Matilde Villela de Souza

**Transporte eletrocinético de gasolina e óleo
através de um solo residual gnáissico e
borra de petróleo da Bacia de Campos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. José Tavares Araruna Júnior

Rio de Janeiro
Outubro de 2002

Matilde Villela de Souza

**Transporte eletrocinético de gasolina e óleo
através de um solo residual gnáissico e
borra de petróleo da Bacia de Campos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Tavares Araruna Júnior

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Izabel Christina d'Almeida Duarte de Azevedo

Universidade Federal de Viçosa

Prof. Sérgio Tibana

Universidade Estadual do Norte Fluminense

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de Outubro de 2002

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Matilde Villela de Souza

Graduou-se em Engenharia Civil com ênfase Ambiental na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2000. Desenvolveu junto com essa Universidade, projetos de Iniciação Científica com bambu, como um material de construção não convencional para a construção civil, incluindo a produção de trabalhos inovadores na área. Trabalha na Assessoria de Segurança e Meio Ambiente de uma Empresa privada.

Ficha Catalográfica

Souza, Matilde Villela de

Transporte eletrocinético de gasolina e óleo através de um solo residual gnáissico e borra de petróleo da Bacia de Campos / Matilde Villela de Souza ; orientador: José Tavares Araruna Júnior. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2002.

[19], 137 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Eletrocinese. 3. Descontaminação. 4. Solo residual. 5. Gasolina. 6. Óleo cru. 7. Borra de petróleo. I. Araruna Júnior, José Tavares. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

À minha mãe e ao meu pai, amigos eternos,
Muito amor, sempre.
E ao meu padrinho, saudades.

Agradecimentos

À minha família, pai, mãe, Lela, Lila, vó e vô, pelo eterno apoio, confiança e dedicação. Pelas conversas, pelo colo, pelo incentivo, credibilidade e acima de tudo pelo carinho e amor sempre tão necessários e preciosos. Muito obrigada, vocês são tudo de mais especial na minha vida.

Ao João, pelos maravilhosos momentos, pelo incentivo em fases difíceis, pelo companheirismo, pela concepção trabalho, por estar do meu lado, e claro, pela boa música. Muito obrigada, e muito amor. Também à sua família, que considero um pouco minha...

A todos meus amigos e companheiros de pós-graduação, pelo estudo, pelas madrugadas, conversas, trocas, pelos momentos de euforia e de angústia, Muito obrigada, já com saudades. Em especial à Flávia e à Ana Júlia, queridas companheiras.

Aos meus amigos extra estudo, por simplesmente serem meus amigos, sempre.

Ao meu orientador, José Araruna, pelo seu apoio, sua tranquilidade, disponibilidade, informalidade e pelo seu empenho em momentos complicados. Muito obrigada.

A todos meus professores de graduação e de pós-graduação da PUC-Rio que tanto me ensinaram. Em especial ao mestre Franklin, com todo seu carinho, apoio e perfeição didática.

A todos da secretaria, Ana, Fátima, Cristiano e Lenilson (quanto tempo), pelos sorrisos, empenho e boa vontade.

Ao pessoal do Laboratório de Geotecnia da PUC-Rio: Sr. José, pelas suas palavras, pela sua arte, dedicação e por ser tão prestativo. Ao mestre William, também pela sua dedicação, pelos seus ensinamentos e boa vontade. Ao Josué e Amaury, pela constante ajuda, e pelos momentos essenciais de descontração. Muito obrigada de coração por todos esse tempo que compartilhei com vocês, certamente será eterno na minha vida.

Ao pessoal da xerox da Engenharia da Vila dos Diretórios, em especial ao Valter e ao Mineiro, pelos anos de convívio, ajuda e carinho.

Ao pessoal do Laboratório de Química, Rodrigo e André, pela ajuda, boa vontade, pelo tempo despendido e por serem tão prestativos.

Ao pessoal do Departamento de Engenharia dos Materiais, professor Raul, Marcos e Glória, pela tentativa desesperada de adquirir resultados quando tudo parecia perdido.

Às biólogas Denise e Patrícia, pelo uso do Laboratório de Biologia em algumas análises químicas, cujos odores eram bastante inconvenientes, pela ajuda, boa vontade e companhia.

Ao amigo Flávio, pelos ensinamentos computacionais e pela extrema boa vontade. Também ao Daniel e André, amigos atuais de trabalho.

À querida Eutália, pela sua ajuda tão carinhosa no Abstract, dentre outras, claro

Ao amigo Alexandre, Químico, pela ajuda em diversas análises e pelas conversas, cafés e momentos descontraídos. E claro, pela maravilhosa comida paraense.

À CAPES, à ANP e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

A todos que participaram nesta fase da minha vida.

Existem momentos preciosos que muitas vezes não são percebidos, mas sei o quão foram importantes quando paro para pensar nessas pessoas que de alguma forma estão guardadas para sempre no meu coração.

Mais uma vez, muito obrigada.

Resumo

Souza, Matilde Villela; Araruna, José Tavares Júnior. **Transporte eletrocinético de gasolina e óleo através de um solo residual gnáissico e borra de petróleo da Bacia de Campos**. Rio de Janeiro, 2002. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O transporte eletrocinético de gasolina e óleo através de um solo residual gnáissico é focado na utilização da eletrocinese como uma técnica de remediação para solos finos. Baseia-se na aplicação de uma diferença de potencial através de uma massa de solo, com a conseqüente produção de um fluxo eletrocinético, o qual envolve mecanismos como eletrosmose (fluxo de água) e migração de íons.

Na primeira etapa, amostras de solo foram contaminadas com gasolina e com óleo cru. Os ensaios mostraram que a presença desses compostos não variou o comportamento dos parâmetros eletrosmóticos, assim como o pH e a condutividade elétrica dos eletrólitos e do próprio solo. Em dois dos ensaios realizados com óleo, observou-se um notório transporte em direção ao anodo devido à eletrosmose. Já com a gasolina os resultados das determinações analíticas sugeriram o transporte da mesma, embora que em uma escala reduzida.

Na segunda etapa analisou-se a remediação dos metais e do óleo presentes em uma borra de petróleo da Bacia de Campos, para a utilização desta como material geotécnico. Nenhum teor significativo de metal foi encontrado na borra antes do ensaio, em contrapartida, observou-se contaminação de zinco pela corrosão dos eletrodos de latão utilizados. E quanto ao óleo, notou-se um transporte considerável devido à eletrosmose.

Palavras chave

Eletrocinese – Eletrólise – Eletrodos - Remediação – Gasolina – Óleo cru - Borra de petróleo – Metais – Corrosão

Abstract

Souza, Matilde Villela; Araruna, José Tavares Júnior (Advisor). **Electrokinetic transport of gasoline and oil through a gnaissic residual soil and oil ground from Campos Basin.** Rio de Janeiro, 2002. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study assesses the use of electrokinetics as an innovative technique for remediation of fine-grained soils. It relies on the application of an electrical potential through a soil mass, producing a series of coupled flows, including fluid flow (electroosmosis) and migration of ions.

The first stage of the experimental program encompassed a series of tests with samples of residual soil contaminated with gasoline and crude oil. The results showed that the presence of these compounds did not affect the electroosmotic behavior, and there was observed no changes on the pH and electric conductivity of neither the electrolytes solution nor the soil itself.

When oil contaminated samples are of concern, it was noticed a clear electroosmotic flow towards the anode. This pattern was also observed, but at a reduced level, on the tests on the gasoline contaminated samples.

The second stage of the experimental program consisted on a series of tests with oil ground from Campos Basin aiming on dewatering and de-oiling. The results were satisfying, in all sample there was a noticeable reduction on the water and oil contents. Tests results also showed a zinc contamination on the sample caused by electrolysis on the brass electrodes.

Keywords

Electrokinetic – Eletrolise – Eletrode – Remediation – Gasoline – Crude oil
Petroleum waste - Metals – Corrosion

Sumário

1.	Introdução	20
2.	Abordagem Teórica	24
2.1.	Princípios da Eletrocinese	25
2.1.1.	Sistema Solo-Água	25
2.1.2.	Teorias sobre a Camada Dupla Elétrica	27
2.1.3.	Eletrocinese em Solos e o Potencial Zeta	31
2.1.4.	Efeito da Eletrocinese nos Solos	42
2.2.	Remediação de Solos Finos pela Eletrocinese	48
3.	Aspectos Experimentais	56
3.1.	Descrição do solo	56
3.1.1.	Ensaio de Caracterização	56
3.1.2.	Ensaio Químico	58
3.1.3.	Ensaio de permeabilidade	60
3.1.4.	Ensaio de Mineralogia	62
3.2.	Descrição da Borra de Petróleo	63
3.3.	Descrição das Células	64
3.3.1.	Célula 1	64
3.3.2.	Célula 2	67
3.4.	Procedimento de ensaios	68
3.4.1.	Célula 1 – Avaliação da Eletrocinese	68
3.4.2.	Célula 1 – Ensaio com Contaminante (gasolina e óleo)	73
3.4.3.	Extração de Compostos Orgânicos	74
3.4.3.1.	Extração propriamente dita	74
3.4.3.2.	INFRACAL TOG/TPH	77
3.4.3.3.	Calibração do Infracal TOG/TPH	79
3.4.3.4.	Fluorescência	80
3.4.4.	Célula 2	81
3.4.4.1.	Lixiviação (Análise dos Metais)	83
3.4.4.2.	Extração de óleo	85
4.	Apresentação e Discussão dos Resultados	86

4.1. Eletrocinese em solo não contaminado	86
4.1.1. Fluxo reverso	86
4.1.2. Índices Físicos Iniciais	87
4.1.3. Parâmetros Eletrosmótico	88
4.1.3.1. Vazão	88
4.1.3.2. Coeficiente de permeabilidade eletrosmótico (ke)	90
4.1.3.3. Corrente	91
4.1.3.4. Constante de Eficiência Eletrosmótica (ki)	92
4.1.3.5. pH	94
4.1.4. Índices Físicos Finais	95
4.2. Eletrocinese no solo contaminado com Gasolina	97
4.2.1. Índices Físicos Iniciais	98
4.2.2. Parâmetros Eletrosmóticos	99
4.2.2.1. Vazão	99
4.2.2.2. Coeficiente de permeabilidade eletrosmótico (ke)	100
4.2.2.3. Corrente	101
4.2.2.4. Coeficiente de Eficiência Eletrosmótica, ki	102
4.2.2.5. pH	103
4.2.2.6. Condutividade Elétrica	105
4.2.3. Índices Físicos Finais	107
4.2.4. Análises da descontaminação	108
4.2.4.1. Fluorescência	108
4.2.4.2. Análise deBTEX	110
4.3. Eletrocinese de solos contaminados com óleo	112
4.3.1. Índices físicos Iniciais	113
4.3.2. Parâmetros eletrosmóticos	113
4.3.2.1. Vazão	113
4.3.2.2. Coeficiente de Permeabilidade eletrosmótica, ke	114
4.3.2.3. Corrente	115
4.3.2.4. Coeficiente de eficiência eletrosmótica, ki	116
4.3.2.5. pH	117
4.3.2.6. Condutividade Elétrica	119
4.3.3. Índices físicos finais	120
4.3.4. Avaliação da Remediação Eletrocinética	122
4.3.4.1. Extrações de óleo do solo	122
4.4. Eletrocinese na Borra de Petróleo	124
4.4.1. Peso Específico	124
4.4.2. Parâmetro eletrosmótico	124
4.4.2.1. Corrente	125
4.4.3. Resultados da Remediação da Borra	126
4.4.3.1. Transporte de íons Análise por Lixiviação (NBR 10005) EK1	126
4.4.3.2. Transporte de óleo – EK2	129

5. Conclusões e Sugestões	132
6. Revisão Bibliográfica	137

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Tanque de gasolina subterrâneo	20
Figura 1.2 - Vazamento em uma tubulação	21
Figura 1.3 - Vazamento em um tanque de gasolina	21
Figura 2.1 - Esquema de instalação em campo para remediação in situ pelo fluxo eletroosmótico (Shapiro & Probststein, 1993)	24
Figura 2.2 - Distribuição de íons adjacentes a uma superfície de argila (Mitchell, 1993)	26
Figura 2.3 - Efeito do pH na Carga de superfície da Montmorilonita e da Caulinita (Alshawabkeh, 2001)	27
Figura 2.4 - O campo elétrico num capacitor de pratos paralelos. (a) O dieleto é um vácuo. (b) É apresentado o material do dieleto constante, er. (Hiemenz, 1986)	28
Figura 2.5 - Dois modelos para a camada dupla difusa: (a) a camada dupla difusa e (b) neutralização de carga devido parcialmente à distribuição de carga de uma prato paralelo e parcialmente à camada difusa (Hiemenz, 1986)	29
Figura 2.6 - Eletroforese (Mitchell, 1993)	32
Figura 2.7 - Eletroosmose (Mitchell, 1993)	33
Figura 2.8 - Potencial de fluxo (Mitchell, 1993)	33
Figura 2.9 - Migração ou Potencial de Sedimentação (Mitchell, 1993)	34
Figura 2.10 - Ilustração do esquema da variação do potencial com a distância de uma parede carregada na presença da camada de Stern. Significado dos subscritos: 0 na parede; d na superfície de Stern; d na camada difusa (Hiemenz, 1986)	35
Figura 2.11 - Linhas de Fluxo (que também representam o campo elétrico) ao redor de partículas esféricas de raio R. As linhas tracejadas representam a espessura da camada dupla, K-1. Em (a) KR é pequeno; em (b) KR é grande. (Hiemenz, 1986)	37
Figura 2.12 - As magnitudes relativas de vários potenciais da camada dupla (Hiemenz, 1986)	38
Figura 2.13 - Situação de um elemento de um volume de uma solução adjacente à uma parede planar. (Hiemenz, 1986)	39
Figura 2. 14 - Migração através do solo sob um campo elétrico descrevendo a geração e o transporte de produtos da eletrólise da água (íons H ⁺ /OH ⁻) e a reação de auto-ionização da água perto do catodo. (Acar et al. 1995)	43

Figura 2.15 - A razão da mobilidade iônica, u^* , do H^+ , OH^- , Pb^{2+} e $CO_2/3^-$ com o coeficiente de permeabilidade eletroosmótica, k_e , versus o coeficiente de permeabilidade eletroosmótica.(Acar et al., 1995)	44
Figura 2.16 - Degradação de um anel benzênico. (a) Degradação aeróbica do benzeno na presença de oxigênio. (b) Degradação anaeróbica do fenol na presença de nitrato. (Fetter, 1992)	53
Figura 3.1 - Curva Granulométrica do solo do município de Duque de Caxias (RJ)	57
Figura 3.2 - Antes do reagente	59
Figura 3.3 - Depois do reagente	59
Figura 3.4 - Ensaio de permeabilidade	61
Figura 3.5 - Difractograma do solo de Duque de Caxias – RJ (Nunes, 2002)	63
Figura 3.6 - Célula 1 de Eletrocinese	64
Figura 3.7 - Vista superior da parte central da célula 1	65
Figura 3.8 - Extremidades da célula 1 acopladas com a parte central	66
Figura 3.9 - Eletrodos sendo fixados na extremidade da célula 1	66
Figura 3.10 - Montagem da célula 1	67
Figura 3.11 - Célula 2	68
Figura 3.12 - Homogeneização da amostra	69
Figura 3.13 - Retirada de vazios do solo	70
Figura 3.14 - Auxílio de um acoplador	70
Figura 3.15 - Vista superior da célula com acoplador	70
Figura 3.16 - Primeiro estágio de compactação	71
Figura 3.17 - Arranjo do ensaio de Eletrocinese	72
Figura 3.18 - Amostras no shaker	76
Figura 3.19 - Erlenmeyres com solo e PCE	76
Figura 3.20 - Filtração dos extratos	77
Figura 3.21 - Aferição dos balões volumétricos	77
Figura 3.22 - Equipamento de medição de hidrocarbonetos totais	77
Figura 3.23 - A medição da absorção IR de uma amostra de óleo em uma cubeta de quartzo	79
Figura 3.24 - Gráfico Absorbância x Concentração	79
Figura 3.25 – Fluorímetro	81
Figura 3.26 - Célula 2 dividida em 8 fatias	82
Figura 3.27 - Célula 2 dividida em 4 fatias	83
Figura 3.28 - Amostras da lixiviação no shaker	84
Figura 3.29 - Vista superior da lixiviação	84
Figura 3.30 - Filtração à vácuo das amostras lixiviadas	84
Figura 3.31 - Amostras filtradas para análise no ICP	85
Figura 3.32 – ICP	85
Figura 3.33 - Close do ICP	85
Figura 4.1 - Vazão x tempo para os ensaios de Eletrocinese sem contaminação	88

Figura 4.2 - Vazio numa amostra de solo depois da compactação	89
Figura 4.3 - Gráfico: Coeficiente de permeabilidade x tempo para os ensaios de Eletrocinese sem contaminação	90
Figura 4.4 - Gráfico: Corrente x tempo para os ensaios sem contaminação	92
Figura 4.5 - Gráfico: Coeficiente de Eficiência Eletroosmótica x tempo para ensaios de Eletrocinese sem contaminação	93
Figura 4.6 - Gráfico pH da água dos compartimentos x tempo para ensaios de Eletrocinese sem contaminação	94
Figura 4.7 - Variação do pH no solo em 3 diferentes estágios, após o término dos mesmos	95
Figura 4.8 - Variação da umidade ao longo da célula para os ensaios de Eletrocinese sem contaminação	96
Figura 4.9 - Visualização do fluxo eletroosmótico em um ensaio com solo contaminado por gasolina	98
Figura 4.10 - Gráfico Vazão x tempo para ensaios de Eletrocinese em solos contaminados com gasolina	100
Figura 4.11 - Gráfico coeficiente de permeabilidade eletrosmótica x tempo para um solo contaminado com gasolina	101
Figura 4.12 - Gráfico: Corrente x tempo para solos contaminados com gasolina	102
Figura 4.13 - Gráfico coeficiente de eficiência eletroosmótica x tempo para solos contaminados com gasolina	103
Figura 4.14 - Gráfico: pH dos compartimentos x tempo para ensaios contaminados com gasolina	104
Figura 4.15 - Variação do pH de solos contaminados com gasolina	104
Figura 4.16 - Gráfico condutividade dos compartimentos x tempo para solos contaminados com gasolina	105
Figura 4.17 - Variação da condutividade do solo em ensaios contaminados com Gasolina	106
Figura 4.18 - Variação da Umidade relativa nos solos contaminados com gasolina	108
Figura 4.19 - Análise qualitativa da água percolada através do fluorímetro	109
Figura 4.20 - Transporte dos BTEXs numa amostra de solo contaminado com gasolina	111
Figura 4.21 - Transporte do Total de BTEXs para uma amostra de solo contaminado com gasolina	112
Figura 4.22 - Gráfico vazão x tempo para ensaios de solos contaminados com óleo	114
Figura 4.23 - Gráfico coeficiente de permeabilidade eletroosmótica x tempo para solos contaminados com óleo	115
Figura 4.24 - Gráfico corrente x tempo para solos contaminados com óleo	116
Figura 4.25 - Gráfico coeficiente de eficiência eletroosmótica x tempo para solos contaminados com óleo	117

Figura 4.26 - Gráfico pH dos compartimentos x tempo para solos contaminados com óleo	118
Figura 4.27 - Variação do pH nos solos contaminados com óleo, antes e depois dos ensaios	118
Figura 4.28 - Gráfico condutividade x tempo da água dos compartimentos de amostras contaminadas com óleo	119
Figura 4.29 - Gráfico da variação da condutividade do solo contaminado com óleo antes e depois dos ensaios	120
Figura 4.30 - Variação da umidade relativa ao longo de amostras de solo contaminados com óleo	121
Figura 4.31 - Transporte de óleo no ensaio EK1	122
Figura 4.32 - Transporte de óleo no ensaio EK3	123
Figura 4.33 - Volume percolado nos ensaios com a borra de petróleo	125
Figura 4.34 - Gráfico Corrente x tempo para os ensaios realizados com a borra do petróleo	126
Figura 4.35 Eletrodo de latão após aproximadamente 24 hs de ensaio	127
Figura 4.36 - Eletrodo de latão após 3 dias de ensaio	128
Figura 4.37 - Eletrodo de latão após aproximadamente 1 semana de ensaio	128
Figura 4.38 - Eletrodo de latão após mais de uma semana de ensaio	128
Figura 4.39 - Migração do zinco introduzido pela corrosão dos eletrodos de latão na Borra de Petróleo	129
Figura 4.40 - Transporte de óleo na Borra de Petróleo	130

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Resumo da Granulometria	57
Tabela 3.2 - Limites de Consistência	57
Tabela 3.3 - Valores medidos de pH	58
Tabela 3.4 - Conteúdo de matéria orgânica em 3 amostras do solo de Duque de Caxias (RJ)	60
Tabela 3.5 - Complexos intercambiáveis do solo (meq/100g de solo seco)	60
Tabela 3.6 - Valores de permeabilidade hidráulica para diferentes tensões e índices de vazios	62
Tabela 3.7 - Composição da borra de Petróleo (Exploração e Produção da borra da Bacia de Campos (E&P ASSEMA)	63
Tabela 3.8 - Medidas da parte central da célula 1	64
Tabela 3.9 - Medidas das extremidades da parte central	65
Tabela 3.10 - Medidas da célula	67
Tabela 3.11 - Estágios de Compactação	70
Tabela 4.1 - Índices Físicos iniciais das amostras de solo não contaminado	87
Tabela 4.2 - Índices Físicos Finais de amostras de solo não contaminados	97
Tabela 4.3 - Índices Físicos iniciais de amostras contaminadas com gasolina	99
Tabela 4.4 - Tempo de duração correspondente a cada ensaio	106
Tabela 4.5-Índices Físicos Finais para Amostras de solo com gasolina	107
Tabela 4.6 - Comparação do volume percolado para alguns ensaios eletrocinéticos	110
Tabela 4.7 - Propriedades dos BTEX (Newell et al.,EPA 1995)	111
Tabela 4.8 - Propriedades do óleo	112
Tabela 4.9 - Índices Físicos Iniciais para amostras de solo contaminadas com óleo	113
Tabela 4.10 - Índices físicos finais de amostras de solo contaminadas com óleo	121
Tabela 4.11 - Concentração (em ppm) dos metais na Borra de Petróleo, segundo análises por Lixiviação	127

Lista de Símbolos

E : resistência ao campo elétrico

ψ : potencial Elético

ρ^* : densidade de massa

ϵ_r : fator de proporcionalidade ente o campo elétrico o número de linhas de força

ϵ_0 : constante dielétrica do meio

n_i : número de íons i por unidade de volume

z : valência do íon

e : carga do elétron

T : temperatura

K^{-1} : espessura da camada dupla

δ : distância da camada de Stern à superfície da partícula

F_{el} : força elétrica

q : carga do íon

F_{vis} : força viscosa

f : fator de fricção

v : velocidade do íon

R : raio de uma partícula ou íon

η : viscosidade do líquido da solução

μ : mobilidade de um íon

A : área da partícula

ζ : potencial zeta

I : corrente elétrica

k : condutividade elétrica

V : voltagem

H_2O : molécula de água

O_2 : átomo de oxigênio

H^+ : íon hidrogênio

H_2 : átomo de hidrogênio

OH : íon hidróxido

E_0 : potencial de oxidação-redução

k_e : coeficiente de permeabilidade eletroosmótica

n: porosidade do meio sólido
F: fluxo de massa
 D_d : coeficiente de difusão
C: concentração da solução
 D^* : coeficiente de difusão efetivo
w: tortuosidade do meio poroso
 k_h : coeficiente de permeabilidade hidráulica
 i_h : gradiente hidráulico
h: carga hidráulica
l: comprimento da amostra
D: coeficiente de dispersão hidrodinâmica
 α : dispersividade dinâmica
 K_{ow} : coeficiente de partição octanol-água
 K_p : coeficiente de sorção
 K_{oc} : coeficiente de sorção normalizada de carbono
S: massa sorvida
 P_u : consumo de energia por unidade de volume
 I_G : densidade de corrente
 K_a : condutividade aparente
 i_e : gradiente elétrico
KCl: cloreto de potássio
 $CaCl_2$: cloreto de cálcio
MO: conteúdo de matéria orgânica
 C_{org} : conteúdo de carbono orgânico
Q: vazão
 k_i : coeficiente de eficiência eletroosmótica
Vol: volume percolado