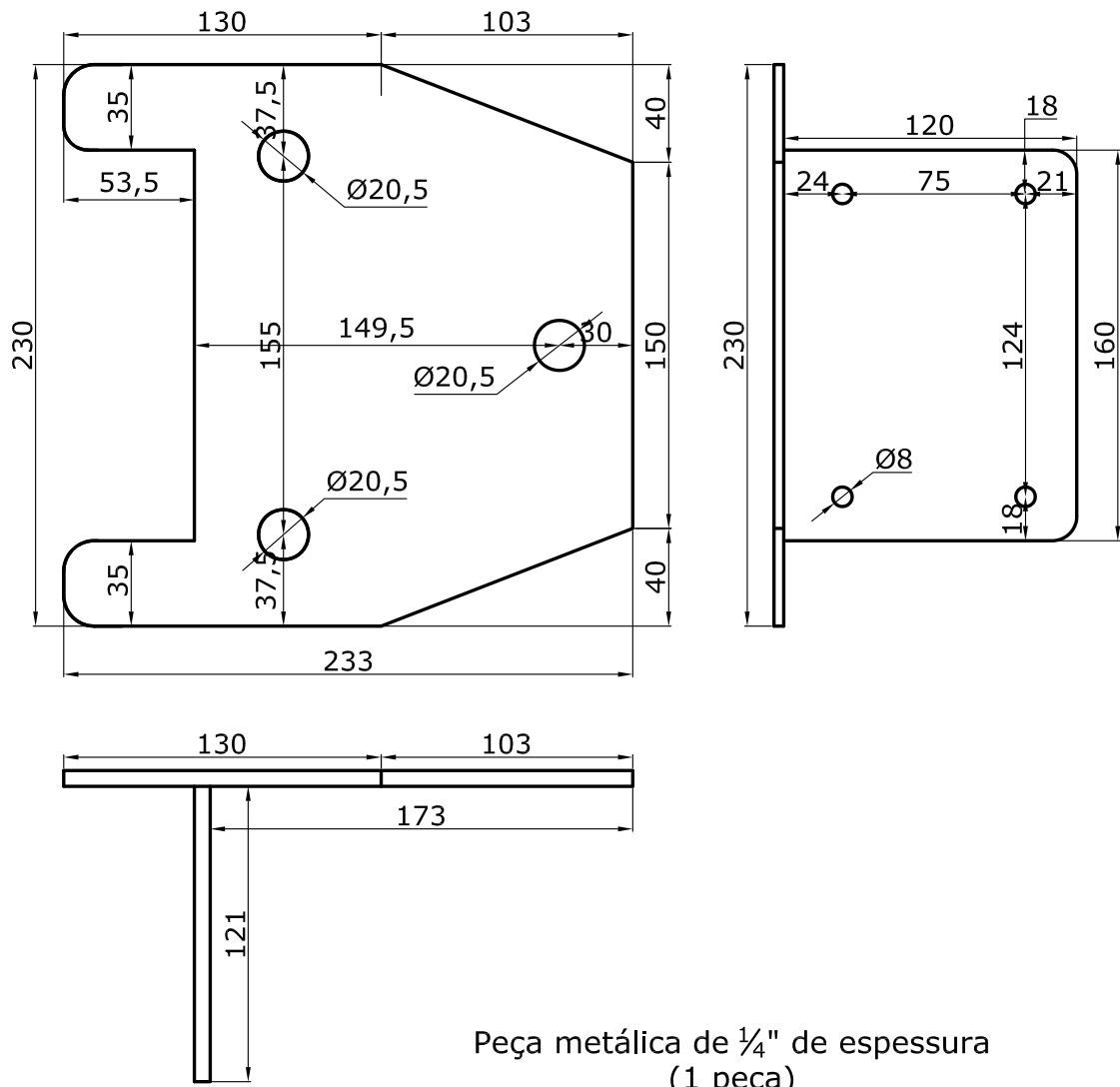
**05**



Direcionador em bronze  
(1 peça)

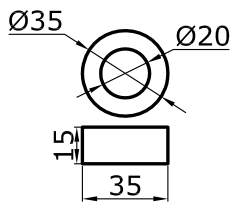
**07**

<b>TÍTULO:</b> Detalhamento peças 05, 07 e 08  <b>LOCAL:</b> Porto Alegre/RS  <b>RESP. TÉCNICO:</b>  Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756	 <b>Anderson Fonini</b> Engenheiro Civil	Data: <b>Fevereiro 2008</b>
	<b>Material:</b> Aço carbono e bronze	Escala: s/ escala
	<b>PROPRIETÁRIO:</b> UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO	Prancha: <b>03</b>



Peça metálica de ¼" de espessura  
(1 peça)

**04**



Bucha metálica (2 peça)

**03**



Engenheiro Civil

TÍTULO:  
Detalhamento peças 03 e 04

LOCAL:  
Porto Alegre/RS

RESP. TÉCNICO:  
Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756

Material:  
Aço carbono

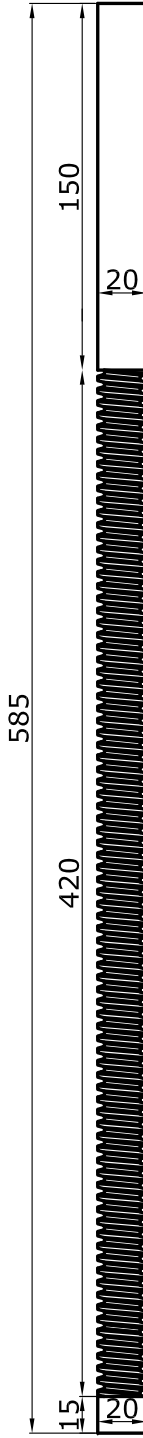
PROPRIETÁRIO:  
UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO

PROPRIETÁRIO:

Data:  
Fevereiro  
2008

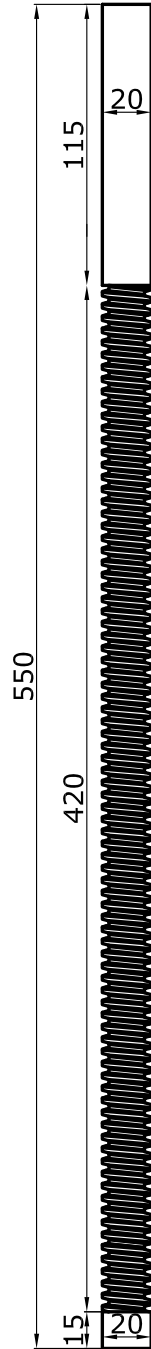
Escala:  
s/ escala

Prancha:  
**04**



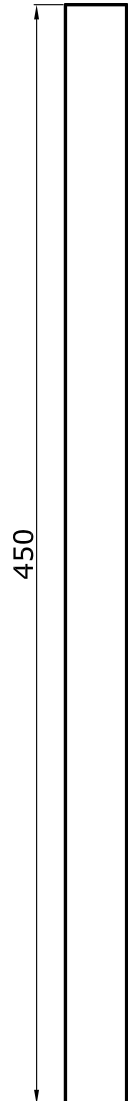
Rosca esquerda  
M 20 - passo 1 mm  
(1 peça)

**10**



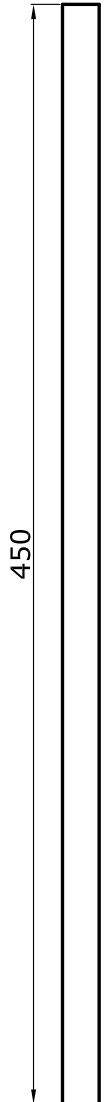
Rosca esquerda  
M 20 - passo 1 mm  
(1 peça)

**02**



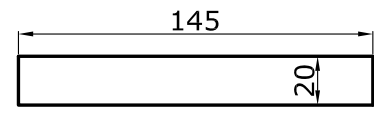
Perfil tubular de Ø25 mm  
(2 peças)

**09**



Perfil tubular de Ø20 mm  
(2 peças)

**06**



Eixo pequeno frontal

**11**



Engenheiro Civil

TÍTULO:  
Detalhamento peças 02, 06, 09, 11 e 12

LOCAL:  
Porto Alegre/RS

RESP. TÉCNICO:  
Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756

Material:  
Aço carbono

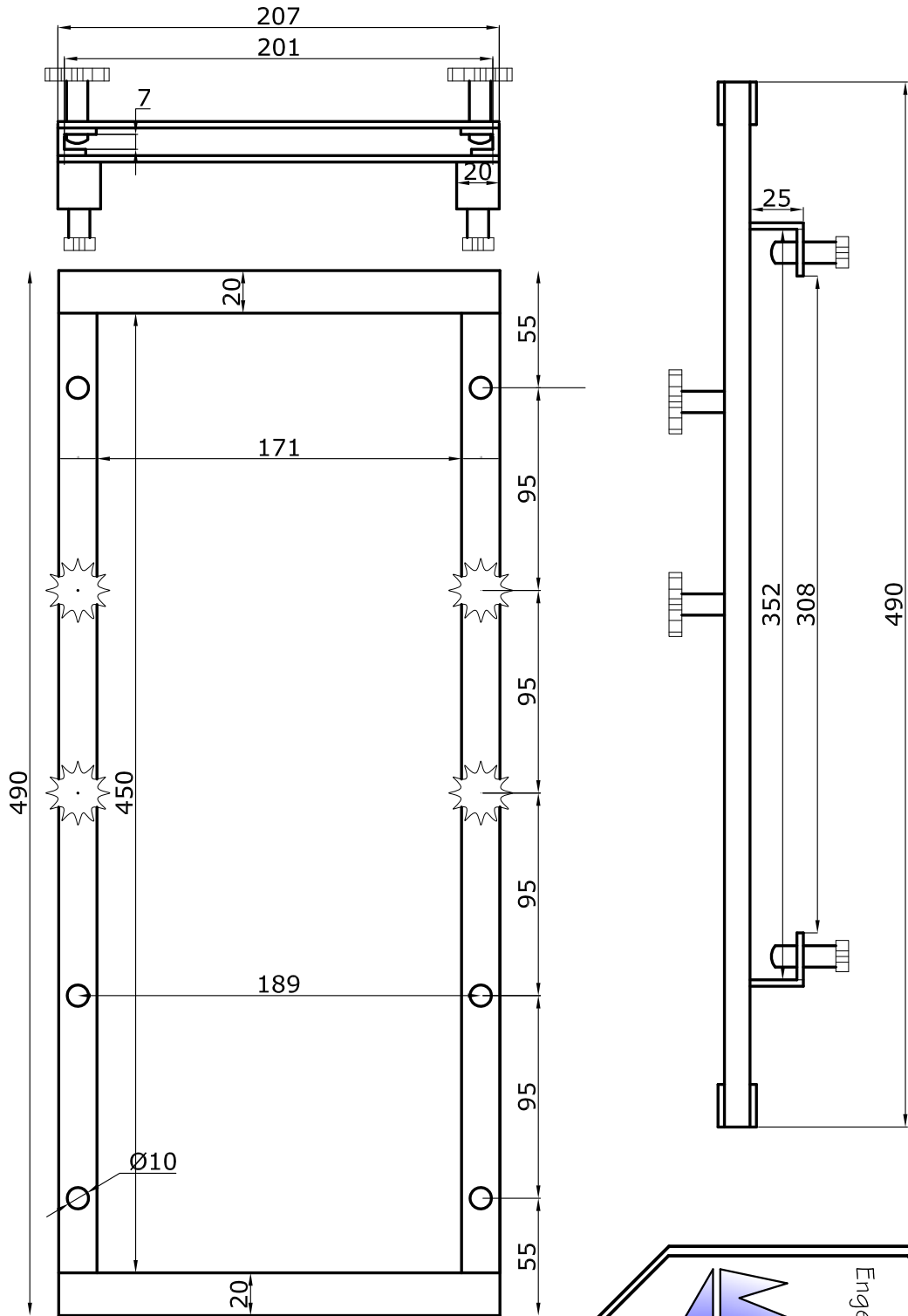
PROPRIETÁRIO:  
UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO

PROPRIETÁRIO:

Data:  
Fevereiro 2008

Escala:  
s/ escala

Prancha:  
**05**



Engenheiro Civil

TÍTULO:  
Suporte para ancoragem MCPT

LOCAL:  
Porto Alegre/RS

RESP. TÉCNICO:  
\_\_\_\_\_  
Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756

Material:  
Aço carbono

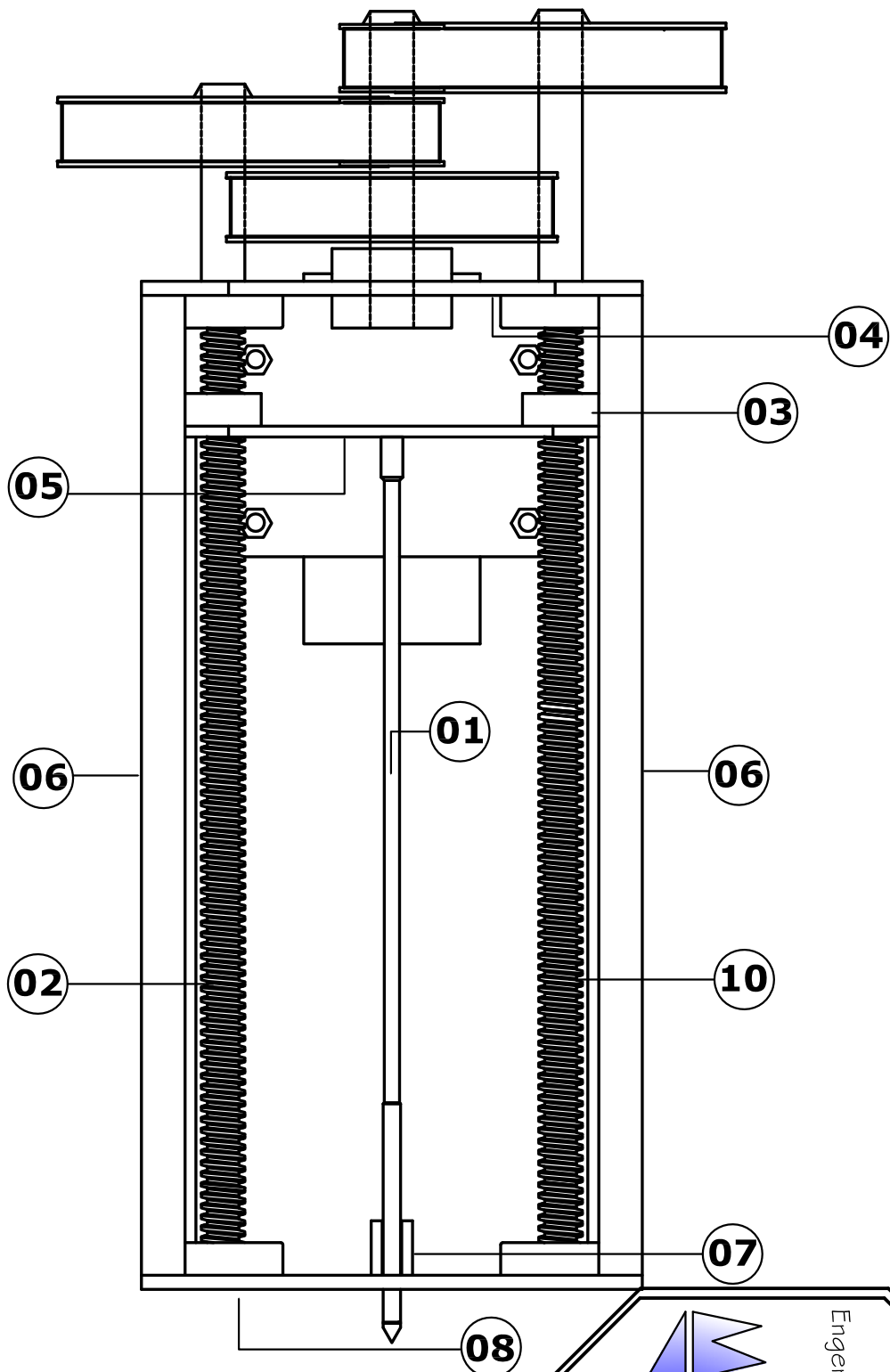
PROPRIETÁRIO:  
UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO

PROPRIETÁRIO:  
\_\_\_\_\_

Data:  
Fevereiro  
2008

Escala:  
s/ escala

Prancha:  
06



Engenheiro Civil

TÍTULO:  
Vista Frontal MCPT

LOCAL:  
Porto Alegre/RS

RESP. TÉCNICO:  
\_\_\_\_\_  
Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756

Material:  
Aço carbono e bronze

PROPRIETÁRIO:  
UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO

PROPRIETÁRIO:  
\_\_\_\_\_

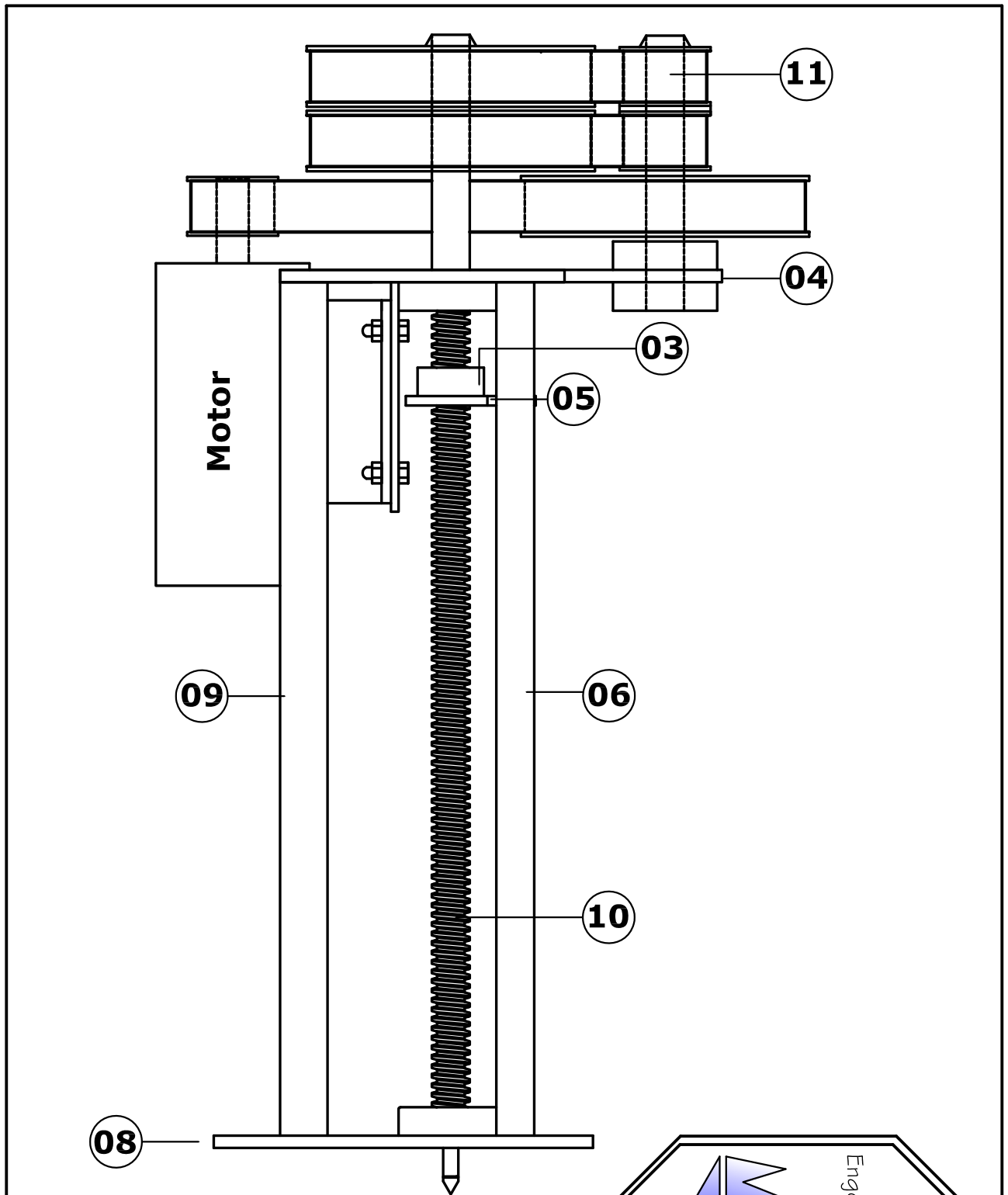
Data:  
Fevereiro  
2008


Escala:  
s/ escala

Area Total

Prancha:

07



		Engenheiro Civil
<b>TÍTULO:</b> Vista Lateral MCPT	<b>Material:</b> Aço carbono e bronze	Data: Fevereiro 2008
<b>LOCAL:</b> Porto Alegre/RS	<b>PROPRIETÁRIO:</b> UFRGS/LEGG-ENVIRONGEO	Escala: s/ escala
<b>RESP. TÉCNICO:</b> _____ Engenheiro Anderson Fonini - CREA 139.756	<b>PROPRIETÁRIO:</b> _____	Área Total Prancha: <b>08</b>



# Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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