

# Efeitos do Tratamento Químico Eletrocinético em um Solo Residual Maduro

Camila Loeffler Carapajó

Mestre, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, [camila.carapajo@gmail.com](mailto:camila.carapajo@gmail.com)

José Tavares Araruna Júnior

Professor Adjunto, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, [araruna@puc-rio.br](mailto:araruna@puc-rio.br)

Cid Almeida Dieguez

Aluno de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, [cidieiguez@poli.ufrj.br](mailto:cidieiguez@poli.ufrj.br)

**RESUMO:** O tratamento químico eletrocinético com o uso de soluções salinas é uma técnica inovadora no melhoramento de solos. Estudos recentes condicionam as interações eletroquímicas que ocorrem na massa de solo com as diferentes mineralogias e a solução química injetada. O presente artigo busca avaliar o ganho de resistência associado ao tratamento químico eletrocinético em um solo maduro argilo-arenoso. Para tal, são apresentados dois ensaios eletrocinéticos com adição de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), cotejando as variações da resistência não drenada obtida através de ensaios *Fall Cone*, o teor de umidade e o pH do solo, antes e ao término dos ensaios. Os resultados mostram que o tratamento químico eletrocinético com a injeção da solução  $\text{CaCl}_2$  proporcionou um ganho na resistência não drenada entre 1,5 a 3 vezes o seu valor inicial em um período de 3 dias.

**PALAVRAS-CHAVE:** tratamento químico eletrocinético, solução salina, resistência não drenada, ensaios de *fall cone*.

**ABSTRACT:** The electrokinetic chemical treatment using saline solutions is an innovative ground improvement technique. Recent studies correlate the electrochemical interactions, that occur in the soil mass, with the different injected chemical solutions and the mineralogy of the soil. This article aims to evaluate the effects of soil improvement using electrokinetic chemical treatment with calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) in a mature clayey-sandy soil. It was performed two electrokinetic chemical tests with injection of calcium chloride in order to obtain changes in measured values of undrained shear strength using *Fall Cone* test, soil water content and soil pH, before and after the tests. The results showed that the electrokinetic chemical treatment with injection of calcium chloride increased the undrained shear strength of reconstituted residual soil samples between 1,5 and 3 times its initial value after 3 days.

**KEYWORDS:** electrokinetic chemical treatment, saline solution, undrained shear strength, fall cone test.

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento químico eletrocinético vem se consolidando como uma técnica promissora para o melhoramento de solos, estabilização de encostas, remoção de contaminantes do solo e desidratação de rejeitos e sedimentos (Bjerrum et al., 1967; Lefebvre & Burnotte, 2002; Asavadorndeja & Glawe, 2005; Cameselle & Reddy, 2012; Iannelli et al., 2015). A técnica consiste em injetar soluções salinas durante o processo da eletrocinese, que é a aplicação de uma diferença de potencial entre um par de eletrodos em contato com o solo. A passagem da corrente elétrica juntamente com a injeção de soluções promove a ocorrência de diversas reações químicas (oxidação, redução, difusão, troca iônica, precipitação de sais e minerais), alteração no pH e a formação de agentes cimentantes – que causam alterações na estrutura do solo, aumentando sua resistência.

Diversas pesquisas foram conduzidas utilizando diferentes soluções químicas e mineralogias do solo, buscando diferentes resultados, a exemplo de Chien et al. (2011) que usaram cloreto de cálcio e silicato de sódio para analisar a eficiência dessa combinação no aumento da resistência do solo; Ou et al. (2014) que realizaram ensaios eletrocinéticos com injeção de cloreto de cálcio e encontraram a formação de agentes

cimentantes distribuídos de maneira não uniforme na amostra; Lin et al. (2017) que buscaram desenvolver um método para expandir a região de melhoria do tratamento, realizando ensaios com variadas soluções e durações; Ou et al. (2018) que utilizaram cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), hidróxido de potássio (KOH) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) para aumentar a resistência não drenada em toda a amostra; Shen et al. (2020) que realizaram experimentos utilizando  $\text{CaCl}_2$ , cloreto de magnésio ( $\text{MgCl}_2$ ), cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl) para analisar os efeitos na modificação da estrutura do solo. Contudo, pode-se afirmar que os efeitos causados pela injeção da solução química são condicionados ao tipo de solo e solução utilizados (Ou et al., 2009b). Entretanto, para solos residuais tropicais (tipicamente os solos brasileiros), ainda é necessária uma maior compreensão do seu comportamento quando submetidos ao tratamento químico eletrocinético.

Desta forma, este artigo tem por objetivo avaliar o efeito de ganho de resistência no solo após o tratamento químico eletrocinético com injeção de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), utilizando como amostra um solo maduro argilo-arenoso reconstituído, avaliando-se no início e ao final dos ensaios os parâmetros de pH, a resistência não drenada, medida pelo aparelho de *Fall Cone*, e o teor de umidade do solo.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 2.1 Solo Utilizado

O solo utilizado nessa pesquisa foi coletado da camada superficial da encosta localizada no Campo Experimental II da PUC-RIO (Figura 1). É um solo coluvionar maduro argilo-arenoso, com a tonalidade vermelha amarelada, composto basicamente por quartzo, granada alterada, argilominerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro e alumínio (Soares, 2005). A caracterização geotécnica foi feita no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-RIO (Tabela 1), seguindo todas as normas pertinentes, prescritas na ABNT.



Figura 1. Coleta do solo utilizado nos ensaios.

Tabela 1. Caracterização Geotécnica

Densidade real dos grãos ( $G_s$ )	2,681	NBR 6508/1984
Teor de matéria orgânica (MO)	4 %	NBR 13600/2022
Teor de umidade do solo (w)	2 %	NBR 6457/2024
Limite de Liquidez (LL)	54 %	NBR 6459/2017
Limite de Plasticidade (LP)	23 %	NBR 7180/2016
pH do solo	5,1	Manual de Métodos e Análise de Solo da Embrapa (2017)

### 2.2 Equipamentos e Célula Eletrocinética Utilizados

A célula eletrocinética utilizada (Figura 2) foi confeccionada em acrílico e possui formato de um cilindro vazado. É composta por 3 compartimentos, onde a parte central deve ser preenchida com solo e os reservatórios laterais preenchidos com água ou com as soluções eletrolíticas (anólito e católito).

Nas extremidades foram colocados eletrodos (anodo e catodo) com o formato de um disco, confeccionados em aço inoxidável.

Uma diferença de potencial elétrico, igual a 5 V, foi estabelecida entre os eletrodos durante todo o ensaio eletrocinético utilizando-se uma fonte dupla ajustável e um sistema datalogger (DAQ) com dois canais de aquisição de corrente contínua (Figura 3a). O sistema possui uma tensão máxima ajustável de até 30 V, sendo que a corrente máxima suportada pelo sistema era igual a 100 mA. O conjunto montado possibilitou a realização de até dois ensaios eletrocinéticos concomitantes, como mostra a Figura 3b.

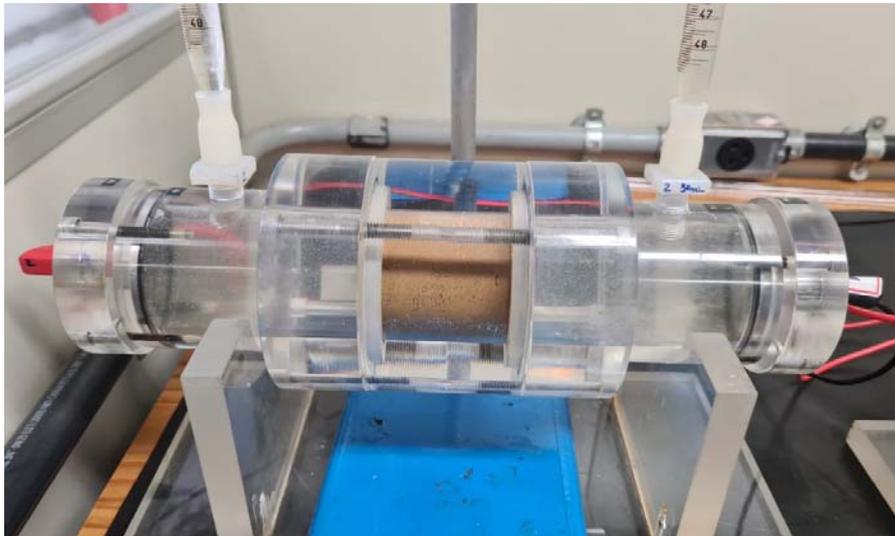


Figura 3. Vista frontal da Célula Eletrocinética.

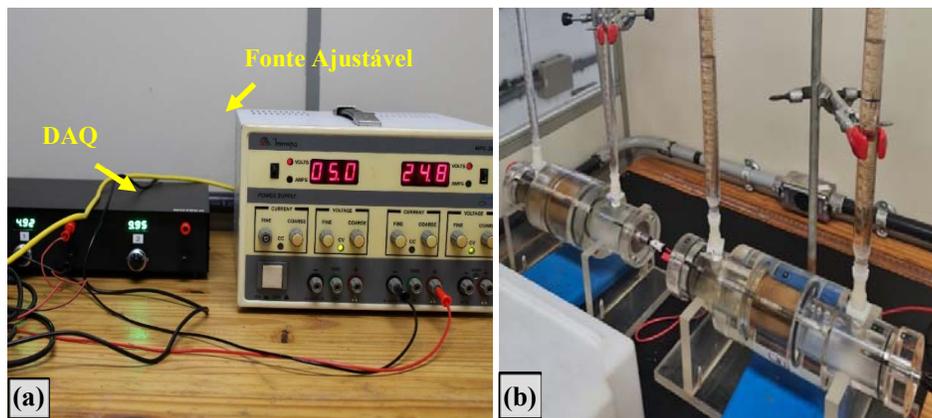


Figura 2. a) DAQ e fonte dupla de alimentação; b) Realização simultânea de dois ensaios eletrocinéticos.

### 2.3 Procedimentos para Fabricação da Amostra Reconstituída

O solo coletado foi seco ao ar, destorroado e passado na peneira #40 ( $<0,42\text{mm}$ ), de forma a retirar raízes e detritos. Para fabricação dos corpos de prova, adotou-se uma massa cerca de 150 gramas do solo seco ao ar e o teor de umidade de 1,25 vezes o limite de liquidez. O solo era misturado com água e deixado em repouso por três horas. Com o auxílio de um funil (Figura 4a), a mistura era inserida na parte central da célula eletrocinética, onde foram adaptados uma base e um colarinho, contendo também uma pedra porosa e papel filtro em cada extremidade. Por último, foi colocado um pistão e um pendural de peso morto, então, aplicada uma tensão vertical de 60 kPa, aplicada de forma gradual através da colocação de anilhas de metal. O adensamento ocorreu por um período de 48 horas, quando se verificou que não havia deslocamentos importantes (variação da ordem de 0,1%/hora).

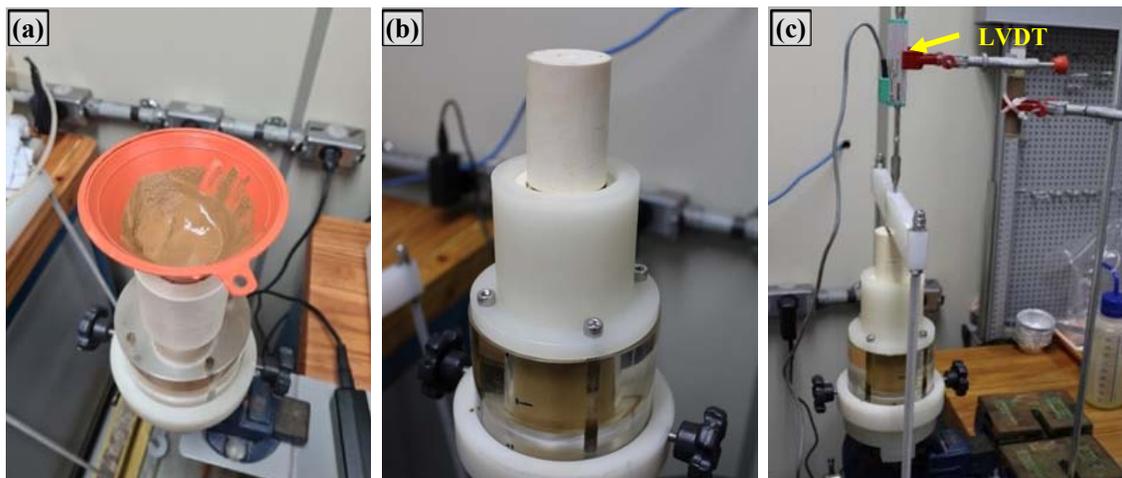


Figura 4. a) Colocação do solo com auxílio do funil; b) base, parte central da célula, colarinho e pistão para o sistema de adensamento; c) posicionamento do pendural e transdutor de deslocamento.

Quando o sistema era desmontado, havia um material excedente (Figura 5a) e dele era separado o material para verificação do teor de umidade e do pH do solo. No topo e na base do corpo de prova eram realizados ensaios de *Fall Cone* (Figura 5b) para obtenção da resistência não drenada do solo, como mostra a Figura 5c. O ensaio de *Fall Cone* era realizado seguindo as orientações normativas da ISO/TS 17892-6 (2015) quanto às características do equipamento. Já os procedimentos foram adaptados em função das limitações técnicas encontradas (a exemplo da dimensão reduzida das amostras de 1,5”, afetando o espaçamento mínimo entre os pontos e as laterais do corpo da célula).

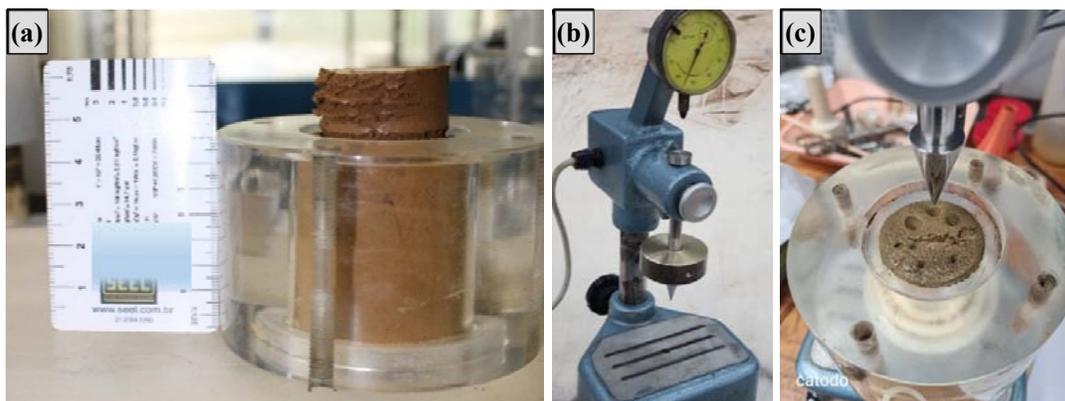


Figura 5. a) Parte central da célula eletrocinética após o adensamento, com o material excedente; b) aparelho de *Fall Cone*; c) ensaio de *Fall Cone* realizado na extremidade do corpo de prova.

#### 2.4 Procedimentos para os Ensaios de *Fall Cone*

O ensaio consistiu no posicionamento do cone com sua ponta fazendo uma das extremidades do corpo de prova. Mediu-se com o relógio comparador a distância entre o referencial (ponta do relógio comparador) e o topo da haste do cone, chamando essa leitura de “zero”. O cone foi liberado e pode penetrar livremente por um período de 5 segundos. Após essa etapa, mediu-se novamente com o relógio comparador a distância entre o referencial e o topo da haste do cone, sendo essa a leitura final. A profundidade de penetração do cone ( $i$ ) é a diferença entre as leituras inicial e final do relógio comparador, em milímetros.

Em função da escolha do cone e seu ângulo do vértice ( $\beta$ ), a penetração ( $i$ ) e o peso do cone utilizado ( $\vec{g} \cdot m$ ), é obtida a resistência não drenada do solo ( $S_u$ ), como sugere a Equação 1:

$$S_u = c \cdot \vec{g} \cdot \frac{m}{i^2} \quad (1)$$

Onde:

$c = 0,80$  é a constante adotada para cones com ângulo do vértice medindo  $\beta = 30^\circ$ ;

$m = 80$  g é a massa do cone adotado;

$\vec{g} = 9,81$  m/s é a aceleração da gravidade;

$i$  = penetração do cone em milímetros;

Nos ensaios foi utilizado o cone com ângulo do vértice  $\beta = 30^\circ$  e com a massa de 80g.

## 2.5 Teor de Umidade e pH do Solo

Para obtenção do teor de umidade coletava-se um pouco do solo logo após a realização do ensaio de *Fall Cone*. A amostra era pesada e colocada na estufa entre  $105^\circ\text{C}$  a  $110^\circ\text{C}$  por um período de no mínimo 24 horas. Os procedimentos e cálculos eram realizados conforme determinado na NBR 6457:2016.

Já a medição do pH do solo foi feita seguindo o manual de Métodos e Análise de Solo da Embrapa (Embrapa, 2017).

## 2.6 Realização dos Ensaios Eletrocinéticos com Injeção de Solução Química

Dois ensaios eletrocinéticos com tratamento químico (ECT 2 e ECT 3) foram realizados simultaneamente, sob as mesmas condições de preparo. Após a fabricação da amostra reconstituída, da obtenção da resistência não drenada e do teor de umidade do corpo de prova, todo o aparato de ensaio era montado (conjunto de célula eletrocinética, fonte ajustável e DAQ) e então eram adicionados os eletrólitos em seus respectivos reservatórios. Tanto para o ânodo quanto para o cátodo foi utilizada uma solução de  $\text{CaCl}_2$  na concentração de 1 M. Os ensaios tiveram duração cerca de 3 dias.

Ao término do ensaio, a célula foi desmontada e em seguida obtida a resistência não drenada nas duas extremidades do corpo de prova (Posições 1 e 5), para então ser extrudado e cortado em partes iguais, com o auxílio de um suporte extensor (Figura 6a) e um fio metálico fino para o corte. Após o corte, a fatia era particionada e obtidos o teor de umidade e pH do solo. Repetia-se o processo até a última fatia. Na Figura 6c é ilustrado o plano de corte realizado e sua terminologia: fatias 1/4, 2/4, 3/4 e 4/4; Ensaio *Fall Cone* nas Posições 1, 2, 3, 4 e 5.

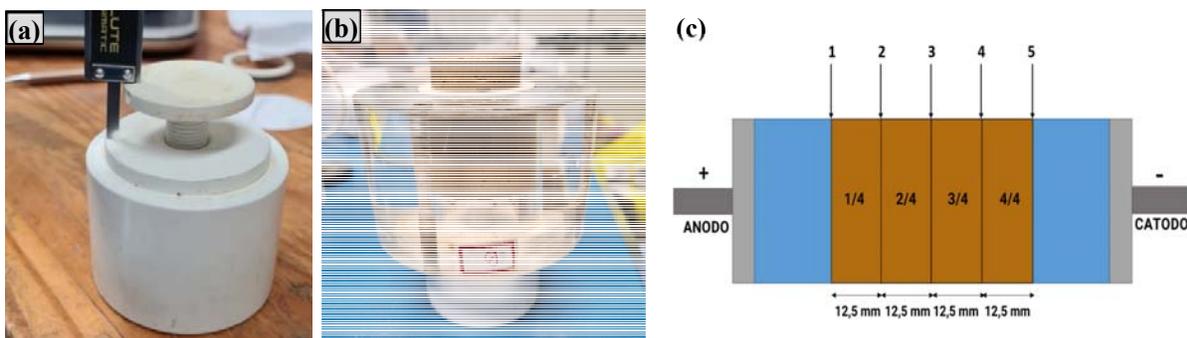


Figura 6. a) Suporte extensor (extrusor); b) fatia 1/4; c) Plano de corte das fatias.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após 48 horas do início dos ensaios, a coloração dos ânodos do ECT 2 e ECT3 estavam bem escuras e apresentando formação de material precipitado no fundo do reservatório do cátodo (Figura 7).

Durante os ensaios, foi observada grande quantidade de formação de bolhas no cátodo, oriundas do processo de geração de gases devido à eletrólise. Em ambos os ensaios houve a formação de uma trinca na proximidade do catodo, contendo uma mancha verde (Figuras 8 e 9).

Zhang et al. (2017) associa a geração de hidróxido de cálcio com a reação química gerada entre os íons cálcio e a hidroxila, e, que o carbonato de cálcio seja formado pela reação química entre o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

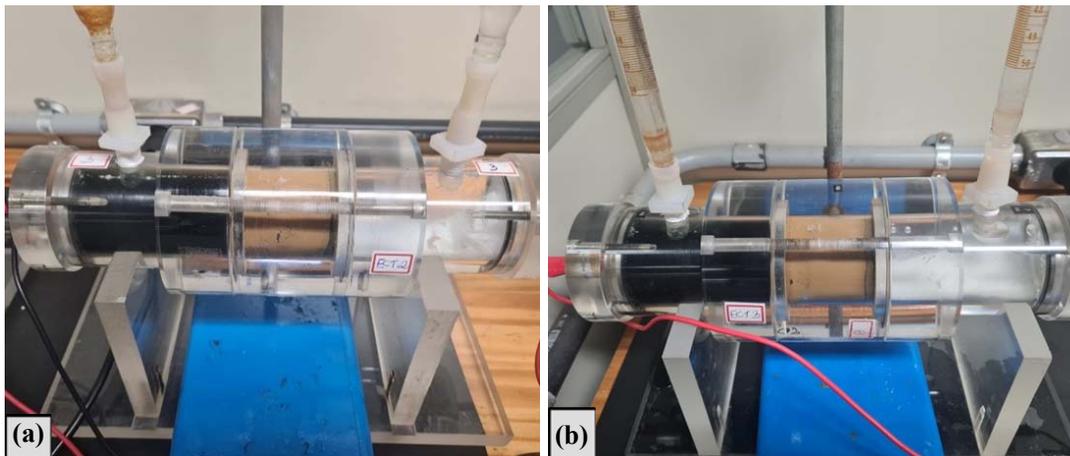


Figura 7. Ensaios: a) ECT 2 e b) ECT 3, após 48 horas do início.

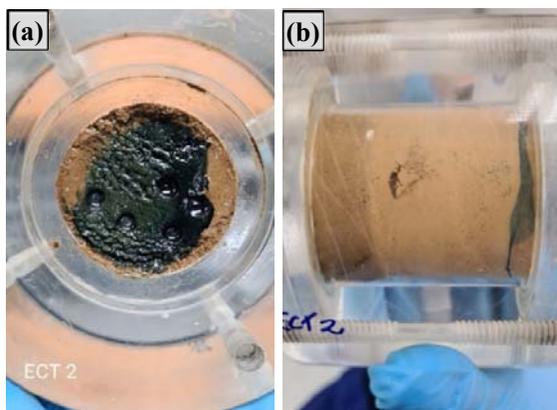


Figura 8. ECT 2 ao final do ensaio.

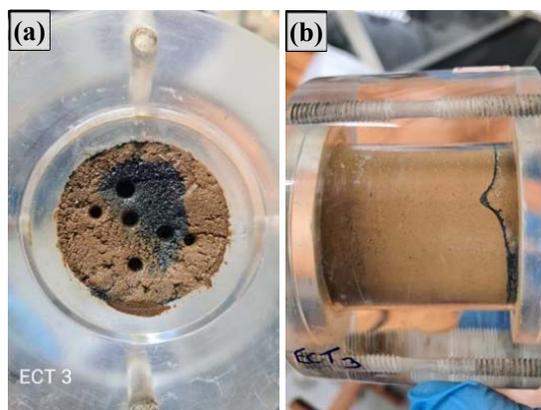


Figura 9. ECT 3 ao final do ensaio.

No gráfico da Figura 10, são apresentados os valores de resistência não drenada obtidos na fase Pré (antes do início do ensaio) e Pós (após término do ensaio) para os corpos de prova ECT 2 e ECT 3.

É possível inferir que houve uma melhora significativa na resistência não drenada, principalmente nas extremidades do corpo de prova. Atribui-se ao tratamento químico eletrocinético esse ganho de resistência na fase Pós ensaio. No ensaio ECT 2, apesar de resultar em um valor menor de resistência não drenada em comparação ao ensaio ECT 3, chega a ser a cerca de 2 vezes o seu valor inicial nas extremidades do corpo de prova. Já no ensaio ECT 3, foram encontrados valores de resistência não drenada entre duas e três vezes maior que no início do ensaio.

Apesar dos resultados possuírem uma dispersão em seus valores, é possível afirmar que o tratamento químico eletrocinético com a injeção de cloreto de cálcio conferiu uma melhora na resistência do solo, concentrada nas proximidades dos eletrodos.

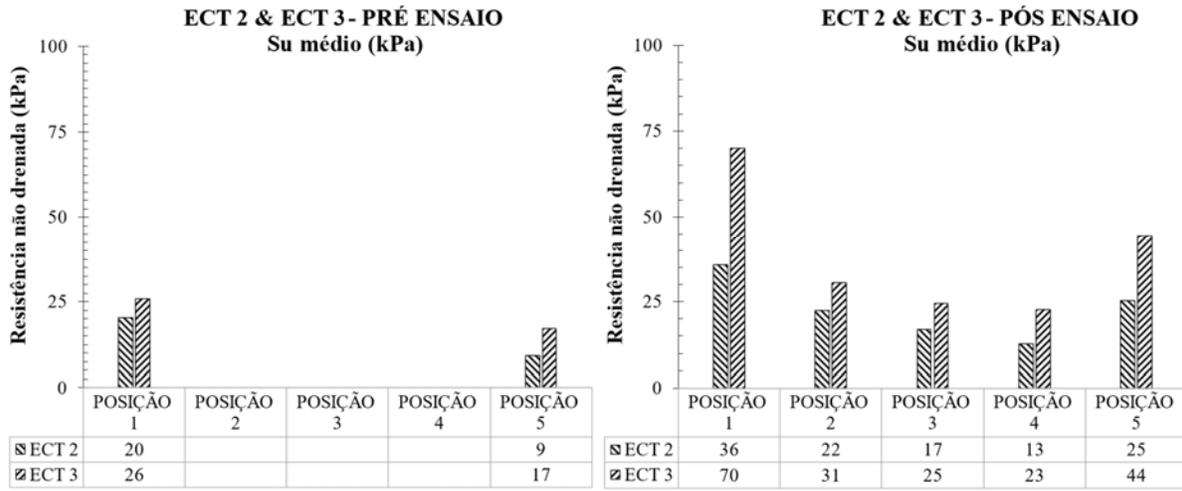


Figura 10. Resultados dos ensaios de *Fall Cone* realizados nos corpos de prova ECT 2 e ECT 3, antes e após o ensaio eletrocinético com tratamento químico.

Na Figura 11, são ilustrados os resultados do teor de umidade e pH, antes e após os ensaios.

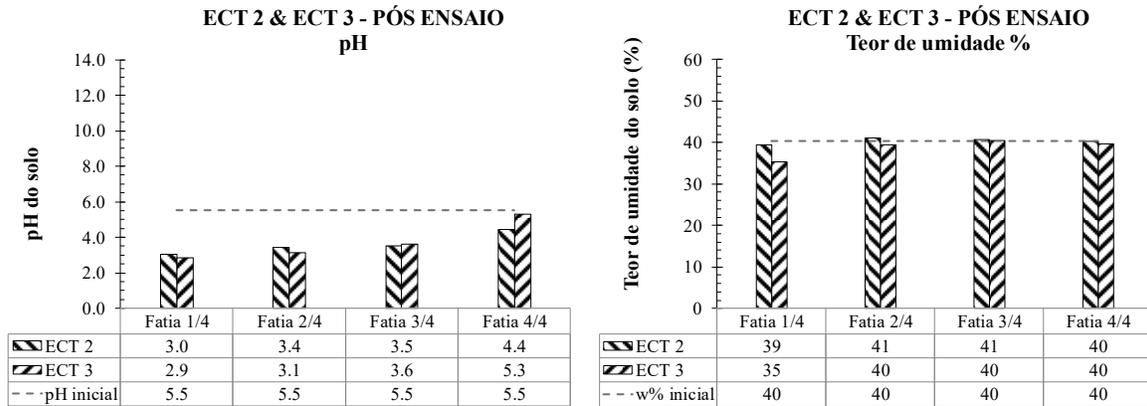


Figura 11. À esquerda, o gráfico com a variação de pH e à direita o teor de umidade, antes (inicial) e após os ensaios ECT 2 e ECT 3.

Não houve variação significativa do teor de umidade ao longo do corpo de prova, com exceção da fatia 1/4 (próxima ao anodo) do ensaio ECT 3, em que se observa uma diminuição do teor de umidade (cerca de 4%). Essa região do corpo de prova sofreu o maior ganho de resistência.

Chien et al. (2011) associa a diminuição do teor de umidade ao fluxo que parte do anodo em direção ao catodo e que provoca um aumento na resistência não drenada na região do anodo, o que pode explicar o maior ganho de resistência encontrado na região do anodo nos ensaios ECT 2 e ECT 3.

Ao final dos ensaios, em todas as fatias dos corpos de prova ECT 2 e ECT 3, o pH do solo se apresentou mais ácido. Autores como Alshawabkeh (2001), Chang et al. (2010) e Ou et al. (2013), associam o ocorrido ao fato de a eletrólise gerar uma frente ácida na região do anodo e uma frente alcalina na região do catodo. Essa frente alcalina avança de maneira mais lenta, pois se dá em sentido oposto ao fluxo eletrosmótico. Desta forma, é compreensível a observação de que o corpo de prova se torne mais ácido com o decorrer do ensaio eletrocinético, apesar da promoção da frente alcalina na solução católito.

#### 4. CONCLUSÃO

Este artigo teve como objetivo avaliar o ganho de resistência associado ao tratamento químico eletrocinético em um solo maduro argilo-arenoso com injeção da solução salina de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ).

Nos dois ensaios realizados, foram analisadas as alterações na resistência não drenada, pH do solo e teor de umidade. Apesar dos resultados não serem homogêneos, pode-se dizer que o tratamento químico eletrocinético com a injeção de  $\text{CaCl}_2$  propiciou alterações nas características físico-químicas do solo. Houve uma melhora na resistência do solo, localizada principalmente nas proximidades dos eletrodos, sem alterações significativas no teor de umidade do solo.

#### AGRADECIMENTOS

À CAPES e à PUC-Rio pelo auxílio a esta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alshawabkeh, A. N. (2001). *Fundamentos e aplicações de remediação eletrocinética em solos*. Apostila COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro.
- Asavadomdeja, P., Glawe, U. (2005). *Electrokinetic strengthening of soft clay using the anode depolarization method*. Bulletin of engineering geology and the environment, 64, 237-245.
- Bjerrum, L.; Moun, J.; Eide, O (1967). *Application of electroosmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay*. Geotechnique, v. 17, pp. 214-235.
- Cameselle, C., Reddy, K. R. (2012). *Development and Enhancement of Electro-osmotic Flow for the Removal of Contaminants from Soils*. Electrochimica Acta. 86, pp. 10-22.
- Carapajó, C. L., *Tratamento químico eletrocinético em um solo maduro do Campus Gávea da PUC-RIO empregando cloreto de cálcio e silicato de sódio*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2023.
- Chien, S.C., Ou, C.Y., Wang, Y.H. (2011). *Soil improvement using electroosmosis with the injection of chemical solutions: laboratory tests*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, v.34, n.7, pp. 863-875.
- Chang, H. W., Krishna, P. G., Chien, S. C., Ou, C. Y., & Wang, M. K. (2010). *Electro-osmotic chemical treatments: effects of  $\text{Ca}^{2+}$  concentration on the mechanical strength and pH of kaolin*. Clays and Clay Minerals, 58(2), 154-163.
- Embrapa (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. 3ª edição revista e ampliada, Brasília, DF.
- Iannelli, R., Masi, M., Ceccarini, A., Ostuni, M. B., Lageman, R., Muntoni, A., Spiga, D., Polettini, A., Marini, A., Pomi, R. (2015). *Electrokinetic remediation of metal-polluted marine sediments: experimental investigation for plant design*. Electrochimica Acta, 181, 146-159.
- Lefebvre, G.; Burnotte, F. (2002). *Improvements of electroosmotic consolidation of soft clays by minimizing power loss at electrodes*. Canadian Geotechnical Journal, Volume 39, pp. 399-408.
- Lin, Y. S.; Chien, S. C.; Ou, C. Y. (2017). *On the improvement through the middle area of kaolinite with electroosmotic chemical treatment*. Journal of GeoEngineering, 12(4), 167-173.
- Ou, C. Y.; Chien, S. C.; Wang, Y. G. (2009b). *On the enhancement of electroosmotic soil improvement by the injection of saline solutions*. Applied Clay Science, v. 44, pp.130-136.
- Ou, C. Y., Chien, S. C., Yang, C. C., & Chen, C. T. (2015). *Mechanism of soil cementation by electroosmotic chemical treatment*. Applied Clay Science, 104, 135-142.
- Ou, C. Y., Chien, S. C., Syue, Y. T., & Chen, C. T. (2018). *A novel electroosmotic chemical treatment for improving the clay strength throughout the entire region*. Applied Clay Science, 153, 161-171.
- Shen, Y., Shi, W., Li, S., Yang, L., Feng, J., & Gao, M. (2020). *Study on the electro-osmosis characteristics of soft clay from Taizhou with various saline solutions*. Advances in Civil Engineering, 2020, 1-13.
- Soares, R. M. *Resistência ao Cisalhamento de um Solo Coluvionar Não Saturado do Rio de Janeiro* Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ, 2005.
- Technical Specification - ISO/TS 17892-6 (2015): Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil- Part 6: Fall Cone test.