

3

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente capítulo apresenta as características do solo utilizado, a descrição da célula eletrocinética, a metodologia para a realização dos ensaios de eletrocinese, a formulação básica utilizada para a determinação dos parâmetros eletrocinéticos e o programa experimental.

3.1

Caracterização Geotécnica do Solo Estudado

3.1.1

Perfil Geotécnico

A amostra de solo deformada foi coletada em um perfil de intemperismo de solo residual jovem, desenvolvido de rocha metamórfica gnáissica, referida ao pré-cambriano e localizado em talude de corte na Rodovia Washington Luís, em direção à Petrópolis, no município de Duque de Caxias-RJ (BR 040 - km 111), ilustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Perfil de intemperismo de solo residual jovem localizado em talude de corte na Rodovia Washington Luís, BR 040 - km 111.

A rocha apresenta feições ricas em minerais máficos (biotita) e félsicos (feldspatos) conferindo ao solo residual jovem respectiva alternância de camadas

com porosidade e permeabilidade diferenciadas. Mineralogicamente, as frações areia da amostra são constituídas por feldspatos potássio e biotita em várias fases de alteração, além do quartzo. As frações silte e argila são constituídas por caulinita, illita e gibsita. As amostras deformadas coletadas foram extraídas da feição arenosa em torno do bloco mostrado na Figura 3.2a. Pode-se notar que as feições de textura siltosa e arenosa são visualmente identificáveis no perfil pela coloração mais homogênea e mais clara, respectivamente. A Figura 3.2b mostra a coleta de amostras para análises físicas, químicas, mineralógicas e microbiológicas.



Figura 3.2 - Coleta e amostragem em perfil de intemperismo de solo residual jovem localizado em talude de corte na Rodovia Washington Luís, BR 040 - km 111, Rua Emília Garcia s/n.

3.1.2

Análises Físicas

As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da PUC-Rio.

3.1.2.1

Teor de umidade (ω)

A determinação do teor de umidade foi realizada através da coleta de porções de amostras de solo natural, secas ao ar, que são levadas à estufa por 24 horas a uma temperatura entre 105°C e 110°C, conforme estabelece a NBR 6457.

3.1.2.2

Peso Específico (γ)

Determina-se o γ_{nat} moldando-se uma amostra de solo indeformada em um amostrador com forma de anel de 76,2mm de diâmetro e 20mm de altura. Conhecendo-se o γ_{nat} e o teor de umidade temos o γ , conforme estabelecido na NBR 6508.

3.1.2.3

Densidade dos Grãos (G_s)

O ensaio de determinação da densidade dos grãos foi realizado com amostras de solo secas em estufa à 105°C – 110°C durante 24 horas e passadas em peneira #40 (0,42mm). Desse material, 100g foram transferidas para 4 picnômetros com capacidade de 250mL, sendo 25g para cada picnômetro, vertendo-se água destilada até uma altura um pouco acima do material. Depois foi aplicado vácuo ao conjunto por 15 minutos através de uma bomba de capacidade de 101,3kPa, agitando-se levemente de modo a retirar o ar aprisionado entre as partículas. O valor de G_s é obtido pela média dessas determinações, em consonância com a NBR 6457.

3.1.2.4

Granulometria

O ensaio de granulometria foi realizado segundo a norma NBR 7181. Foram destorroados e peneirados na peneira #40 (0,42mm) 1500g de solo. O material retido na peneira #40, fração maior que 0,42mm, é lavado com a finalidade de remover qualquer grão com dimensão menor que a da peneira. Esse material é seco em estufa à 105°C – 110°C por 24 horas e depois peneirado e pesado em série para #3/4”, #3/8”, #5/16”, #1/4”, #4, #8, #10, #20 e #40 com ajuda de um peneirador mecânico por cerca de 10 minutos.

Para a análise da fração menor que 0,42mm utilizou-se cerca de 50g para ensaio de sedimentação. Esse material é misturado com 125mL de uma solução defloculante de haxametáfosfato de sódio a uma concentração de 45,7g para 1000cm³ de solução, tamponado a pH entre 8,0 e 9,0. Após 24 horas verteu-se a mistura para uma proveta de 1000mL completando com água destilada e agitou-se por 1 minuto. Com auxílio de um densímetro faz-se leitura em tempos determinados repetindo-se o procedimento por duas vezes.

Após as leituras, verteu-se a mistura para uma cápsula que é levada a estufa à 105° C – 110°C por 24 horas realizando-se a seguir o peneiramento em série para # 40, # 60, #100 e #200.

Com os resultados obtidos na granulometria e sedimentação classifica-se o solo observando-se os tamanhos dos grãos especificados pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos.

3.1.2.5

Índices de Consistência

Para a determinação dos Índices de Consistência utilizaram-se amostras de solo passadas a peneira #40 sendo que cerca de 70g para a obtenção do limite de liquidez e 50g para limite de plasticidade.

Limite de Liquidez (ω_L)

Uma porção de solo, com cerca de 70g, é colocada em uma cápsula e misturada com água destilada em uma quantidade suficiente para a obtenção de uma massa pastosa homogênea. Essa mistura é depositada na concha do aparelho de Casagrande com altura de queda de 1cm procedendo à aplicação dos golpes com uma velocidade de 2 golpes por segundo, conforme estabelecido na NBR 6459. O limite de liquidez é então definido como o teor de umidade do solo com o qual uma ranhura nele feita requer 25 golpes para se fechar na concha. São realizadas várias tentativas para diferentes umidades, anotando-se o número de golpes para fechar a ranhura, o limite é obtido pela interpolação dos resultados.

Limite de Plasticidade (ω_p)

Para a determinação do ω_p utilizou-se um vidro rugoso e um cilindro metálico de 3 mm de diâmetro (gabarito). Com uma mistura densa homogênea (solo+água destilada) rolando sobre o vidro foram feitos cilindros de dimensões similares aos do gabarito e determinou-se o teor de umidade. Foram realizadas três repetições do ensaio sendo a média o valor de ω_p , de acordo com a norma NBR 7180.

Os resultados obtidos na caracterização física descrita do solo são apresentados na Tabela 3.1 e ilustrados na Figura 3.3.

Na Figura 3.3, a curva representa a amostra do solo classificado pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos como sendo areno-siltoso (*SM*), sendo que 63% da amostra é constituída pela fração areia e 25% da amostra é constituída pela fração silte.

Tabela 3.1 - Características físicas do solo estudado

<i>Índices Físicos</i>	<i>Valor</i>
<i>Teor de Umidade, ω (%)</i>	<i>11,52</i>
<i>Matéria Orgânica (%)</i>	<i>0,05</i>
<i>Massa Específica dos Grãos, G_s</i>	<i>2,63</i>
<i>Peso Específico Natural, γ_{nat} (kN/m³)</i>	<i>15,21</i>
<i>Peso Específico Seco, γ_d (kN/m³)</i>	<i>14,23</i>
<i>Resumo da Granulometria (%)</i>	
<i>Pedregulho Grosso</i>	<i>0</i>
<i>Pedregulho Médio</i>	<i>0</i>
<i>Pedregulho Fino</i>	<i>7</i>
<i>Areia Grossa</i>	<i>39</i>
<i>Areia Média</i>	<i>14</i>
<i>Areia Fina</i>	<i>10</i>
<i>Silte</i>	<i>25</i>
<i>Argila</i>	<i>5</i>
<i>Índices de Consistência (%)</i>	
<i>Limite de Liquidez, ω_L</i>	<i>43,70</i>
<i>Limite de Plasticidade, ω_p</i>	<i>30,40</i>
<i>Índice de plasticidade</i>	<i>13,30</i>
<i>Classificação pelo Sistema Unificado</i>	<i>SM</i>

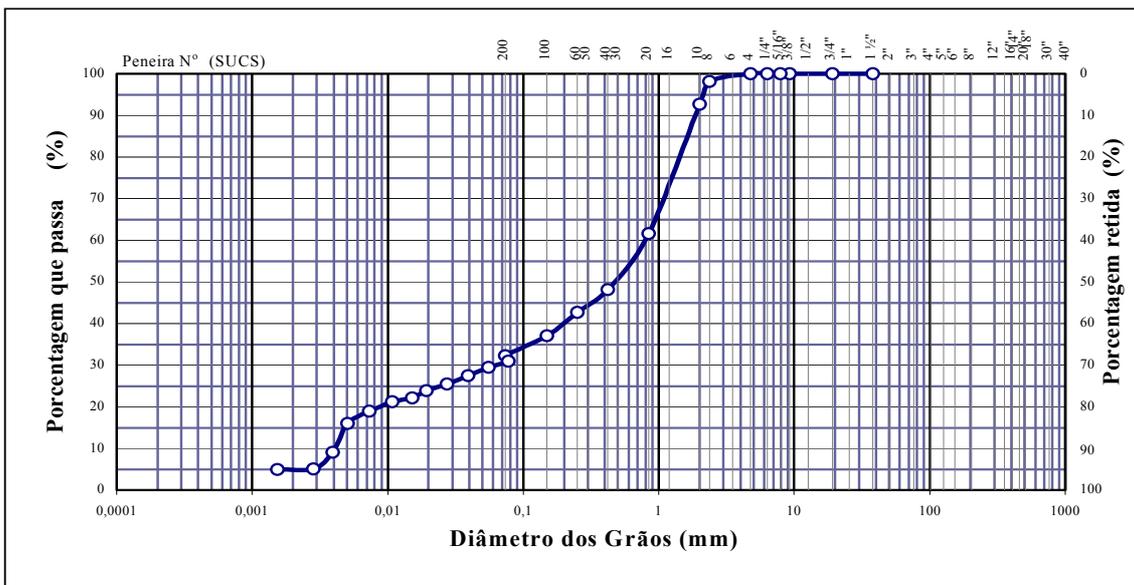


Figura 3.3 - Curva granulométrica do solo estudado.

3.1.2.6

Condutividade Hidráulica

As análises de condutividade hidráulica foram realizadas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. A amostra deformada de solo foi adicionada um volume de água no intuito de obtenção de um teor de umidade correspondente a 1,25 do seu limite de liquidez (ω_L) e moldada a fim de obter um corpo de prova de 10cm de diâmetro e 5cm de altura. O corpo de prova foi levado a uma prensa edométrica sendo submetido a uma tensão de 50kPa. Já com a tensão inicial desejada levou-se o c.p. a um permeâmetro de parede flexível submetendo-o primeiro a uma fase de saturação e adensamento da amostra, e depois ao estágio de percolação. O gradiente hidráulico utilizado foi de 10kPa. A Figura 3.4 mostra os resultados obtidos através do método de carga variável para as tensões efetivas de 50, 100, 200, 300kPa. Os resultados revelaram uma redução dos valores da condutividade hidráulica, k_h , com o acréscimo de tensão efetiva. Os valores determinados de k_h variaram entre 0,60 a $2,51 \times 10^{-08}$ m/s.

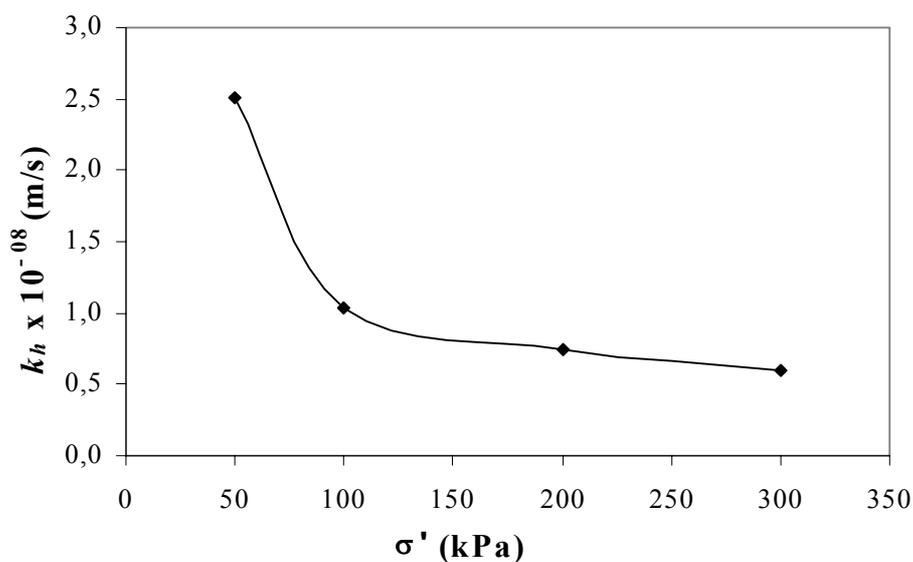


Figura 3.4 - Coeficiente de condutividade hidráulica k_h obtido através de permeâmetro de parede flexível.

3.1.3

Análises Físico - Químicas

As análises físico-químicas, incluindo a condutividade elétrica, pH, sais solúveis, elementos disponíveis, carbono orgânico, nitrogênio total, complexo sortivo e capacidade de troca catiônica (CTC) foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos, Água e Plantas (LAPS) da EMBRAPA, estabelecendo os procedimentos especificados em EMBRAPA (1997). As determinações do teor de matéria orgânica (M.O.), capacidade de troca catiônica (CTC) pela técnica do azul de metileno e superfície específica foram feitas no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. As análises dos ânions trocáveis foram feitas no Laboratório de Química no Departamento de Química da PUC-Rio.

3.1.3.1

Teor de Matéria Orgânica (M.O.)

O teor de matéria orgânica foi determinado através da coleta de porções de amostras de solo seco em estufa por 24 horas a uma temperatura de 105°C e

depois levadas a um forno de alta temperatura (mufla) por 6 horas à 400°C. As determinações obedeceram às recomendações do método por via úmida de gravimetria por incineração em mufla de Ball (1964) adaptado por Jackson (1982) & Ben-Dor & Banin (1984).

3.1.3.2

Capacidade de Troca Catiônica (CTC) pela técnica do Azul de Metileno e Superfície Específica

Misturou-se 1g de solo passado na peneira #40 com 50mL de solução tampão (pH = 7,0) deixando vibrar por aproximadamente 15 minutos. Colocaram-se porções da solução de azul de metileno nessa mistura e posteriormente transferidas pequenas alíquotas para um papel filtro Whatman nº 40 para a determinação dos íons trocáveis. A superfície específica foi determinada através do valor obtido de CTC pelas equações (3.1) e (3.2).

$$CTC = C \times V \times \frac{100}{W_a} \quad (3.1)$$

$$SE = \text{fator do azul de metileno} \times CTC \quad (3.2)$$

onde,

CTC - Capacidade de Troca de Cátions (meq/100g de solo)

C - Concentração do azul de metileno (1meq/L)

V - volume gasto(L)

W_a - peso seco da amostra seca (g)

Fator do azul de metileno - 7,8043

SE - Superfície Específica (m²/g)

3.1.3.3

Ânions Trocáveis

A determinação dos ânions trocáveis foi feita através de um cromatógrafo de íons Metrohm, modelo 732IC. Uma amostra com volume de 100µL foi passada em uma coluna ASupp-4 Metrohm de Divinilbenzeno, pH = 9,2 e depois levada ao cromatógrafo.

3.1.3.4

Determinação da concentração de nitrato

A concentração de nitrato de amônio foi determinada através do método modificado de Griess - Ilosvay (Barnes & Folkard, 1951; Bremner, 1965). As determinações foram feitas nas soluções dos eletrólitos e no solo.

Foram adicionados 4g de solo a 25mL de água destilada (com pH ajustado para 7,0 com hidróxido de sódio) em erlenmeyer de 50mL. A extração foi realizada em agitador mecânico (Nova Ética, Modelo 501/D) a 160 rpm (rotações por minuto) em banho Maria a 45°C por 1 hora. A solução era então filtrada em papel filtro Whatman nº 40 (80g, 0,40 μ m) em balão volumétrico de 50mL, cujo volume era aferido com a mesma água destilada.

As amostras coletadas dos eletrólitos e a solução extraída do solo foram então passadas em uma coluna ativada de cádmio, como pode ser vista na Figura 3.5, para redução de nitrato a nitrito. A concentração foi determinada colorimetricamente através de um espectrofotômetro, em um comprimento de onda de 543nm.



Figura 3.5 - Coluna de cádmio.

A Tabela 3.2 apresenta as características químicas do solo estudado.

Tabela 3.2 - Características químicas do solo estudado		
<i>Índices Químicos</i>		<i>Valor</i>
<i>Condutividade Elétrica (MS/cm à 25^oC)</i>	82% de água	0,06
<i>pH</i>	<i>H₂O</i>	4,9
	<i>KCl</i>	4,1
<i>Sais Solúveis (cmol_c/kg)</i>	<i>K⁺</i>	<0,01
	<i>Na⁺</i>	0,01
<i>Elementos Disponíveis (mg/dm³)</i>	<i>Mn</i>	0,470
	<i>Fe</i>	5,21
	<i>Cu</i>	0,287
	<i>Zn</i>	0,562
<i>Elementos Disponíveis (g/kg)</i>	<i>C</i>	0,5
	<i>N</i>	0,1
<i>Complexo Sortivo (cmol_c/kg)</i>	<i>Mg⁺⁺</i>	0,1
	<i>K⁺</i>	0,02
	<i>Na⁺</i>	0,04
	<i>Al⁺⁺⁺</i>	0,9
	<i>H⁺</i>	0,7
<i>Fósforo no Extrato Sulfúrico (g/kg)</i>	<i>P₂O₅</i>	0,4
<i>Capacidade de troca catiônica, CTC (cmol_c/kg)</i>		1,8
<i>Capacidade de troca Catiônica, CTC, pela técnica do Azul de Metileno (meq/100g de solo seco)</i>		1,8
<i>Superfície Específica (m²/g)</i>		14,05
<i>Ânions Trocáveis (mg/Kg)</i>	<i>Cloreto</i>	18075
	<i>Sulfato</i>	4800

3.1.4

Análises Mineralógicas

A identificação dos argilominerais foi determinada pelo emprego da difração de Raios X realizado no Laboratório de Difractometria do Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio. Essas análises foram feitas em difratômetro da marca Siemens, modelo D5000, anodo cobre 1.5406Å, 40KV, 30mA, a partir do valor medido para distância interplanar basal do argilomineral. Foram utilizados dois métodos experimentais para identificação dos componentes do solo. O primeiro método por peneiramento (método do pó) consistiu em amostra de solo seco ao ar passado na peneira #400, a seguir misturado, saturado e homogeneizado com água destilada. Dessa mistura foi preparada uma lâmina a qual foi levada ao difratômetro. O segundo método

caracterizou-se pela obtenção de fração de solo, mais fino, pelo ensaio de sedimentação convencional. Fizeram-se então duas lâminas, uma para ser glicolada e outra para ser aquecida a 300°C - 350°C por 4 horas, depois levadas ao difratômetro.

A partir dos difratogramas obtidos foi identificada a presença de caulinita e gibsita, conforme ilustra a Figura 3.6.

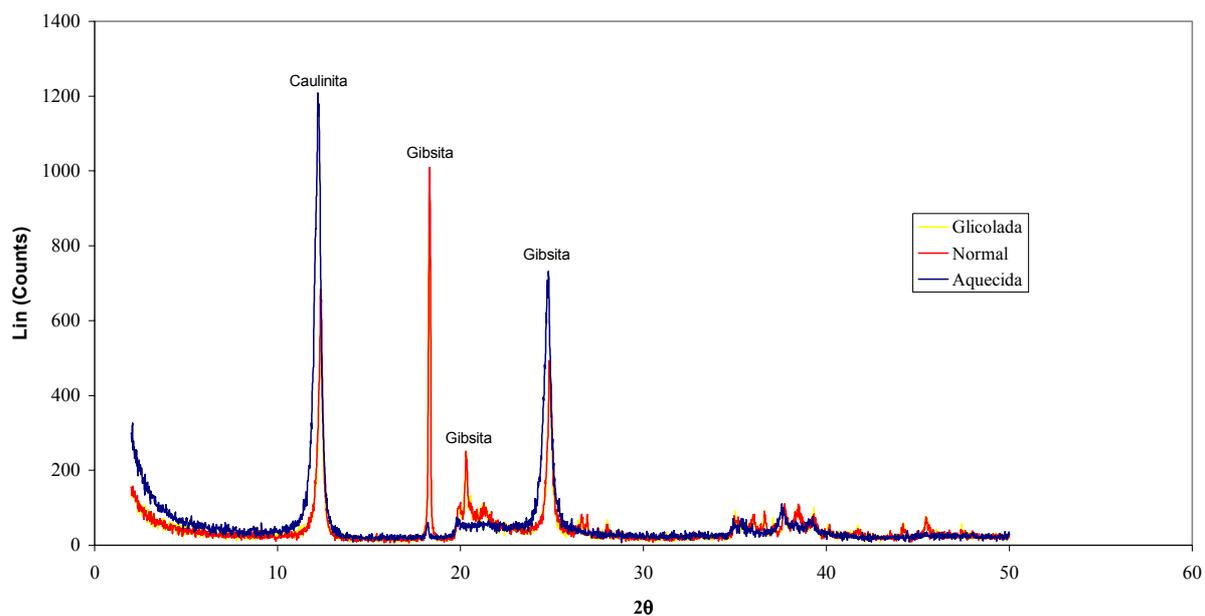


Figura 3.6 - Difratograma de raios X, método do pó (normal) e sedimentadas (glicolada e aquecida).

3.1.5

Análises Microbiológicas

O número de microrganismos viáveis e cultiváveis no solo foi determinado pelo método das diluições sucessivas e contagem em placa.

Os microrganismos foram retirados do solo a partir de amostras de 1g por agitação com água destilada estéril durante um minuto em um agitador mecânico de tubos (PHOENIX, Modelo AP56). Foram realizadas, em seguida, diluições sucessivas em tubos de ensaio (16,0 x 1,5cm) com 9mL de água destilada estéril (10^{-1} a 10^{-5}) e, para cada diluição, plaqueadas três alíquotas de 0,1mL em 20mL de meio de cultura TSA (*Tryptcase Soil Agar*) pelo método de derramamento em

placa (*pour plate*) em placas de petri (15 x 1cm). A Figura 3.7 ilustra as diluições de 10^{-1} a 10^{-5} de 1g da amostra de solo em água destilada estéril em tubos de ensaio.

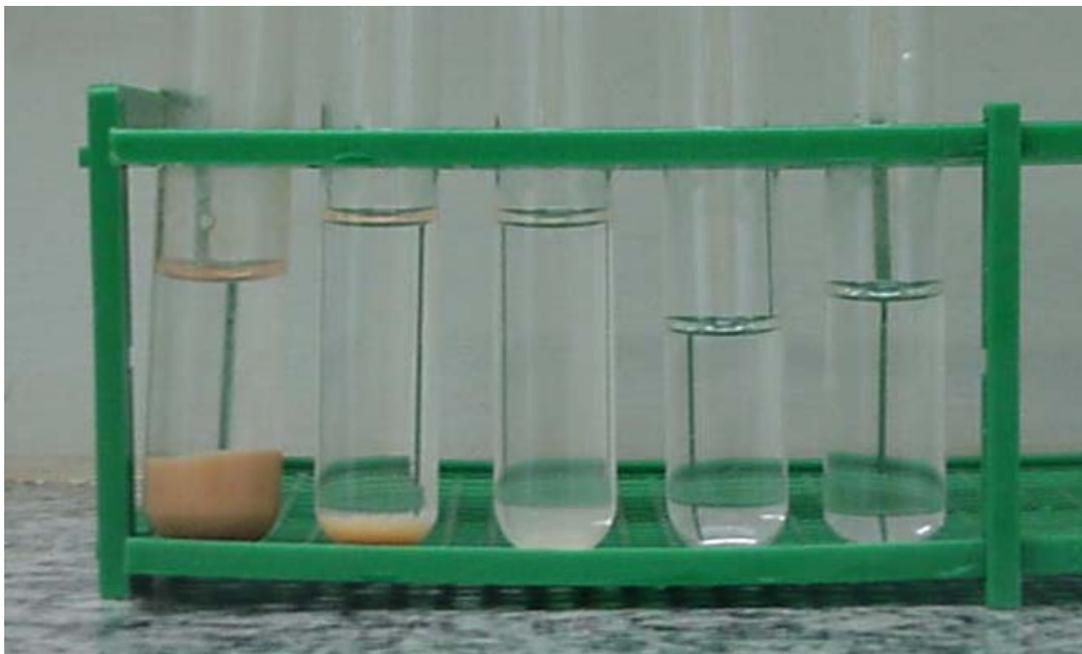


Figura 3.7 – Diluições de 10^{-1} a 10^{-5} de 1g da amostra de solo em água destilada estéril em tubos de ensaio

A Figura 3.8 representa um diagrama esquemático das etapas do método de derramamento em placa.

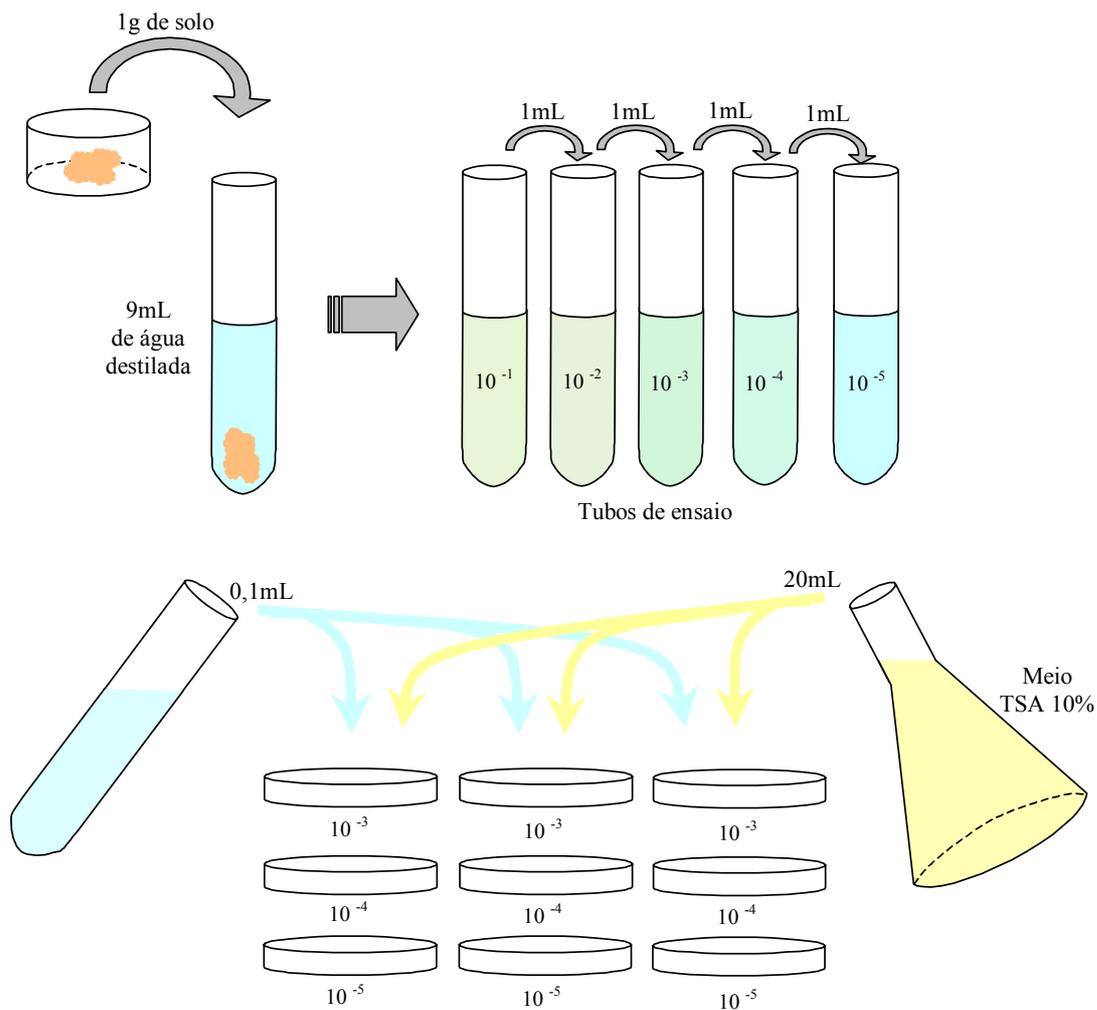


Figura 3.8 - Diagrama esquemático do método de derramamento em placa.

O número de unidades formadoras de colônias (U.F.C./g solo) foi determinado por contagem de colônias em uma lupa, marca PHOENIX, modelo CP602, em observações a olho nú, após sete dias de incubação em estufa a 32°C. Observações em microscópio estereoscópio foram feitas para avaliar uma possível indicação de mudança no perfil populacional.

Das amostras de solo que foram coletadas em campo nas condições iniciais realizaram-se análises microbiológicas onde a população cultivável é de aproximadamente 10^6 /mL em média.

Essas determinações foram feitas por Rocha (2002) no Laboratório de Microbiologia do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

3.2

Descrição da Célula Eletrocinética

A célula eletrocinética foi desenvolvida no laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC e teve a sua eficácia atestada por Rivas (2002). A célula foi elaborada com material que permitisse a visibilidade dos processos eletrocinéticos e foi adaptada com o intuito de obter o maior número de parâmetros durante os ensaios.

O material acrílico da célula garante o isolamento e a resistência às reações eletroquímicas decorrentes do ensaio. A Figura 3.9 apresenta um diagrama esquemático da célula utilizada no programa experimental.

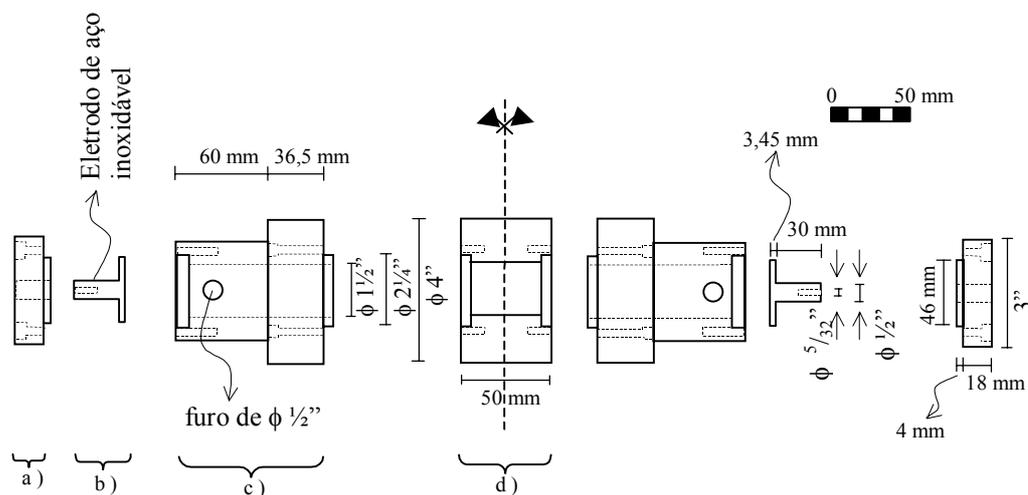


Figura 3.9 – Detalhes da célula de eletrocinese. a) fixador do eletrodo; b) eletrodo; c) reservatório (eletrólitos); d) reservatório para amostra de solo de 50mm de comprimento.

A parte central da célula (Figura 3.9-d) acomoda o corpo de prova e possui 50mm de comprimento. A ela estão acoplados os reservatórios dos eletrólitos (Figura 3.9-c) onde estão adaptados os eletrodos de aço inox 316 (Figura 3.9-b) que distam a 88,5mm da amostra de solo, garantindo assim, uma homogeneidade na aplicação do potencial elétrico. A Figura 3.10 ilustra a célula de eletrocinese montada para um experimento.

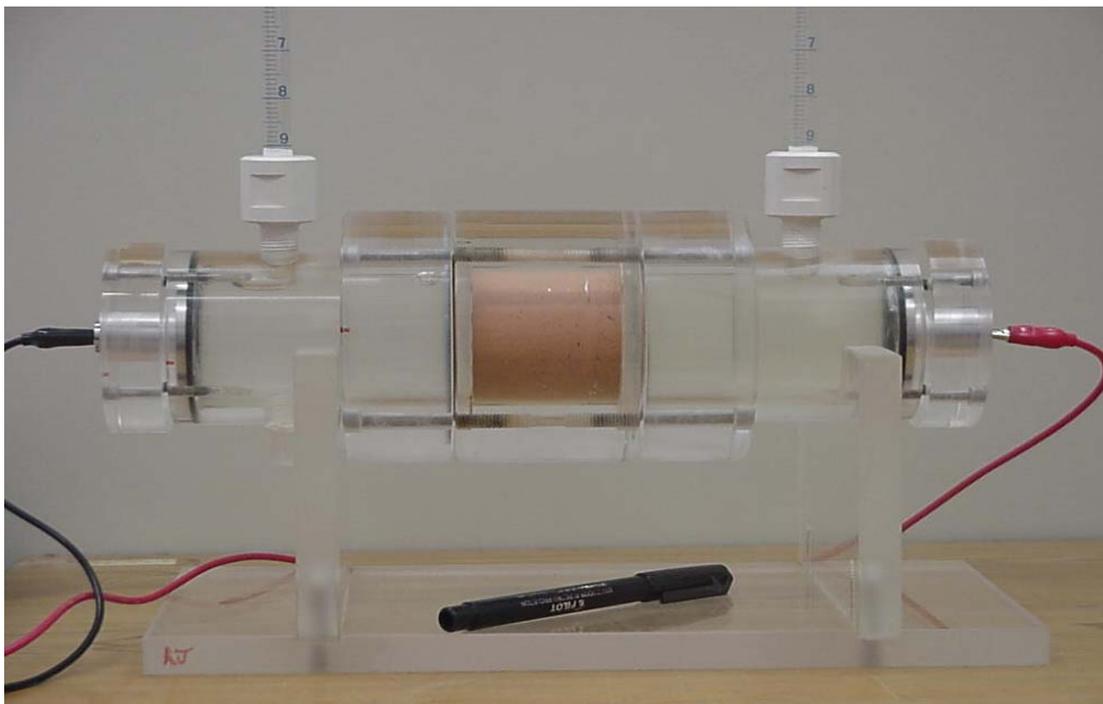


Figura 3.10 - Célula de eletrocinese.

A aplicação da diferença de potencial (d.d.p) entre os eletrodos, vistos na Figura 3.11, é realizada através de uma fonte DC. Durante o ensaio são feitas leituras de corrente elétrica, volume percolado e pH nos eletrólitos.



Figura 3.11 - Eletrodo de aço inox 316. a) eletrodo; b) detalhe do fixador de eletrodo engatado no reservatório e o eletrodo.

Na Figura 3.12 pode ser observado o conjunto: célula de eletrocinese, fonte Minipa (modelo – MPC 303D) e multímetro digital ilustrando o ensaio em andamento.

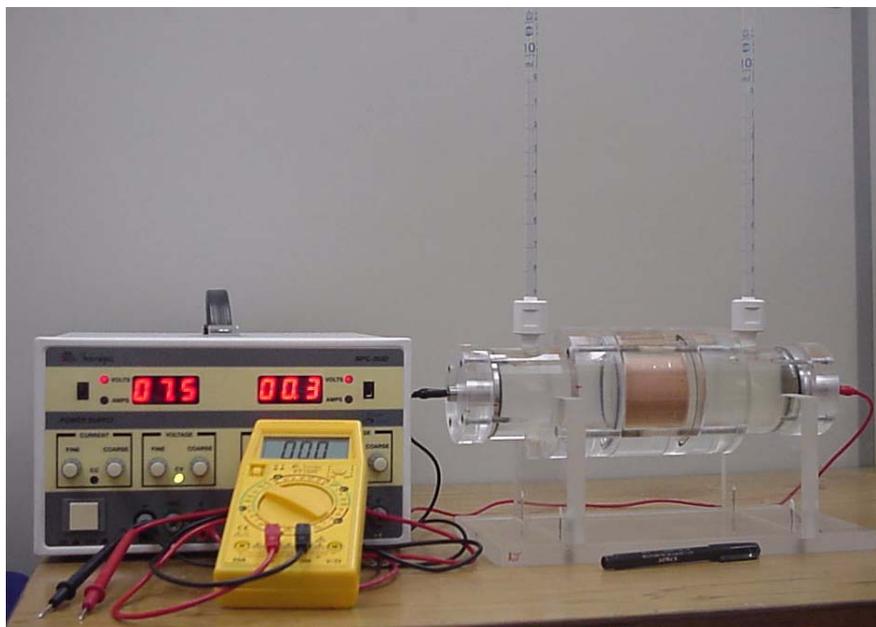


Figura 3.12 - Experimento montado: célula de eletrocinese, fonte Minipa e multímetro digital.

A corrente elétrica e potencial elétrico são medidos através de um multímetro digital (Minipa, modelo – ET 1502) e o fluxo eletro-osmótico (volume percolado) através de pipetas graduadas de 10mL de capacidade e 0,1 mL de resolução. As pipetas são acopladas à célula por intermédio de luvas de PVC inseridas na parte superior dos reservatórios dos eletrólitos de 110mL de capacidade, conforme ilustrado na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Detalhe do encaixe da pipeta graduada na luva de PVC encaixada no reservatório da célula de eletrocinese.

O pH é medido através de papéis colorimétricos. As tiras são introduzidas nas luvas de PVC durante o ensaio. Não se utilizou o potenciômetro para evitar a contaminação microbiológica dos eletrólitos, visto que, para a determinação do pH com este instrumento seria necessário retirar do reservatório uma alíquota de água para sua medição. Dessa forma, evita-se, também, interferir nas reações químicas ocorrentes nos eletrólitos, que são responsáveis pelo fluxo eletro-osmótico e a migração de íons. No entanto, antes e depois do ensaio as medidas de pH foram feitas por um potenciômetro Orion, modelo - (290A), Figura 3.14.



Figura 3.14 - Potenciômetro digital Orion, modelo – 290A.

3.3

Metodologia do Ensaio

A amostra de solo é reconstituída em laboratório procurando simular, na medida do possível, as condições *in situ*. Para isto, ela é seca ao ar, destorroada e passada na peneira #40. É misturada mecanicamente com água destilada (com pH ajustado a 7,0 com hidróxido de sódio) em uma cápsula até atingir um teor de umidade equivalente a 1,25 do seu limite de liquidez (ω_L). O pH da água destilada foi ajustado para 7,0 devido a ambientes inicialmente neutros apresentarem efeitos da eletrólise em menor escala e uma redução gradual no fluxo eletro-osmótico (Rivas 2002), assim como mais propício ao crescimento de microorganismos

(Alshawabkeh *et al.*, 2000). Após atingir uma umidade equivalente à $1,25\omega_L$, a amostra é colocada na parte central da célula sob uma base de acrílico com auxílio de uma espátula, em camadas, e agitada em um vibrador mecânico procurando evitar a formação de bolhas de ar no interior do solo. A Figura 3.15 mostra em detalhe a base de acrílico utilizada nesta etapa do ensaio.

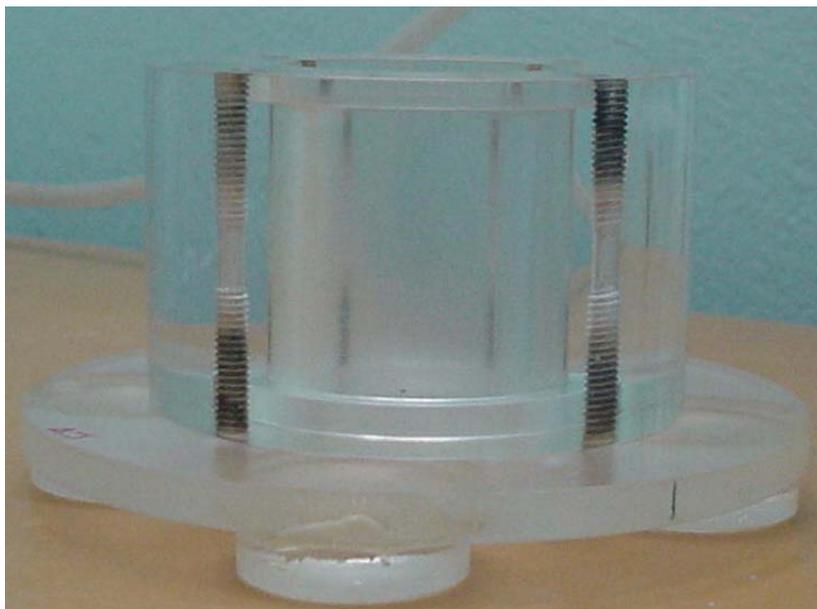


Figura 3.15 - Detalhe da base de acrílico usada como suporte da parte central da célula de eletrocinese no ensaio.

Em seguida, a amostra é compactada em quatro estágios de 24 horas cada um. Em cada estágio era adicionado um nível de tensão de 60kPa para proporcionar um rearranjo dos grãos, evitando assim, a presença de caminhos preferenciais de fluxo.

A Figura 3.16 ilustra a compactação da amostra através de um sistema de peso morto. O sistema consiste de um pistão de PVC posicionado em uma guia acoplada na parte central da célula onde as anilhas são posicionadas.



Figura 3.16 - Compactação da amostra.

Após a compactação, a parte central da célula é montada com seus respectivos reservatórios, sendo que, a separação solo x eletrólito se dá por meio de um papel filtro Whatman nº 40 para evitar o carreamento de partículas pelo fluxo eletro-osmótico.

Devido à realização de análises microbiológicas, tornaram-se necessários alguns cuidados especiais para garantir a esterilidade do sistema, e, portanto a confiabilidade nos resultados. Assim, adotou-se o seguinte procedimento:

- a célula era deixada em banho por 24 horas com detergente laboratorial, tipo DETERTEC ou similar, e depois lavada com água a 60°C;
- todos os instrumentos (peneira #40mm, cápsulas, espátulas, pipetas, erlenmeyers e seringas) utilizados no ensaio foram também deixados em banho por 24 horas e depois levados à autoclave por aproximadamente 20 minutos a 120°C;
- o papel filtro Whatman nº 40 ($\phi = 0,40\mu\text{m}$) utilizado para a separação solo x eletrólito também foi levado ao autoclave por 20 minutos a 120°C;
- a água destilada com pH ajustado a 7,0 com hidróxido de sódio foi esterilizada na autoclave por 20 minutos a 120°C;
- a solução de nitrato era filtrada antes de ser colocada no reservatório (eletrólito) sendo que, o filtro e a membrana filtrante (Schleicher & Schuell, 0,45 μm) utilizada foram devidamente esterilizadas na autoclave por 30 minutos a 120°C.

Com o conjunto montado, os reservatórios são preenchidos com a solução desejada e por meio de cabos, ligados aos eletrodos e conectados em uma fonte. Em seguida, aplicava-se uma diferença de potencial, d.d.p. de 7,5V. O gradiente de potencial elétrico de 7,5V foi estipulado com base nos experimentos de Rivas (2002), que constatou uma maior eficiência do processo para este potencial.

As leituras obtidas durante o monitoramento dos ensaios serve como base para a determinação do fluxo eletro-osmótico que é descrito a partir da equação (3.3):

$$Q = k_e \times i_e \times A \quad (3.3)$$

onde,

Q – volume de fluxo hidráulico (cm³/s)

k_e - coeficiente de condutividade eletro-osmótica (cm²/s.V)

i_e – gradiente elétrico aplicado (V/cm)

A – área transversal da amostra de solo (cm²)

Sendo i_e definido como:

$$i_e = \frac{V}{L}$$

V – potencial elétrico aplicado (volts)

L - comprimento da amostra de solo (cm)

Substituindo o gradiente elétrico na equação (3.3) tem-se o coeficiente de condutividade eletro-osmótica (k_e) que mostra o desenvolvimento do fluxo eletro-osmótico durante a aplicação de dada tensão conforme a equação (3.4):

$$k_e = \frac{Q \times L}{V \times A} \quad (3.4)$$

A eficiência do ensaio eletrocinético é inversamente proporcional à magnitude da constante de eficiência eletro-osmótica (k_i) obtida pela relação entre a corrente elétrica e o fluxo eletro-osmótico gerado em um mesmo intervalo de tempo, ou seja:

$$k_i = \frac{I}{Q} \quad (3.5)$$

Onde,

I - corrente elétrica (μA)

k_i = constante de eficiência eletro-osmótica ($\mu\text{A}/\text{cm}^3/\text{s}$)

3.4

Ensaio Realizados

Um programa de ensaios foi elaborado para avaliar experimentalmente a eficácia da técnica eletrocinética, a influência da aplicação do gradiente de potencial elétrico sobre a sobrevivência de microrganismos nativos do solo e a taxa de transporte de nutrientes em amostra de solo residual via eletrocinese.

O programa experimental consistiu em 4 baterias de ensaios que por etapas pudessem validar o proposto trabalho:

Bateria 1: Avaliação do efeito da compactação do solo na prensa edométrica sobre a sobrevivência dos microrganismos.

Bateria 2: Avaliação da eficiência do processo eletrocinético.

Bateria 3: Influência da eletrocinese sobre a sobrevivência dos microrganismos.

Bateria 4: Avaliação do transporte de nutrientes via eletrocinese e da influência do transporte de nitrato sobre a sobrevivência/crescimento de microrganismos.

Essas baterias serão descritas no capítulo 4.

Os parâmetros determinados antes, durante e após o término dos ensaios eletrocinéticos foram:

(a) Antes da aplicação da corrente elétrica

- pH da água destilada
- pH da solução de nitrato de amônio
- pH do solo

- teor de umidade do solo (%)
- concentração de nitrato de amônio no solo (ppm)
- concentração de nitrato de amônio na água destilada e na solução de nitrato de amônio em ppm
- quantidade de U.F.C./g de solo (unidades formadoras de colônias de bactérias e fungos heterotróficos)

(b) Durante o ensaio de eletrocinese

- pH da solução dos eletrólitos (catodo e anodo)
- volume de líquido percolado (mL)
- corrente elétrica (μA)
- potencial elétrico (V)
- tempo (horas)

(c) Imediatamente após o término do ensaio de eletrocinese

Na solução dos eletrólitos :

- pH
- concentração de nitrato de amônio (ppm)
- quantidade de U.F.C./mL da solução afluyente e efluente

No solo:

- Ao término de cada ensaio eletrocinético, o corpo de prova, depois de retirado da célula, foi dividido em três partes iguais transversalmente. Cada porção foi homogeneizada assepticamente e novamente dividida em duas alíquotas; uma sendo imediatamente processada para análise e a outra incubada a temperatura ambiente em recipiente estéril por uma semana. Este último teve como objetivo avaliar se houve recuperação/estímulo do crescimento microbiano após a aplicação da corrente elétrica, sendo determinada a quantidade de U.F.C./g de solo e teor de umidade (%). Para a primeira alíquota foram determinados pH, teor de umidade (%), concentração de nitrato de amônio (ppm) e quantidade de U.F.C./g de solo.

A análise microbiológica nas soluções dos eletrólitos tornou-se necessária para avaliar a esterilidade do experimento, visto que, devido ao manuseio, poderia ocorrer contaminação microbiológica pelo meio externo.