

Influência da Posição e do Material dos Eletrodos na Eletro-osmose e nos Parâmetros Elétricos do Solo

Carla Miranda Fabris

Laboratório de Geotecnia, Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil,
carlamiranda6@gmail.com

Clarisse de Oliveira Carmo

Laboratório de Geotecnia, Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil,
clarisse.carmo@gmail.com

Karen Ferreira Martins dos Santos

Escola Politécnica, UFRJ, Brasil, k_santos@poli.ufrj.br

Maria Claudia Barbosa

Laboratório de Geotecnia, Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil,
mclaudia@coc.ufrj.br

RESUMO: O artigo apresenta a influência da posição e do material de constituição dos eletrodos no comportamento dos parâmetros elétricos do solo e na quantidade de solução extraída durante a realização de ensaios eletrocinéticos. Nos experimentos, realizados em laboratório, foram utilizados eletrodos de aço inox e de DSA® posicionados junto ao solo e afastados do mesmo. Os testes foram feitos em um caulim tratado composto por 19% de argila e 81% de silte. Os parâmetros avaliados foram: o gradiente elétrico do solo (i_e), a densidade de corrente elétrica (j) e o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (k_e). Os resultados indicaram que as perdas de tensão elétrica foram maiores nos ensaios cujos eletrodos estavam posicionados afastados do solo, nas extremidades da célula eletrocinética, sendo a perda máxima equivalente a 61% para eletrodos de DSA®. Nos ensaios realizados com eletrodos posicionados juntos ao solo, o gradiente elétrico, a densidade de corrente elétrica, a quantidade de solução extraída e o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica foram superiores aos demais ensaios. A variação da condutividade elétrica e do pH também foi maior com essa configuração. Em se tratando dos eletrodos de diferentes materiais de constituição dispostos em iguais posições, os parâmetros elétricos, a condutividade elétrica e o pH apresentaram comportamentos semelhantes. Apesar das similaridades observadas utilizando-se eletrodos de aço inox e DSA® na mesma posição, é importante destacar que o uso de eletrodos compostos por materiais inertes, como o DSA®, é vantajoso por minimizar a liberação de íons indesejáveis no solo e por diminuir a corrosão durante a eletrocinética.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaio eletrocinético, eletrodos, eletro-osmose, parâmetros elétricos.

1 INTRODUÇÃO

A técnica eletrocinética consiste na aplicação de uma corrente elétrica através de dois eletrodos inseridos em um meio poroso. Diversos fenômenos podem ocorrer devido à combinação entre gradiente hidráulico e elétrico. Dentre eles, do ponto de vista geotécnico, a eletro-osmose, ou

seja, o movimento de líquido, é o mais relevante. Em solos carregados negativamente, há mais cátions móveis que ânions e o fluxo eletro-osmótico resultante normalmente ocorre no sentido anodo-catodo (Mitchell e Soga, 2005).

Dois aspectos relevantes para aplicação da eletrocinética, por influenciarem diretamente na eficiência da técnica e no seu custo de aplicação,

são a disposição dos eletrodos no solo e o material de constituição. Normalmente, o anodo sofre considerável corrosão e, segundo Casagrande (1949), deve ser substituído quando a corrente elétrica diminuir substancialmente.

Eletrodos de aço são comumente empregados na aplicação da eletrocinética em campo, podendo-se citar Casagrande (1952); Bjerrum *et al.* (1967); Fetzer (1967); Barker *et al.* (2004) e Chien *et al.* (2014). A corrosão dos anodos de aço durante a eletrocinética foi relatada, por exemplo, por Bjerrum *et al.* (1967), Barker *et al.* (2004) e Schmidt (2004). Em muitos casos, a intensa corrosão dos anodos, advinda das reações de oxidação, torna a técnica dispendiosa e prejudica a sua eficiência. Ademais, os íons resultantes da oxidação dos eletrodos são liberados para a solução e, quando incorporados ao argilomineral, podem resultar em alterações nas propriedades físico-químicas e elétricas do solo.

A perda de tensão elétrica durante a eletrocinética pode ser dividida em três parcelas (Alshawabkeh *et al.*, 2004): a queda de diferença de potencial elétrico que ocorre na solução do tanque do anodo, ou anólito (ΔV_a); a queda que ocorre no solo (ΔV_s) e a que acontece na solução do tanque do catodo, ou católito (ΔV_c). Em geral, as perdas nos eletrodos são pouco importantes e podem ser desconsideradas. A Figura 1 ilustra, simplificada, as perdas que ocorrem nos tanques e no solo durante o procedimento eletrocinético.

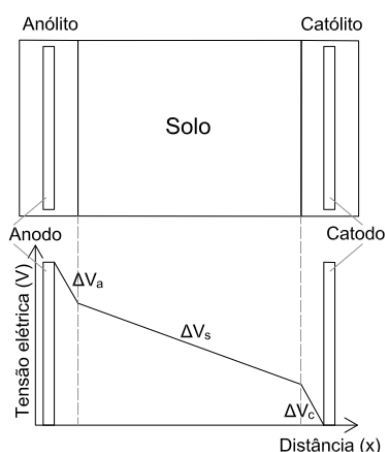


Figura 1. Queda de tensão elétrica nos tanques e no solo (Adaptado de Alshawabkeh *et al.*, 2004)

As quedas que ocorrem no anólito e no católito dependem da composição química da solução, em especial da sua condutividade

elétrica. Quando é utilizada água destilada ou deionizada nos tanques, cuja condutividade elétrica em geral é inferior à do solo, as perdas podem ser significativas. À medida que o ensaio acontece, no entanto, a condutividade elétrica da solução dos tanques aumenta e os efeitos das perdas de potencial elétrico nessa região diminuem.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da posição dos eletrodos em relação ao solo e do material de constituição dos mesmos na evolução dos parâmetros elétricos com o decorrer dos ensaios. Após a eletrocinética, almejou-se também a análise da relação entre a configuração dos eletrodos e os valores de pH e de condutividade elétrica da solução intersticial do solo.

Os ensaios realizados também objetivaram a investigação dos efeitos das variações dos parâmetros elétricos e da configuração dos eletrodos sobre a quantidade de solução extraída durante a eletrocinética, ou seja, como esses fatores interferem na eletro-osmose.

3 METODOLOGIA

3.1 Equipamento

Os ensaios eletrocinéticos foram realizados no aparato eletrocinético desenvolvido por Schmidt (2004) e aprimorado ao longo dos anos, e é composto por uma célula cilíndrica de cerca de 14,6 cm de comprimento e 7,25 cm de diâmetro interno, onde o solo é moldado; dois tanques de alimentação que são acoplados às extremidades da célula e que se comunicam com o solo; dois reservatórios responsáveis por alimentar o sistema e dois tubos de vidro para saída de gases.

Além disso, dois transdutores de pressão são ligados aos reservatórios, permitindo o monitoramento do fluxo eletro-osmótico resultante durante o ensaio. Duas bombas peristálticas são responsáveis pela circulação da solução entre os tanques e os reservatórios. Também são monitoradas a tensão elétrica em 5 pinos, localizados ao longo da célula, a tensão elétrica total aplicada, a corrente elétrica e a temperatura. O esquema do equipamento

eletrocinético é apresentado na Figura 2.

Dada a configuração do aparato, na qual o eletrólito se comunica com o solo, pretendeu-se avaliar como a posição dos eletrodos – na extremidade dos tanques ou juntos ao solo, conforme a Figura 3 – influenciou a eletrosmose e os parâmetros elétricos que se desenvolveram ao longo do ensaio.

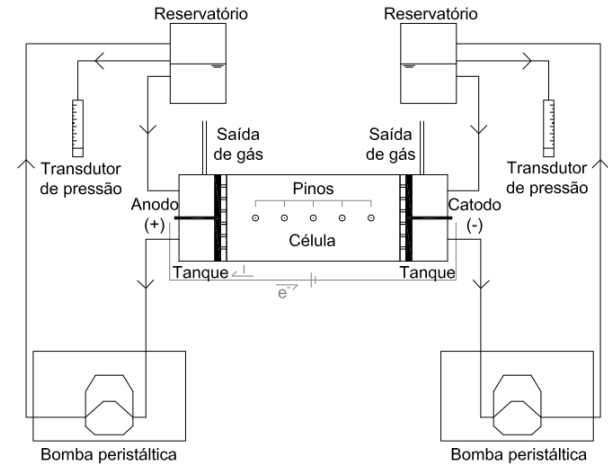


Figura 2. Esquema do equipamento eletrocinético

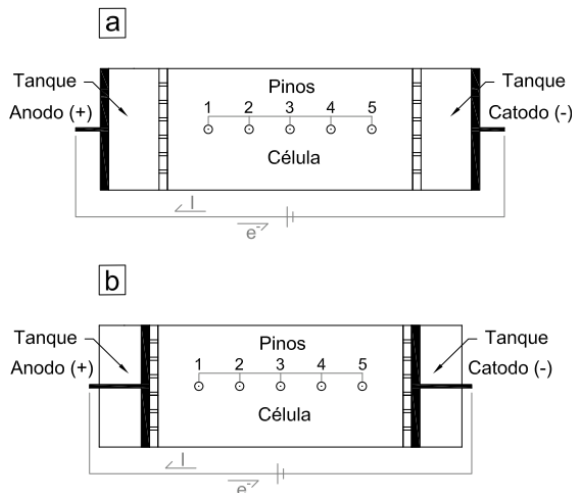


Figura 3. Posição dos eletrodos em relação à célula eletrocinética.
a) Eletrodos afastados do solo; b) eletrodos juntos ao solo

Foram utilizados eletrodos de aço inox e eletrodos perfurados de DSA®, na intenção de se avaliar a influência do material nos resultados obtidos. Os eletrodos DSA® foram desenvolvidos pela empresa De Nora e são constituídos de titânio e revestidos com diferentes elementos, como irídio, rutênio, platina, ródio e tântalo. Espera-se que a corrosão nesses eletrodos seja menor do que nos eletrodos de aço inox.

O plano de ensaios (Tabela 1) foi composto por 3 experimentos cujas variáveis foram o tipo e a posição dos eletrodos. Em todos os ensaios, foi aplicada uma tensão de 5 V durante 48 horas, a solução utilizada nos reservatórios e tanques foi água deionizada e a temperatura ambiente foi controlada.

Tabela 1. Resumo do planejamento experimental adotado.

Ensaio	Material dos Eletrodos	Posição dos Eletrodos
EK1	DSA®	Junto ao solo
EK2	DSA®	Extremidade dos tanques
EK3	Aço inox	

3.2 Solo estudado

Todos os ensaios foram realizados com um caulim tratado, destinado a uso industrial. A composição granulométrica do caulim e os limites de Atterberg são expostos na Tabela 2. A densidade real dos grãos (G_s) foi 2,58. Os limites de Atterberg foram determinados segundo as normas NBR 6459 e NBR 7180, para o limite de liquidez e plasticidade, respectivamente. A granulometria foi determinada segundo a NBR 7181.

Tabela 2. Composição granulométrica e limites de Atterberg do caulim

Granulometria				w_p (%)	w_L (%)
Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)		
19	81	0	0	21,9	45,1

Objetivando-se garantir a repetibilidade dos ensaios, o solo, previamente moldado com água deionizada, passou por um processo de adensamento. Os parâmetros geotécnicos após o adensamento podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros geotécnicos pré-ensaios eletrocinéticos.

Ensaio	Material dos Eletrodos	Índice de vazios	Umidade (%)	Grau de saturação (%)
EK1	DSA®	1,37	51,5	98,4
EK2	DSA®	1,41	52,6	97,6
EK3	Aço inox	1,40	52,0	97,0

Após os ensaios eletrocinéticos, o solo era dividido em 3 fatias, designadas de “Fatia 1” (próxima ao anodo), “Fatia 2” (meio) e “Fatia 3”

(próxima ao catodo), nas quais eram feitas medições do pH da solução intersticial.

4 RESULTADOS

As perdas de tensão elétrica no pino 1, o gradiente elétrico (i_e), a densidade de corrente (j) e o coeficiente de permeabilidade eletrosmótica (k_e) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Resultados dos ensaios eletrocinéticos

Ensaio	Perdas ¹	i_e (V/m)	j (mA/m ²)	k_e (m ² /V.s)
EK1	41 %	7,5 a 9,4	611 a 376	$3,6 \times 10^{-9}$ a $6,1 \times 10^{-9}$
EK2	61 %	1,2 a 5,0	47 a 292	$1,4 \times 10^{-9}$ a $2,3 \times 10^{-8}$
EK3	47 %	2,4 a 7,1	72 a 267	$8,8 \times 10^{-10}$ a $1,3 \times 10^{-8}$

¹Em relação às medições no pino 1, após 5 horas de ensaio

É notável que, com os eletrodos localizados juntos ao solo (EK1), a perda de tensão elétrica no pino 1 foi inferior ao observado com os eletrodos posicionados nas extremidades dos tanques. Nos ensaios realizados com os eletrodos afastados do solo (EK2 e EK3) a perda de tensão elétrica no pino 1 foi superior quando foram utilizados eletrodos de DSA®.

A evolução do gradiente elétrico e da densidade de corrente nos três ensaios são mostrados na Figura 4.

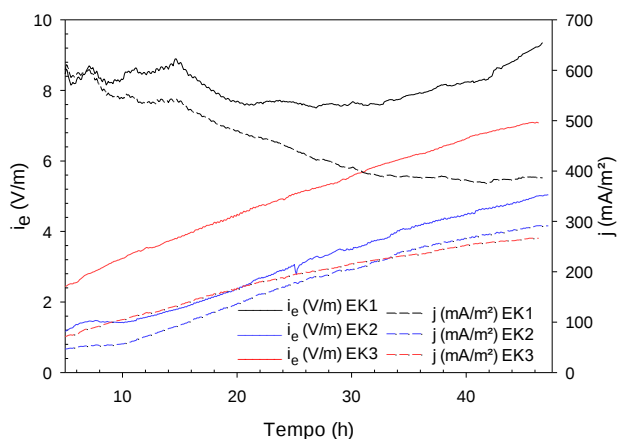
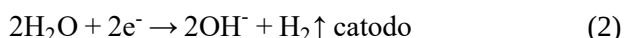
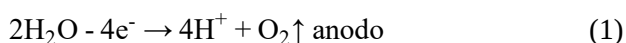


Figura 4. Gradiente elétrico e densidade de corrente elétrica durante os ensaios.

O gradiente elétrico entre os pinos 1 e 5 nos ensaios EK1 e EK3 foi superior ao do ensaio EK2, uma vez que, no último caso, a perda de diferença de potencial elétrico no pino 1 foi superior. O mesmo foi observado para a

densidade de corrente elétrica. Em todos os ensaios, i_e foi crescente, embora nos ensaios EK2 e EK3 a variação do gradiente tenha sido mais pronunciada.

Quando um gradiente de voltagem é aplicado em uma massa úmida de solo, ocorrem reações de oxidação da água na região do anodo e redução na região do catodo, conforme as Equações 1 e 2. A eletrólise gera um decréscimo do pH nas imediações do anodo e um aumento do pH próximo ao catodo (Yeung *et al.*, 1997; Mitchell e Soga, 2005).



O aumento do gradiente elétrico do solo ocorre devido às reações de eletrólise durante a eletrocinética. De acordo com Alshawabkeh *et al.* (2004), à medida que a frente ácida avança, a condutividade do solo aumenta nas proximidades do anodo e, no catodo, onde o pH é mais básico, ocorre precipitação iônica, diminuindo a condutividade elétrica nessa região. Dessa forma, no decorrer do ensaio o desenvolvimento de zonas de diferentes condutividades elétricas gera um aumento no gradiente elétrico do solo. Ademais, o ensaio EK1 exibiu valores mais elevados de gradiente elétrico entre os pinos 1 e 5 porque as medições de tensão elétrica no pino 1 foram superiores aos dos ensaios EK2 e EK3, uma vez que ocorreram menos perdas.

A densidade de corrente nos ensaios EK2 e EK3 foi crescente no tempo e, ao fim desses ensaios, esse parâmetro foi próximo a 300 mA/m². No ensaio EK1 a densidade de corrente foi decrescente e superior ao observado nos demais ensaios, oscilando entre cerca de 400 mA/m² e 600 mA/m². Os maiores valores de densidade de corrente decorrem das menores perdas de potencial elétrico no ensaio EK1, em que os eletrodos estavam localizados juntos ao solo.

O coeficiente de permeabilidade eletrosmótica (k_e) foi calculado segundo a Equação 3 e os resultados estão apresentados na Figura 5.

$$k_e = Q_e / i_e \cdot A \quad (3)$$

Na Equação 3, Q_e é a taxa de fluxo eletro-osmótico, i_e o gradiente elétrico e A a área da seção transversal normal ao fluxo.

Observa-se que k_e foi decrescente nos ensaios EK2 e EK3 e, após cerca de 28h, o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica nesses ensaios estabilizou-se entre $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V.s}$ e $3 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V.s}$, a mesma variação apresentada em Fabris *et al.* (2015), quando da realização de ensaios eletrocinéticos no mesmo caulim. No ensaio EK1 a eletro-osmose teve início após cerca de 27h e k_e estabilizou-se em aproximadamente $6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V.s}$.

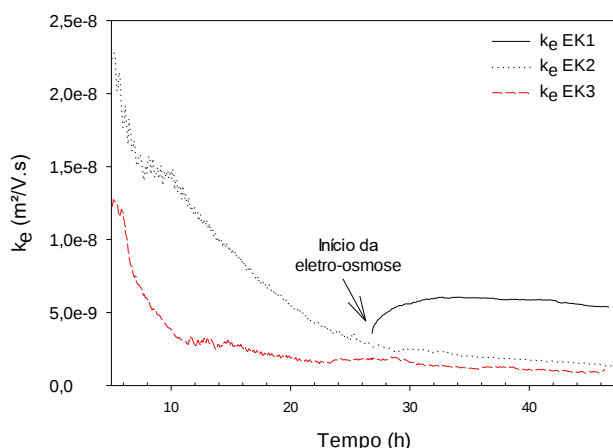


Figura 5. Coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica durante os ensaios.

O volume de solução extraída no ensaio EK1 foi cerca de 34 mL. Nos ensaios EK2 e EK3 foi em torno de 5 mL, justificando assim, conforme a Equação 3, os valores mais elevados de k_e encontrados no ensaio EK1. Em todos os ensaios o fluxo eletro-osmótico resultante ocorreu no sentido anodo-catodo.

Uma possível explicação para a quantidade superior de solução extraída no ensaio EK1 reside na maior diferença de potencial elétrico entre os pinos 1 e 5 nesse ensaio. Conforme mencionado, o aumento do gradiente elétrico decorre do desenvolvimento de zonas de diferentes condutividades no solo: no anodo o ambiente ácido é mais condutivo, enquanto no catodo o pH básico favorece o aumento da resistividade. Ademais, as tensões elétricas no pino 1 do ensaio EK1 foram superiores aos demais ensaios, tendo em vista que as perdas foram reduzidas quando os eletrodos foram posicionados juntos ao solo.

A Figura 6 apresenta a variação do pH da

solução intersticial das amostras antes e após o ensaio eletrocinético. Conforme esperado, o pH foi crescente da fatia 1 até a fatia 3.

As maiores variações de pH ocorreram no ensaio EK1, em que o pH foi em torno de 3,0 na fatia 1, 5,0 na fatia 2 e 6,0 na fatia 3. Nos demais ensaios, os pHs entre as fatias foram cerca de 5,0 (fatia 1), 6,0 (fatia 2) e 7,0 (fatia 3).

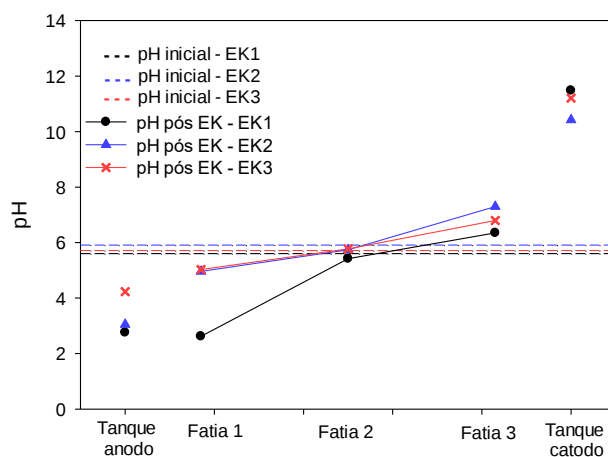


Figura 6. Variação do pH das amostras.

A densidade de corrente foi maior durante o ensaio EK1, acarretando possivelmente em reações mais pronunciadas de eletrólise da água e, conseqüentemente, no maior avanço da frente ácida através do solo. Segundo Alshawabkeh e Bricka (2000), como a frente básica é retardada pelo fluxo eletro-osmótico, que em geral é contrário a ela, o avanço da frente básica é mais lento do que o da frente ácida. Além disso, a mobilidade iônica do íon H^+ é aproximadamente 1,76 vezes a mobilidade do OH^- . Por conseguinte, a frente ácida é dominante, salvo nas proximidades do catodo.

Além de determinações do pH, foram realizadas medições da condutividade elétrica específica (CEE) da solução intersticial antes e após os ensaios eletrocinéticos, apresentadas na Figura 7.

As maiores variações foram observadas após o ensaio EK1, cuja CEE foi consideravelmente superior na fatia 1. Nesse mesmo ensaio foi medido o menor pH nas imediações do anodo. Em todos os casos, a CEE foi inferior na fatia 3.

Os resultados das determinações da CEE corroboram com as medições do gradiente elétrico entre os pinos 1 e 5. À medida que a condutividade nas imediações do anodo aumenta e nas proximidades do catodo diminui, a

diferença de potencial elétrico entre os pinos aumenta. Além disso, conforme mencionado, o pH ácido próximo ao anodo favorece o aumento da CEE, na medida em que propicia a dessorção de cátions do argilomineral e a dissolução dos precipitados. Ademais, a própria concentração de íons H^+ contribui para o aumento da CEE da solução intersticial. Na região básica, próxima ao catodo, ocorre precipitação iônica e consequente diminuição da CEE.

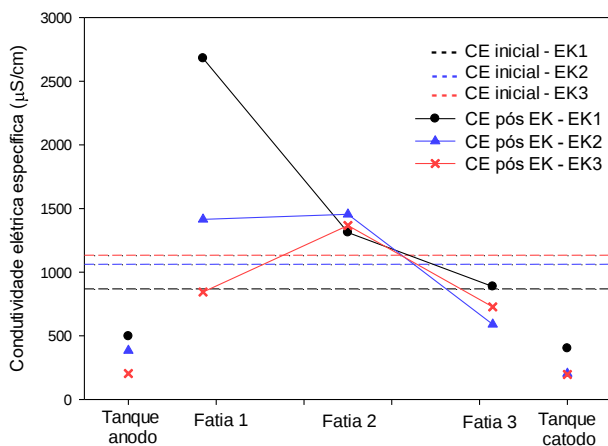


Figura 7. Variação da condutividade elétrica específica das amostras

5 CONCLUSÕES

O ensaio EK1, com eletrodos DSA® juntos ao solo, apresentou menos perda de tensão elétrica no pino 1 do que os ensaios EK2 e EK3, em que os eletrodos estavam localizados afastados do solo.

Por essa razão, o gradiente elétrico e a densidade de corrente elétrica foram superiores no ensaio EK1. Além disso, o volume de solução extraída durante a eletrocinética foi muito superior nesse ensaio, possivelmente devido aos maiores gradientes elétricos observados quando os eletrodos estão próximos ao solo.

A variação do pH e da condutividade elétrica específica da solução intersticial foi mais pronunciada no ensaio EK1. Isso ocorreu pois a densidade de corrente foi superior nesse experimento, resultando em reações de eletrólise mais intensas e, consequentemente, maior migração de íons H^+ e OH^- . O desenvolvimento de pH ácido na região do anodo propicia o aumento da CEE e, na região do catodo, a diminuição desse parâmetro.

Em relação aos ensaios realizados com os eletrodos afastados do solo, embora as perdas tenham sido maiores utilizando-se eletrodos de DSA®, os eletrodos de aço inox sofrem mais oxidação durante a eletrocinética e, a longo prazo, a eficiência da técnica fica prejudicada. Além disso, a liberação de íons provenientes da corrosão dos eletrodos acarreta em alterações na composição da solução intersticial dos solos e, conforme relatado por Bjerrum *et al.* (1967), Schmidt (2004) e Barker *et al.* (2004), esses íons podem ser incorporados ao complexo sortivo do argilomineral, ocasionando alterações nas suas propriedades físico-químicas.

AGRADECIMENTOS

À FAPERJ e à CAPES pelas bolsas concedidas durante a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alshawabkeh, A. N.; Bricka, R. M. (2000) Basics and Applications of Electrokinetic Remediation. In: Wise, D. L.; Trantolo, D. J.; Cichon, E. J.; Inyang, H. I.; Stottmeister, U. *Remediation Engineering of Contaminated Soils*, chapter 4, Marcel Dekker, New York, NY, USA.
- Alshawabkeh, A. N.; Sheahan, T. C.; Wu, Xingzhi (2004) Coupling of Electrochemical and Mechanical Processes in Soils under DC Fields, *Mechanics of Materials*, V. 36, p. 453-465.
- Barker, J. E.; Rogers, C. D. F.; Boardman, D. I.; Peterson, J. (2004) Electrokinetic stabilisation: an overview and case study, *Ground Improvement*, Vol. 8, p. 47-58.
- Bjerrum, L.; Moum, J.; Eide, O. (1967) Application of electro-osmosis to a foundation problem in a Norwegian quick clay, *Géotechnique*, Vol.17, p. 214-235.
- Casagrande, L. (1949) Electro-osmosis in Soils, *Géotechnique*, V. 1, issue 3, p. 159-177.
- Casagrande, L. (1952) Eletroosmotic stabilization of soils, *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 39, p. 51-83.
- Chien, S. -C.; Teng, F. -C.; Ou, C. -Y. (2014) Soil improvement of electroosmosis with chemical treatment using the suitable operation process, *Acta Geotechnica*, V. 10, p. 813-820.
- Fabris, C. M.; Carmo, C. O.; Lima, J. T.; Barbosa, M. C. (2015) Variação de parâmetros geotécnicos do solo após ensaio eletrocinético. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- Fetzer, C. A. (1967), Electro-Osmotic Stabilization of West Branch Dam, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 93, p. 85-106.
- Mitchell, J. K.; Soga, K. (2005) *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ,

USA, 592 p.

Schmidt, C. A. B. (2004) *Aplicação da técnica eletrocinética em laboratório a dois tipos de solos argilosos*, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 336 p.

Yeung, A. T.; Hsu, C. -N; Menon, R. M. (1997). Physicochemical soil-contaminant interactions during electrokinetic extraction, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 55, p. 221-237.