



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

EDVALDO RODRIGUES DA ROCHA JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE REATOR ELETROCINÉTICO PARA APLICAÇÕES *EX-SITU*

MOSSORÓ

2018

EDVALDO RODRIGUES DA ROCHA JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE REATOR ELETROCINÉTICO PARA APLICAÇÕES *EX-SITU*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Francisco Odolberto de Araújo,
Prof. Dr.

Co-orientador: Júlio César Pereira Barbosa,
Prof. Dr.

MOSSORÓ

2018

EDVALDO RODRIGUES DA ROCHA JÚNIOR

DESENVOLVIMENTO DE REATOR ELETROQUÍMICO PARA APLICAÇÕES

EX-SITU

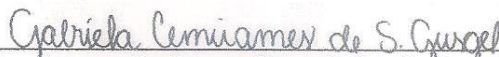
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Defendida em: 21 / 09 / 2018.

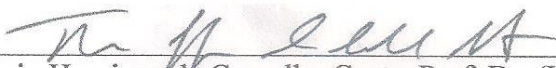
BANCA EXAMINADORA



Francisco Odolberto de Araújo, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Gabriela Cemirames de Sousa Gurgel, Prof.^a Dra. (UFERSA)
Membro Examinador



Thércio Henrique de Carvalho Costa, Prof. Dr. (UFRN)
Membro Examinador



Júlio César Pereira Barbosa, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

R672d Rocha Júnior, Edvaldo Rodrigues da.
Desenvolvimento de reator eletrocinético para
aplicações ex-situ / Edvaldo Rodrigues da Rocha
Júnior. - 2018.
57 f. : il.

Orientador: Francisco Odolberto de Araújo.
Coorientador: Júlio César Pereira Barbosa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais, 2018.

1. Eletrocinética. 2. Reator. 3. Eletrodos. I.
Araújo, Francisco Odolberto de , orient. II.
Barbosa, Júlio César Pereira , co-orient. III.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da Instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

AGRADECIMENTOS

- A Deus pela oportunidade.
- À minha família, meus pais Edvaldo e Mary pelo apoio, confiança e amor em todos os momentos.
- Ao Prof. Dr. Francisco Odolberto pela orientação, confiança e apoio extraordinário.
- Ao Prof. Dr. Rafael Batista pela amizade, solicitude e tempo dedicado.
- Ao Prof. Dr. Júlio César pela amizade, orientação e incentivo.
- À Prof^a Dra Gabriela Cemirames pela amizade, disponibilidade e colaboração.
- Ao amigo Ricardo pela parceria e colaboração nos experimentos.
- Aos amigos Ronielison e William, pela colaboração nas atividades de desenho e usinagem.
- As amigas Carla, Monaliza e Natalyany, pelo incentivo, amizade e ensinamentos.
- As amigas Amanda e Camila, pelo incentivo, amizade e bons momentos que vivenciamos.
- Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais – PPGCEM e ao Centro de Ciências Exatas e Naturais – CCEN da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, pela disponibilidade de infraestrutura e de recursos.
- À coordenação do LASAPSA – Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semi-Árido pela disponibilidade de infraestrutura e de recursos.
- À FINEP pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

“Uma nação que destrói seu território, destrói a si mesma”

Franklin D Roosevelt

RESUMO

A técnica eletrocinética tem muitas aplicações, uma destas, consiste na remoção de contaminantes do solo. No processo eletrocinético é gerada uma corrente elétrica de baixa intensidade devido a aplicação de uma diferença de potencial através de eletrodos inseridos em um solo úmido. Um reator eletrocinético foi desenvolvido e testado em laboratório com amostras de solos não artificiais, cuja tensão, corrente, pH, condutividade e concentrações de elementos químicos foram analisados para identificar a influência da utilização de eletrodos de inox com um eletrólito salino. Dentre os procedimentos metodológicos, foram realizados experimentos para avaliar a relação da variação de tensão para 10, 15 e 20 volts, com tempo de tratamento de 24, 36 e 48 horas. Observou-se o aumento das concentrações de ferro, níquel e cromo no líquido do reservatório do ânodo e no solo, como consequência da precipitação desses elementos dos eletrodos. Os ensaios eletrocinéticos atestaram a funcionalidade do reator e a utilização de elementos inovadores contribuíram para esses resultados.

Palavras-chave: Eletrocinética. Reator. Eletrodos.

ABSTRACT

The electrokinetic technique has many applications, one of them is the removal of contaminants from the soil. In the electrokinetic process, low intensity electric current is generated due to the application of a potential difference through electrodes inserted in moist soil. An electrokinetic reactor was developed and tested in laboratory with samples of non-artificial soils, whose voltage, current, pH, conductivity and concentrations of chemical elements were analyzed to identify the influence of the use of stainless steel electrodes with a saline electrolyte. Among the methodological procedures, experiments were carried out to evaluate the relationship of voltage variation to 10, 15 and 20 volts, with treatment time of 24, 36 and 48 hours. It was observed the increase of iron, nickel and chromium concentrations in the liquid of the anode reservoir and in the soil, as a consequence of the precipitation of these elements of the electrodes. The electrokinetic tests proved the functionality of the reactor, and the use of innovative elements contributed to these results.

Keywords: Electrokinetic. Reactor. Electrodes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Fenômenos químicos da absorção e adsorção.....	15
Figura 2	- Representação da eletrólise no solo.....	17
Figura 3	- Dupla camada elétrica difusa.....	19
Figura 4	- Configuração da remediação eletrocinética do solo.....	20
Figura 5	- Eletro-osmose.....	21
Figura 6	- Potencial de corrente.....	22
Figura 7	- Eletroforese.....	22
Figura 8	- Migração iônica.....	23
Figura 9	- Esquema do aparato para remediação eletrocinética.....	24
Figura 10	- Reator eletrocinético para experimentos laboratoriais.....	25
Figura 11	- Representação reator eletrocinético.....	27
Figura 12	- Célula eletrocinética.....	28
Figura 13	- Tubo da amostra.....	29
Figura 14	- Tampa intermediária.....	30
Figura 15	- Tampa externa.....	31
Figura 16	- Reservatório.....	32
Figura 17	- Reator eletrocinético.....	33
Figura 18	- Vista superior do tanque.....	34
Figura 19	- Vista lateral do tanque.....	34
Figura 20	- Elemento de vedação.....	35
Figura 21	- Manta bidim.....	35
Figura 22	- Eletrodo.....	36
Figura 23	- Eletrodo fixado na tampa externa.....	36
Figura 24	- Barra roscada.....	37
Figura 25	- Vista explodida da célula eletrocinética.....	37
Figura 26	- Esquema elétrico do aparato.....	38
Figura 27	- Aspecto visual (a) 10V-48h; (b) 10V-48h, observando a trinca após 39h....	42
Figura 28	- Aspecto visual (a) 15V-36h; (b) 15V-36, observando a trinca após 23h.....	43
Figura 29	- Aspecto visual (a) 20V-48h; (b) 20V-48, observando a trinca após 16h.....	43
Figura 30	- Aspecto visual (a) 20V-24h; (b) 20V-24, observando a trinca após 16h.....	44
Figura 31	- Aspecto visual (a) Eletrodo ânodo; (b) Eletrodo cátodo.....	46

Figura 32	Líquido do ânodo.....	47
Figura 33	Aspecto visual e concentrações antes do início dos experimentos.....	48
Figura 34	Aspecto visual e concentrações após o término dos experimentos.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	- Delineamento experimental.....	39
Gráfico 2	- Tensão em função do tempo.....	44
Gráfico 3	- Corrente em função do tempo.....	45
Gráfico 4	- Gasto energético.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Características físicas do solo.....	40
Tabela 2	- Características químicas do solo.....	40
Tabela 3	- Condutividade das amostras.....	45
Tabela 4	- pH das amostras.....	46
Tabela 5	- Concentrações de ferro.....	50
Tabela 6	- Concentrações de níquel.....	51
Tabela 7	- Concentrações de cromo.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

E_0	Potencial eletroquímico
Me	Metal
mA	Miliampère
Fe	Ferro
Ni	Níquel
Cr	Cromo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	Solo.....	14
2.1.1	Mobilidade e fixação de partículas em solos.....	14
2.2	Eletrocinética.....	15
2.3	Eletrólise.....	16
2.4	Potencial hidrogeniônico.....	18
2.5	Dupla camada difusa.....	18
2.6	Fenômenos eletrocinéticos.....	20
2.6.1	Eletro-osmose.....	21
2.6.2	Potencial de corrente.....	21
2.6.3	Eletroforese.....	22
2.6.4	Migração iônica.....	23
2.7	Reatores eletrocinéticos.....	23
2.8	Consumo energético.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1	Especificações técnicas do reator eletrocinético.....	27
3.2	Ensaio eletrocinético.....	39
4	RESULTADOS.....	42
4.1	Corrente e tensão.....	42
4.2	Condutividade e pH.....	45
4.3	Concentrações dos elementos químicos.....	47
4.3.1	Concentrações de ferro.....	50
4.3.2	Concentrações de níquel.....	50
4.3.3	Concentrações de cromo.....	51
4.4	Gasto energético.....	52
5	CONCLUSÃO.....	53
6	PERSPECTIVAS.....	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

O solo é de fundamental importância para o ecossistema, pois funciona como um filtro natural, com capacidade de depuração e retenção de substâncias contaminantes. O mesmo é constituído por elementos minerais e orgânicos, com diversas propriedades físicas, químicas e biológicas.

A utilização da técnica eletrocinética no solo tem sido realizada para diversas aplicações. Uma destas, consiste em tratar solos contaminados por metais pesados, hidrocarbonetos, entre outros. O processo ocorre através da aplicação de uma diferença de potencial em eletrodos inseridos em um solo úmido, na qual é induzida uma corrente elétrica que mobiliza as espécies presentes no solo.

Uma vez identificados os metais pesados em concentrações elevadas, seja de origem natural ou antrópica, surgem algumas preocupações quanto ao ingresso dessas formas na cadeia alimentar, efeitos prejudiciais ao desenvolvimento das plantas (fitotoxicidade), acúmulo de solo, entre outras.

O conhecimento da dinâmica de metais no solo é que permitirá o entendimento da forma como o reator poderá atuar na remoção desses elementos do solo.

Na solução do solo, os metais podem ser encontrados como íons livres, complexos solúveis com ânions inorgânicos ou ligantes; já em interação com a fase sólida, podem estar adsorvidos eletrostaticamente ou, em sítios específicos, adsorvidos de forma covalente; precipitados como carbonatos, sulfatos, fosfatos e hidróxidos.

Nesse sentido é importante discutir que propriedades do solo afetam a forma como esse metal se encontra no solo, além de que propriedades podem interferir na utilização da técnica eletrocinética no tratamento dos solos.

O objetivo do presente trabalho foi construir e testar um reator eletrocinético em solo não artificial. As análises dos parâmetros tensão, corrente, pH, condutividade e concentração de ferro, níquel e cromo permitiram compreender como o material dos eletrodos e o eletrólito inicial interferem no processo eletrocinético.

O delineamento experimental teve como finalidade caracterizar o desempenho do reator para a aplicações em laboratório (*ex situ*), através da variação da tensão em função tempo.

O controle dos principais parâmetros permite estabelecer a possibilidade da obtenção da mobilidade de elementos constituintes dos eletrodos e do solo, de modo a permitir aplicações como remediação, descontaminação, etc.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Solo

O solo é definido como a camada superior da crosta terrestre, situada entre o substrato rochoso e a superfície. O mesmo é constituído por partículas minerais, matéria orgânica, água, ar, organismos vivos, e desempenha papel relevante na atividade humana, na sobrevivência dos ecossistemas e da vida em geral (PNAAS, 2012).

2.1.1 Mobilidade e fixação de partículas em solos

Conforme Hypolito; Andrade e Ezaki (2011), o transporte e fixação de partículas nas soluções dos solos se realiza através de fenômenos físicos e químicos. Os físicos são: advecção, difusão e dispersão.

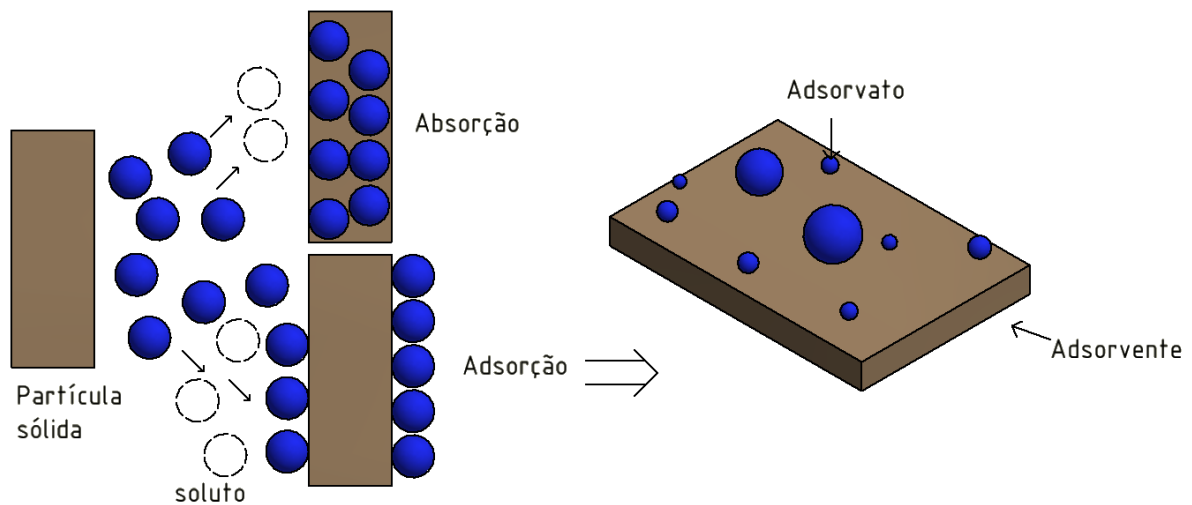
O fenômeno da advecção refere-se ao processo através do qual a água transporta o soluto, portanto, só ocorrerá advecção na ocorrência de gradientes hidráulicos. Esse processo é responsável pela migração de agentes poluidores.

O fenômeno da difusão é proporcional ao gradiente de concentração e relaciona-se a parâmetros como viscosidade, temperatura e tamanho de partículas. Esse parâmetro tem relevância no transporte de solutos, pois influi mesmo em ambientes de baixa taxa de fluxo, baixa permeabilidade, podendo ocorrer em meio poroso ou livre, no qual os solutos de zonas de maior concentração movem-se para as zonas mais diluídas, sendo este um processo irreversível, o qual acontece mesmo na ausência de gradiente hidráulico.

A dispersão está associada a movimentação dos solutos em todas as direções, a qual depende da permeabilidade do solo, sendo que a variação de velocidade da água é função da heterogeneidade do solo.

Os fenômenos químicos estão relacionados aos processos de sorção ou dessorção. A sorção é caracterizada pela aderência e penetração das partículas (íons, átomos, moléculas etc.) no solo e pode ser classificada como adsorção e absorção (Figura 1). Na absorção ocorre a difusão, já na adsorção o adsorvato é o soluto e localiza-se junto do substrato sólido denominado de adsorvente. Em contrapartida a dessorção caracteriza-se pela liberação das partículas para o fluído.

Figura 1 – Fenômenos químicos da absorção e adsorção.



Fonte: Adaptado de Hypolito; Andrade e Ezaki (2011)

2.2 Eletrocinética

A eletrocinética, conforme Gale; Li e Acar (1994) e Kim et al. (2011), abrange a eletroquímica, química dos solos, física, geotécnica e engenharia ambiental, cuja técnica é capaz de remediar solos contaminados por metais pesados, compostos orgânicos, inorgânicos, entre outros.

O processo consiste em aplicar uma diferença de potencial em eletrodos inseridos em uma massa de solo úmida em um arranjo que permite o fluxo de fluidos (ACAR; ALSHAWABKEH; GALE, 1993; OUHADI et al., 2010). É gerado um campo elétrico que mobiliza as espécies que estão no sistema ou foram adicionadas pelas reações de eletrólises ou através do fluido do processo (PUPPALA et al., 1997; PENG et al., 2018).

De acordo com Yeung; Hsu e Menon (1997) e Yeung (2011), a tecnologia de remediação eletrocinética é de baixo custo e eficiente para solos de baixa permeabilidade, principalmente quando é impraticável remediar por meio de outras técnicas. Na aplicação da eletrocinética acontecem vários processos de descontaminação, tornando essa técnica atraente com possibilidade de ser aplicada como método de remediação *ex-situ* (laboratório) e *in-situ* (em campo), em solos de baixa permeabilidade, heterogêneos, saturados e insaturados (YEUNG; ASCE; HSU, 2005; BARBA et al., 2018). A técnica apresenta flexibilidade operacional, na qual permite se integrar a técnicas convencionais e não seleciona um número único de contaminantes, a mesma pode ser utilizada para tratar compostos iônicos inorgânicos, metais

pesados, contaminantes orgânicos e combinação destes (LÓPEZ-VISCAÍNO et al., 2016; DONG et al, 2013).

Conforme Schmidt (2004) e Reddy et al. (1997), a eficiência dos processos eletrocinéticos depende de alguns fatores, entre estes, destacam-se: os tipos e concentração dos contaminantes, estrutura do solo, quantidade de água no solo, características químicas e físicas da água intersticial e condutividade elétrica. A condutividade elétrica da água e do solo são fatores primordiais para a realização do processo eletrocinético, no qual essa condutividade será diretamente proporcional a umidade mínima, que deve estar abaixo da umidade de saturação. A técnica funciona melhor para solos de baixa condutividade, devido a maior taxa de fluxo eletro-osmótico gerado, logo apresenta maior eficiência para solos de reduzida capacidade de troca catiônica e salinidade. Além dos fatores supracitados outros influenciam o processo eletrocinético, como o teor de matéria orgânica, a granulometria, a mineralogia, o potencial zeta, a porosidade e a concentração eletrolítica.

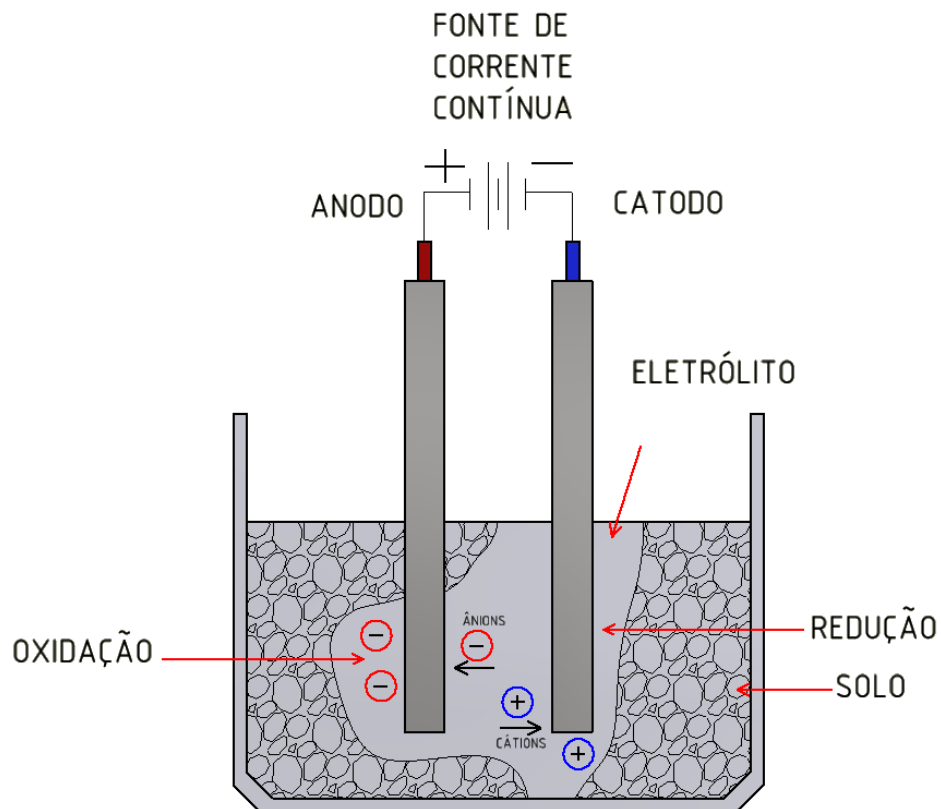
De acordo com Schmidt (2004) e Castro (2010), outros fatores são de fundamental importância para o processo eletrocinético, entre estes, destacam-se as reações de eletrólise, o pH e a dupla camada difusa, já que podem modificar as características físico-químicas do meio e consequentemente a taxa de transporte, acelerando ou retardando o processo.

2.3 Eletrólise

O desenvolvimento das reações de eletrólise no solo úmido está relacionado à aplicação de uma corrente elétrica, portanto, a eletrocinética pode ser denominada de processamento eletroquímico do solo (ACAR et al., 1995).

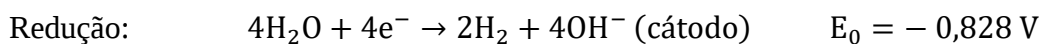
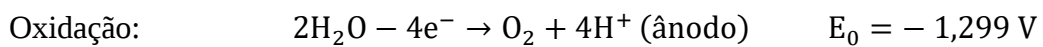
De acordo com Atkins e Jones (2012), a célula eletrolítica é o meio onde ocorre a eletrólise, logo os eletrodos ficam em um mesmo compartimento e só existe um eletrólito por onde passa uma corrente carregada pelos íons presentes, porém é necessário fornecer corrente através de uma fonte elétrica externa. Na eletrólise, a oxidação ocorre no ânodo e a redução no cátodo, na qual os cátions movem-se através do eletrólito em direção ao cátodo e os ânions em direção ao ânodo (Figura 2).

Figura 2 – Representação da eletrólise no solo.



Fonte: Adaptado de Acar e Alshawabkeh (1993)

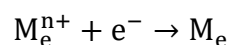
A aplicação de uma corrente elétrica através dos eletrodos inseridos no eletrólito promove a oxidação do ânodo, que produz uma frente ácida e a redução no cátodo, que produz uma frente básica (ACAR; ALSHAWABKEH, 1993), como representado nas equações seguintes:



Onde E_0 é denominado de potencial eletroquímico de eletrodo padrão, que mede a tendência dos reagentes transformarem-se em produtos nas condições padrões de temperatura e pressão.

De acordo com os autores supracitados, as reações secundárias podem existir a depender da concentração das espécies presentes.

Como segue a equação abaixo:

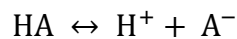


Na qual, M_e representa os metais.

2.4 Potencial hidrogeniônico

A medida do pH avalia a reatividade do solo, pois do ponto de vista químico, ácidos são substâncias, que em solução, liberam prótons, ou hidrogênio (H^+), em contraste as bases recebem prótons (VAN RAIJ, 2011).

A dissociação de um ácido em solução pode ser representada pela equação abaixo:

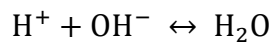


O ácido HA dissocia-se no cátion H^+ e no ânion A^- .

A equação abaixo define o pH para baixas concentrações de hidrogênio:

$$pH = -\log(H^+) = \log \frac{1}{(H^+)}$$

A dissociação da água é dada pela equação abaixo:



Resulta que:

$$pH + pOH = 14$$

De acordo com Van Raij (2011) a escala de pH varia de 0 a 14,0, na qual valores abaixo de 7,0 indicam acidez e acima de 7,0 indicam alcalinidade, ao passo que a neutralidade corresponde ao pH igual a 7,0.

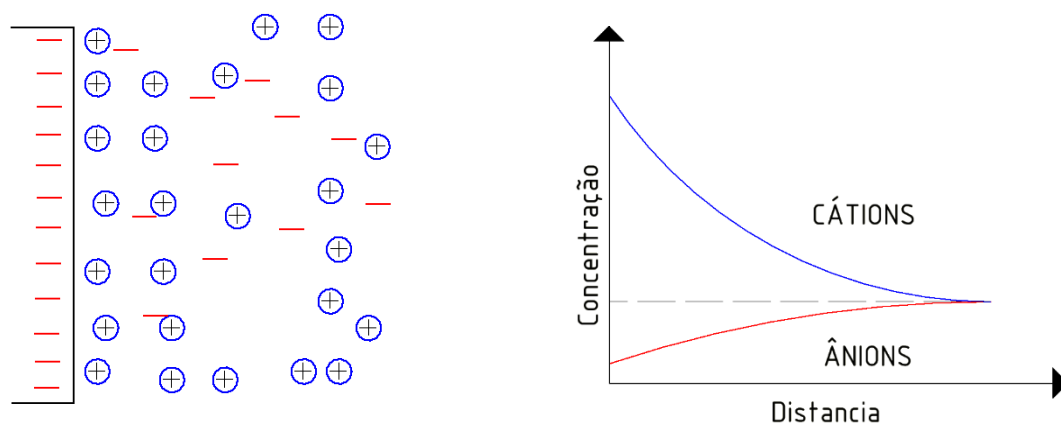
As reações de eletrólise na aplicação eletrocinética diminuem o pH para um valor próximo de 2,0 no ânodo e aumentam o pH em torno de 12,0 no cátodo, dependendo da corrente aplicada (ACAR; ALSHAWABKEH, 1993; KIM et al., 2012).

2.5 Dupla camada difusa

Conforme Van Raij (2011), o equilíbrio das partículas do solo com os íons, condiciona a existência de uma dupla camada elétrica, a primeira de carga negativa na superfície das partículas do solo e a segunda de carga positiva nos cátions trocáveis das soluções adjacentes.

As cargas negativas são estáticas, enquanto que as cargas positivas, têm liberdade para movimentar, o que lhes caracterizam como difuso, já que podem mover-se para distante da superfície atraídos por um gradiente de concentração. O eixo da abcissa na figura 3 representa a distância que o íon se encontra da superfície do solo, enquanto que a ordenada representa a concentração do íon na solução do soluto, logo, a concentração do cátion é maior próximo da superfície devido a atração pelas cargas negativas. Os cátions estão submetidos a duas forças opostas, a primeira força é a atração eletrostática, pela carga negativa da superfície, e a segunda força é promovida pela difusão, na qual os íons tendem a deslocar-se de regiões de maior concentração para regiões de menor concentração. A concentração de ânions próximo da superfície tende a ser baixa devido a repulsão elétrica provocado pelas cargas de mesmo sinal, adicionalmente existe o gradiente de concentração que tende a difundir o ânion para a superfície, logo, essa região facilita a remoção de ânions.

Figura 3 – Dupla camada elétrica difusa.



Fonte: Adaptado de Mitchell e Soga (2005)

Algumas hipóteses são consideradas para o efeito da dupla camada difusa em solos (MITCHELL; SOGA, 2005; YEUNG; MITCHELL, 1993).

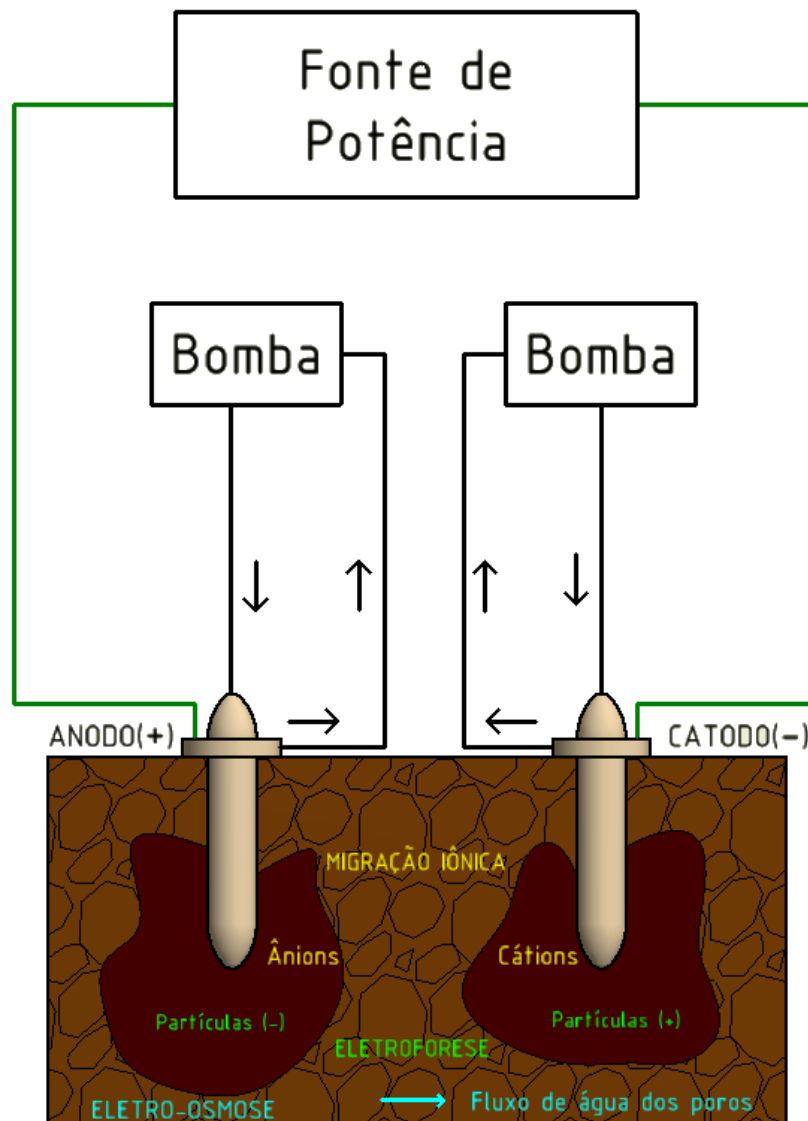
Tais como:

- Íons da camada dupla são cargas pontuais, e não interagem entre si;
- A carga na superfície da partícula é uniformemente distribuída;
- A superfície da partícula tem dimensões maiores do que a espessura da dupla camada difusa (condição unidimensional);
- A permissividade próxima da superfície independe da posição;

2.6 Fenômenos eletrocinéticos

Os processos eletrocinéticos são formados por alguns fenômenos, entre estes, destacam-se: a eletro-osmose, o potencial de corrente, a eletroforese e a migração iônica (GALE; LI; ACAR, 1994). Segundo Schmidt (2004), esses fenômenos são os principais mecanismos da eletrocinética, pois promovem o deslocamento dos contaminantes que se acumulam nos eletrodos para posterior tratamento na superfície. A figura 4 representa a remediação eletrocinética de uma área contaminada devido a aplicação de uma corrente direta de baixa intensidade por meio de eletrodos que são inseridos no solo úmido.

Figura 4– Configuração da remediação eletrocinética do solo.

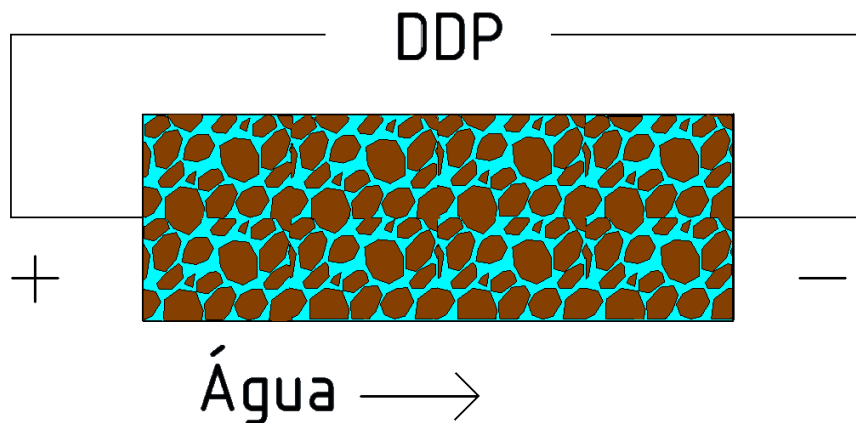


Fonte: Adaptado de Acar e Alshawabkeh (1993).

2.6.1 Eletro-osmose

Conforme Gale; Li e Acar (1994), o fenômeno do fluxo eletro-osmótico foi primeiramente observado pelo cientista russo Reuss em 1808, o qual tem sido utilizado em aplicações de estabilização de solos a mais de 50 anos. A eletro-osmose é definida como o movimento da água intersticial devido a aplicação de um potencial elétrico. De acordo com Silveira (2009), esse potencial elétrico sobre uma massa de solo úmida gera um sistema de forças elétricas que agem sobre as cargas negativas (ânions) das partículas de solo que se movem em direção ao ânodo e sobre as cargas positivas (cátions) que deslocam os fluidos intersticiais em direção ao cátodo (Figura 5). Como o movimento das partículas de solo é restringido, há somente o deslocamento da água intersticial devido a ação dos íons. Na maioria dos solos a eletro-osmose promove o transporte da frente ácida e retarda o transporte da frente básica (PUPPALA et al., 1997).

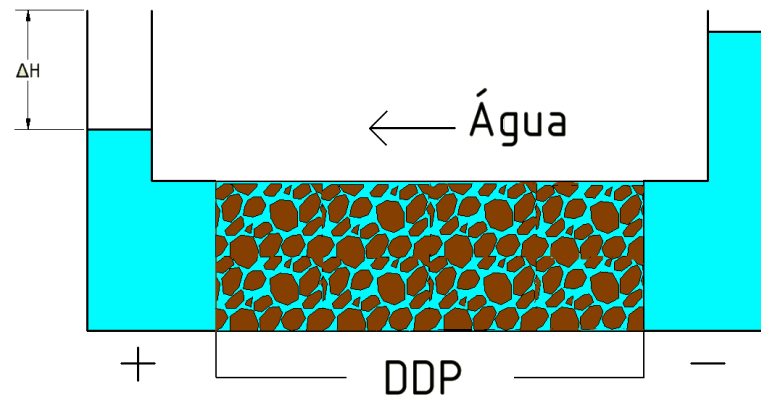
Figura 5 – Eletro-osmose.



Fonte: Adaptado de Gale, Li e Acar (1994).

2.6.2 Potencial de corrente

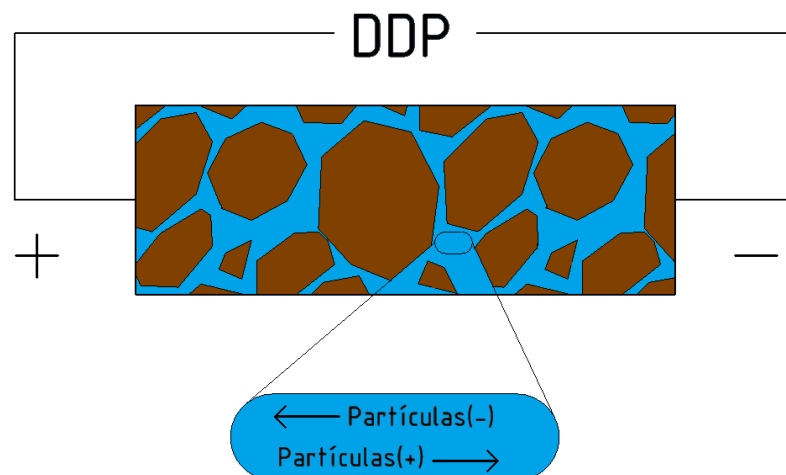
De acordo com Gale; Li e Acar (1994), a existência de um gradiente hidráulico no solo promove um fluxo de fluido que desloca as cargas da dupla camada na direção do fluxo. Portanto, o gradiente hidráulico induz um potencial de corrente (Figura 6). Existe uma proporcionalidade entre a diferença de potencial e a razão do fluxo hidráulico das extremidades da massa de solo (SILVEIRA, 2009).

Figura 6 – Potencial de corrente.

Fonte: Adaptado de Gale, Li e Acar (1994).

2.6.3 Eletroforese

Segundo Gale; Li e Acar (1994), a eletroforese é definida como o movimento das partículas carregadas devido à aplicação de um potencial elétrico, na qual as partículas negativas deslocam-se para o ânodo e as positivas para o cátodo devido à atração elétrica dos eletrodos (Figura 7).

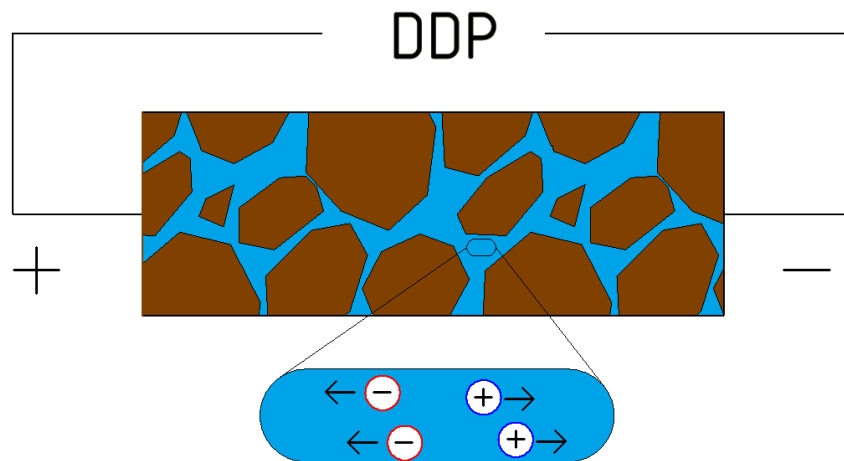
Figura 7 – Eletroforese.

Fonte: Adaptado de Gale, Li e Acar (1994).

2.6.4 Migração iônica

De acordo com Silveira (2009), a migração iônica corresponde ao transporte dos íons que se encontram no fluido intersticial devido a aplicação de um potencial elétrico, portanto, esse movimento é responsável pela passagem de corrente elétrica e ocorre em direção ao eletrodo de polaridade contrária (Figura 8). O fluxo eletro-osmótico poderá acelerar ou retardar a migração iônica, portanto esse e alguns outros fatores influenciam no transporte iônico como: o tipo de solo, a umidade, tipos de íons, composição química do fluido do poro e as condições de contorno.

Figura 8 – Migração iônica.

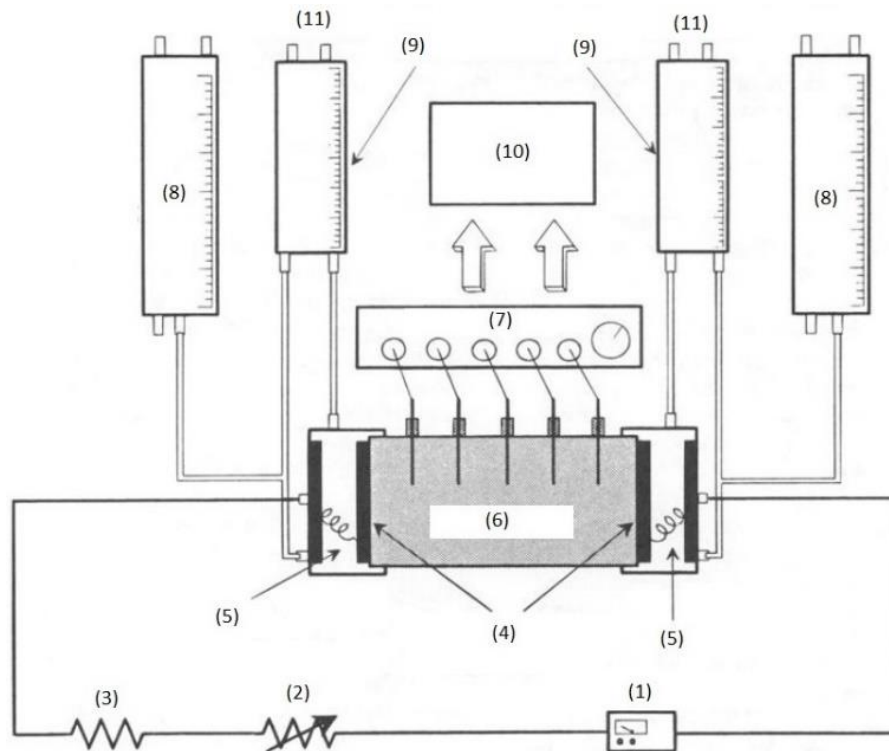


Fonte: Adaptado de Gale, Li e Acar (1994).

2.7 Reatores eletrocinéticos

De acordo com Yeung et al. (1997), a eletrocinética tem muitas aplicações na engenharia geotécnica e geoambiental, porém as propriedades eletrocinéticas do solo não são avaliadas rotineiramente em campo, sendo necessário dispor de aparelhos como ferramenta de pesquisa em laboratório para avaliar diferentes parâmetros com diferentes propósitos. Devido a inexistência de um aparelho padrão para investigar os efeitos de vários parâmetros sobre a eficiência da remediação eletrocinética, então Yeung et al. (1997), propuseram o projeto, a fabricação e montagem de um aparelho (Figura 9), com objetivo de fornecer um padrão, no qual os pesquisadores possam se concentrar para melhorar a tecnologia existente.

Figura 9 – Esquema do aparato para remediação eletrocinética.



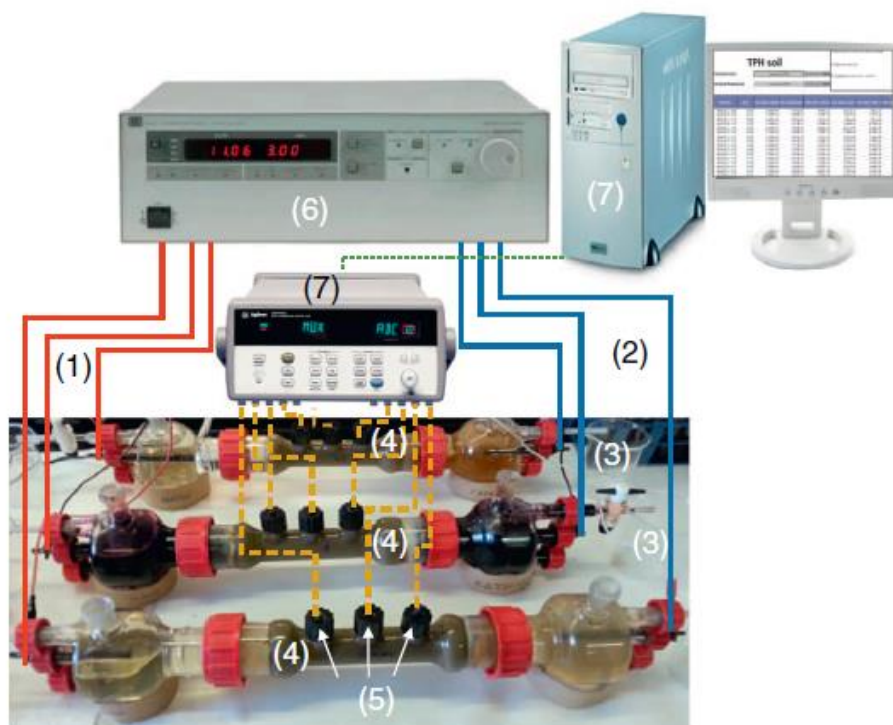
Fonte: Adaptado de Yeung et al. (1997).

Onde:

- (1) Fonte de potência;
- (2) Resistor variável;
- (3) Resistor fixo;
- (4) Eletrodos de grafite;
- (5) Fluido do reservatório;
- (6) Amostra de solo;
- (7) Painel elétrico;
- (8) Dispositivo para medida do volume do fluido;
- (9) Dispositivo para medida do volume de gás;
- (10) Sistema de aquisição de dados;
- (11) Saída de gás;

O reator eletrocinético proposto por Sandu et al. (2017), conforme representado na figura 10, apresenta alguns elementos do reator eletrocinético proposto por Yeung et al. (1997) vinte anos antes, como por exemplo: uso de eletrodos de grafite, a aplicação de um sistema de aquisição de dados para monitoramento dos parâmetros elétricos em pontos específicos da amostra no decorrer do experimento e a utilização de reservatório para armazenamento do fluxo eletro-osmótico.

Figura 10 – Reator eletrocinético para experimentos laboratoriais.



Fonte: Adaptado de Sandu et al. (2017).

Onde:

- (1) Ânodo;
- (2) Cátodo;
- (3) Reservatório do fluxo eletro-osmótico;
- (4) Amostra de solo;
- (5) Eletrodos auxiliares;
- (6) Fonte de potência;
- (7) Sistema de aquisição de dados;

2.8 Consumo energético

Segundo Acar et al. (1994), o consumo de energia por unidade de volume em experimentos unidimensionais é dado por:

$$P_u = \frac{I \cdot V}{A \cdot L}$$

Onde:

P_u - Consumo de energia (W/m³);

I - Intensidade de corrente (A);

V - Potencial elétrico (V);

A - Área da seção transversal ao fluxo (m²);

L - Comprimento da amostra (m).

Este fator é bastante importante com vistas à que se tenha uma boa viabilidade de aplicação desta técnica, sendo um dos motivadores de termos realizados nossos experimentos em condições reais.

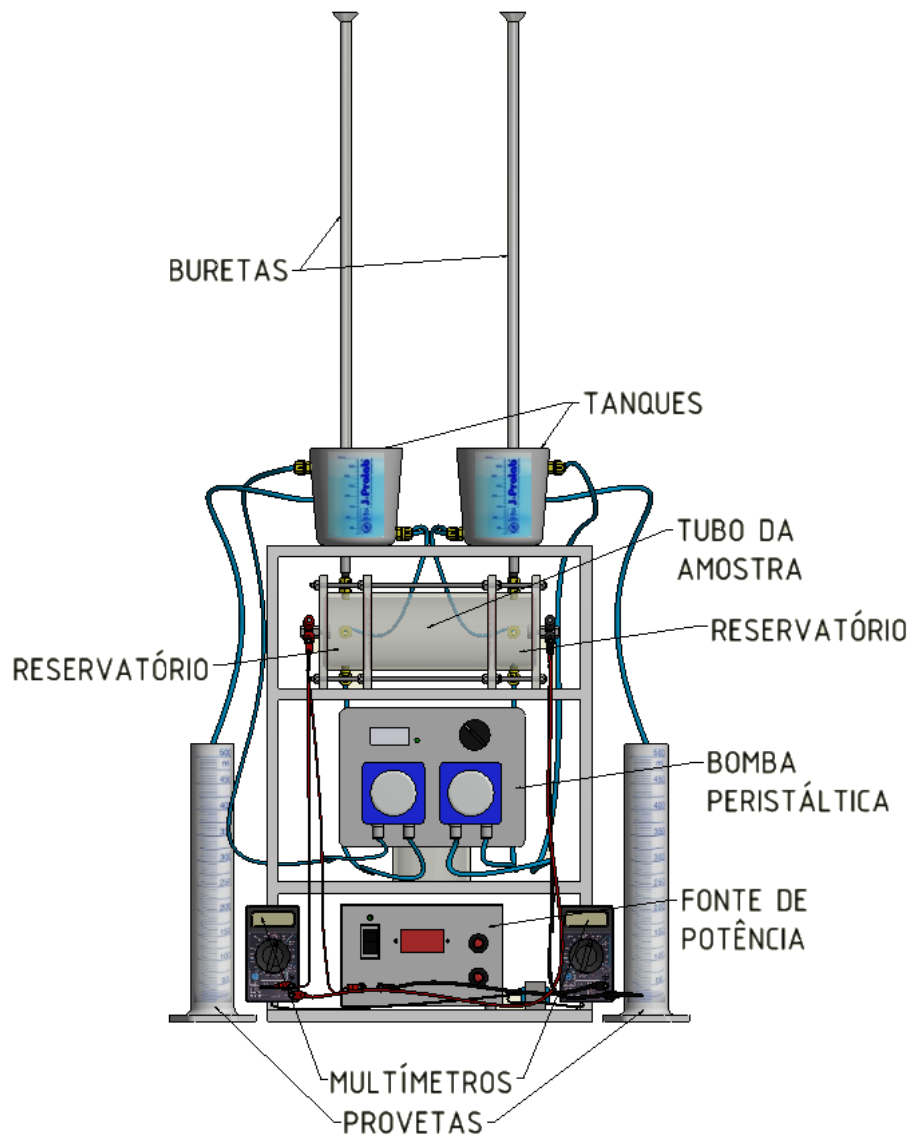
3 MATERIAIS E MÉTODOS

São apresentadas as especificações técnicas do reator eletrocinético, o delineamento dos experimentos, a descrição do solo, os procedimentos que antecederam os ensaios e as caracterizações das amostras de líquidos e solos.

3.1 Especificações técnicas do reator eletrocinético

O reator eletrocinético (Figura 11) foi desenvolvido a partir da proposta de Yeung et al. (1997).

Figura 11 – Representação reator eletrocinético.



Fonte: Autoria própria.

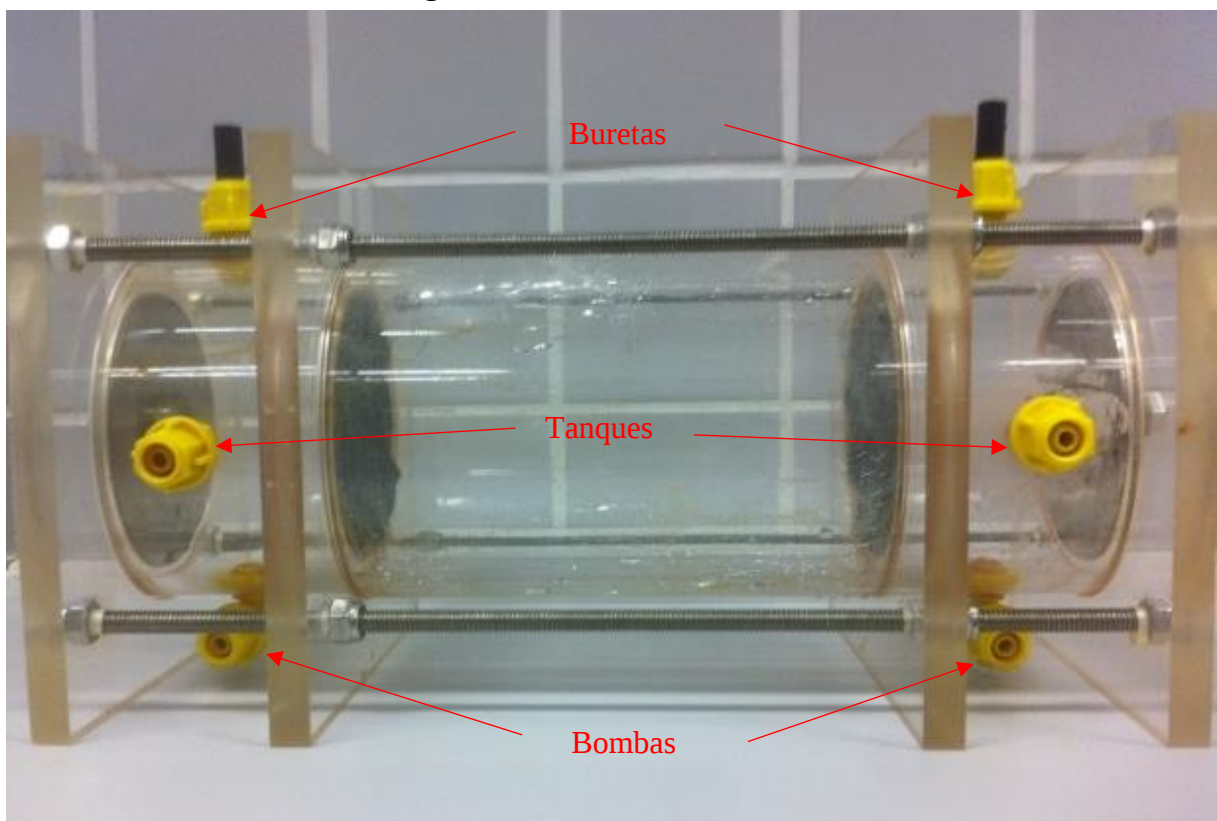
Uma estante de madeira foi fabricada para alocar os componentes do reator de forma que facilite a montagem e desmontagem.

Na parte inferior da estante localizam-se a fonte de tensão e os multímetros, cuja fonte aplica uma diferença de potencial sobre a célula através das garras do tipo jacaré, que estão conectados aos eletrodos, e dois multímetros monitoram o sistema, no qual um monitora a amperagem e o outro a voltagem durante todo o experimento.

Na parte intermediária da estante localizam-se as bombas peristálticas, estas realizam o bombeamento do fluido de trabalho entre os reservatórios da célula e os tanques superiores.

No compartimento acima da bomba peristáltica, localiza-se a célula eletrocinética (Figura 12), cujos reservatórios apresentam conexões em 90°, onde estão conectadas as mangueiras advindas da bomba peristáltica, conexões retas onde são conectadas mangueiras advindas dos tanques superiores e das buretas para a saída dos gases.

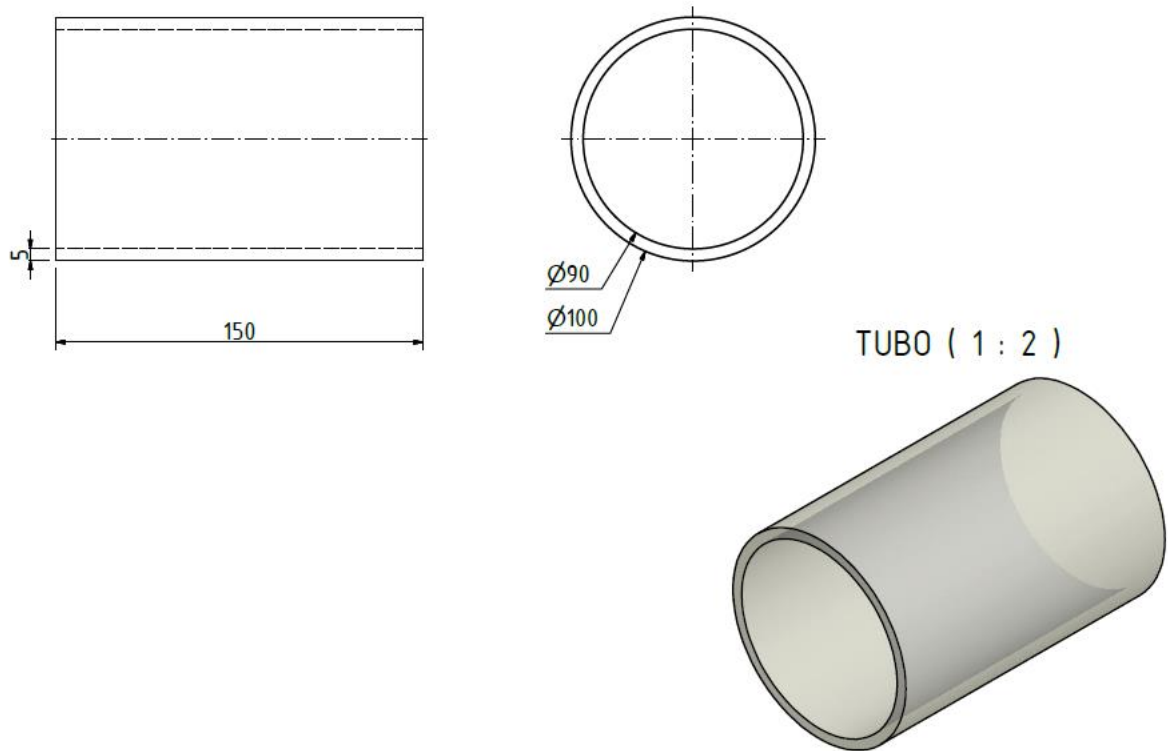
Figura 12 – Célula eletrocinética.



Fonte: Autoria própria.

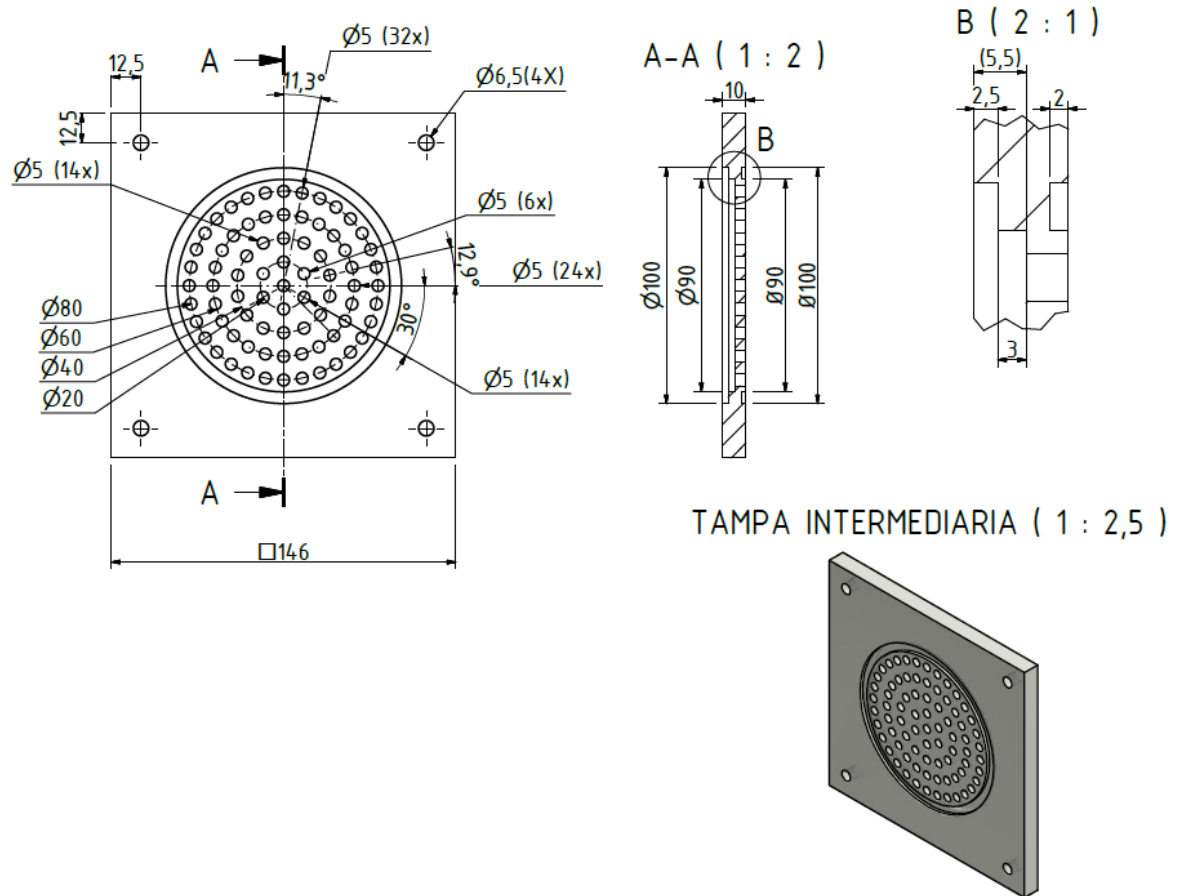
A amostra de solo será depositada em um tubo de acrílico com diâmetro interno de 90 mm, espessura de parede de 5 mm e comprimento de 150 mm (Figura 13).

Figura 13 –Tubo da amostra.



Fonte: Autoria própria.

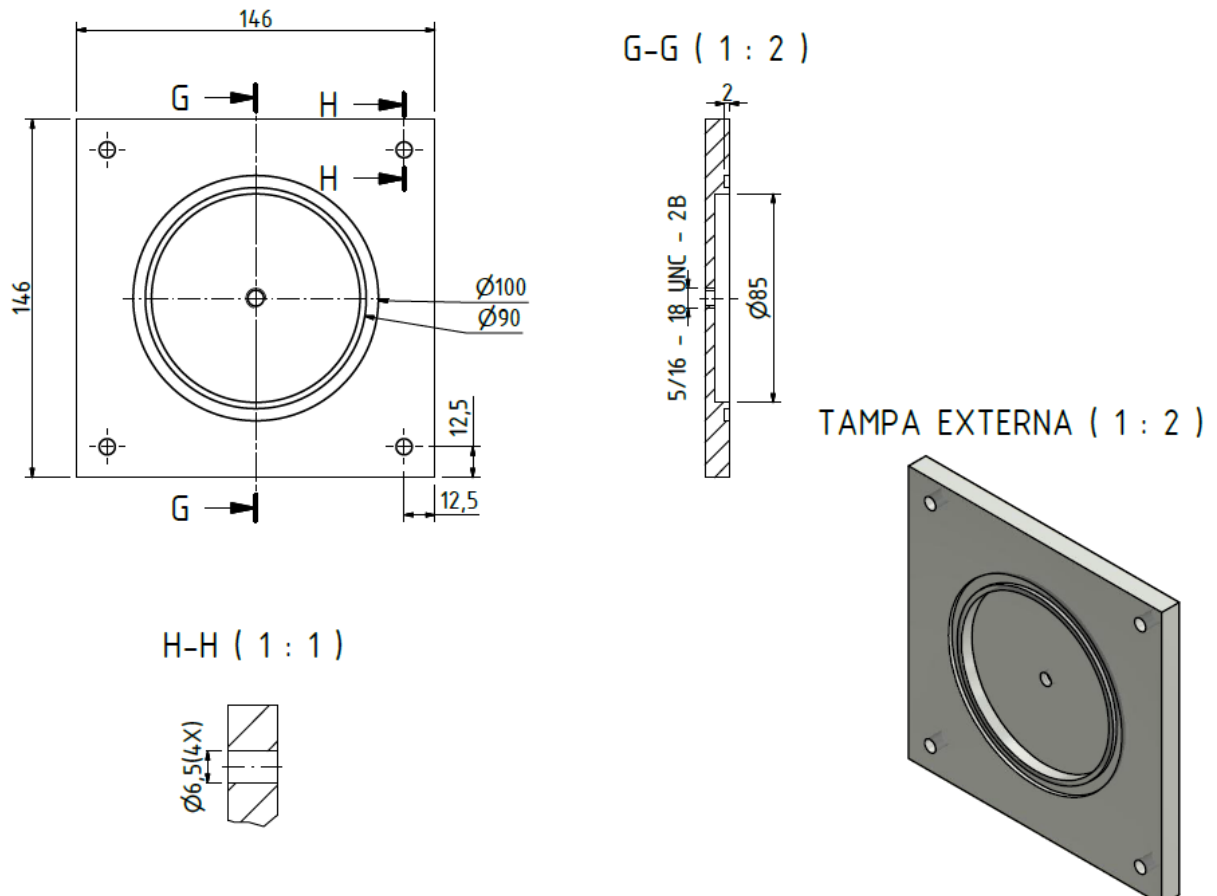
O tubo que contém a amostra de solo será comprimido por duas tampas intermediárias de acrílico (Figura 14), porém no interior da placa existe uma região, que contém vários furos que permitem a passagem de fluidos do processo. O diâmetro de 5 mm dos furos internos da placa foi proposto por Schmidt (2004), que evidenciou em seu trabalho que furos de diâmetros menores não são adequados para a célula eletrocinética, por obstruir a passagem do fluxo. Nas tampas intermediárias são inseridas as borrachas de vedação e o elemento filtrante.

Figura 14 – Tampa intermediária.

Fonte: Autoria própria.

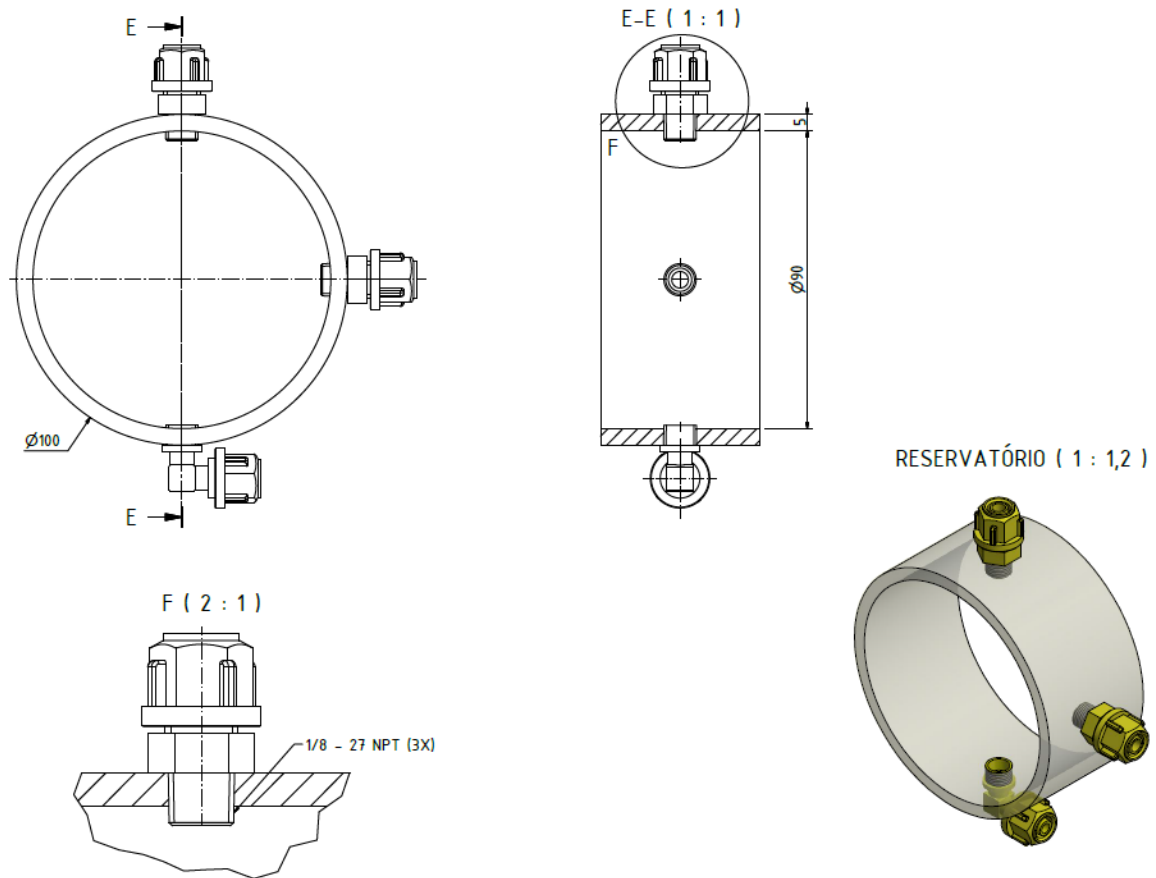
A tampa externa (Figura 15) tem um rebaixo circular no centro, onde é fixado o eletrodo.

Figura 15 – Tampa externa.



Fonte: Autoria própria.

Entre a tampa intermediária e a tampa externa está o reservatório da célula (Figura 16). Esses reservatórios apresentam o mesmo diâmetro e espessura do tubo da amostra. Cada reservatório apresenta três furos com roscas que estão defasados em 90° , que recebem os conectores das mangueiras da bomba, do tanque e da bureta.

Figura 16 – Reservatório.

Fonte: Autoria própria.

As buretas foram conectadas nos reservatórios para permitir a evasão dos gases que são gerados durante o processo. No lado do cátodo foi conectado uma mangueira de silicone acima da bureta, em função da produção dos gases ser maior desse lado (Figura 17). Como esses gases são desconhecidos, estes foram encaminhados para uma área aberta externa ao laboratório como medida de segurança.

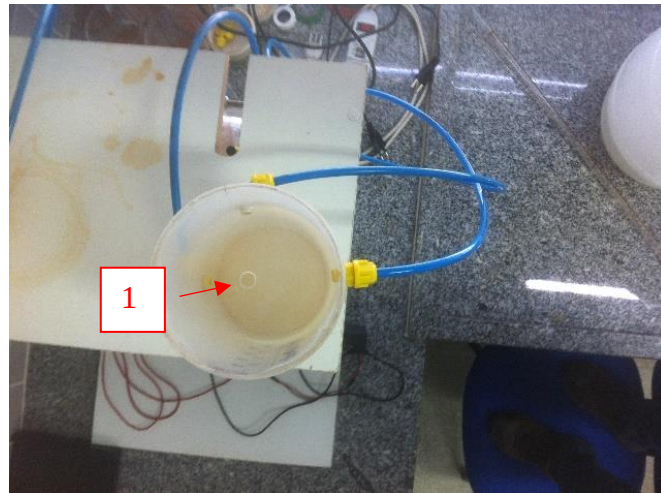
Figura 17 – Aspecto visual do reator eletrocinético.



Fonte: Autoria própria.

Na região superior da estante estão dispostos dois tanques com capacidade de armazenamento de um litro cada. Esses tanques apresentam quatro furos cada. Na vista superior do tanque (Figura 18), o furo 1 é utilizado para abastecimento inicial do tanque com fluido do processo.

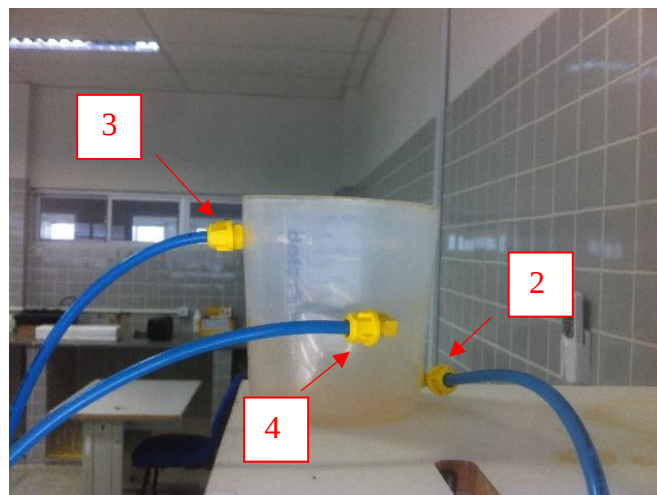
Figura 18 – Vista superior do tanque.



Fonte: Autoria própria.

Na vista lateral do tanque (Figura 19), o furo 2 abastece a célula eletrocinética por gravidade, o furo 3 recebe o líquido proveniente da célula eletrocinética por meio da bomba peristáltica e o furo 4 é o responsável por manter os tanques no mesmo nível, no qual o sobressalente é proveniente do fluxo eletro-osmótico positivo (direção do fluxo do ânodo para cátodo) ou do fluxo eletro-osmótico negativo (direção do fluxo do cátodo para o ânodo), onde são armazenadas nas provetas laterais.

Figura 19 – Vista lateral do tanque.

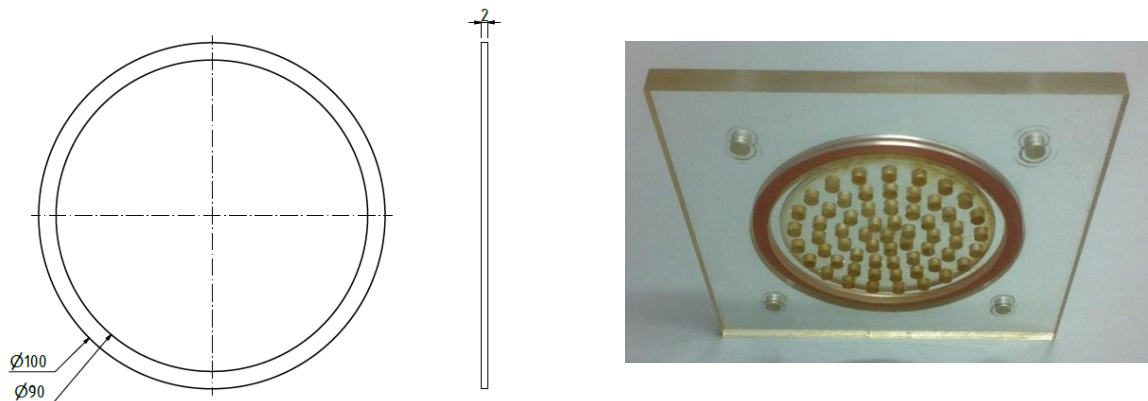


Fonte: Autoria própria.

No projeto do reator eletrocinético, tem-se algumas inovações, entre estas, destacam-se: a utilização de anéis de poliuretano para vedação dos elementos de acrílico da célula (Figura 20). Essa solução é simples e eficiente quando comparado ao *o´ring*, logo, esses anéis foram

fabricados com espessura de parede de 2 mm, diâmetro interno de 90 mm e diâmetro externo de 100 mm.

Figura 20 – Elemento de vedação.



Fonte: Autoria própria.

A utilização da manta bidim na célula eletrocinética foi outro diferencial, pois foi utilizada para sustentar da amostra de solo no tubo e permitir a passagem dos fluidos do processo. Essa manta foi cortada no formato circular e fixada na placa intermediária (Figura 21).

Figura 21 – Manta bidim.

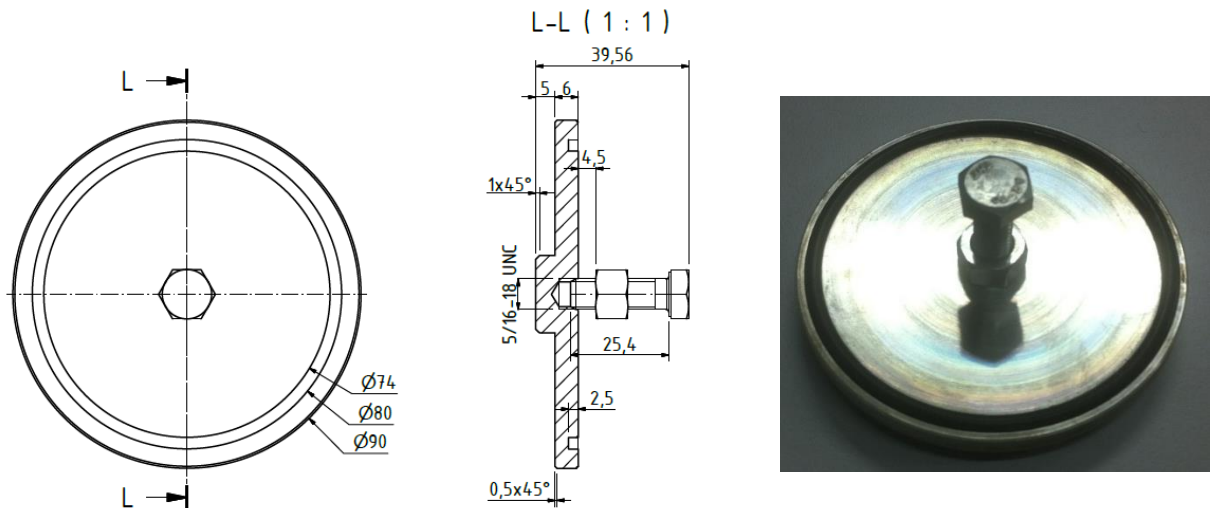


Fonte: Autoria própria.

O aço inoxidável SAE 304 foi material escolhido para o eletrodo. Esse foi projetado e fabricados com alguns detalhes construtivos para evitar vazamentos, entre estes destacam-se: a presença de um furo não passante para o aperto do parafuso com uma porca (Figura 22).

Os eletrodos apresentam uma cavidade para o *o´ring* na face do eletrodo que fica de encontro a placa de acrílico.

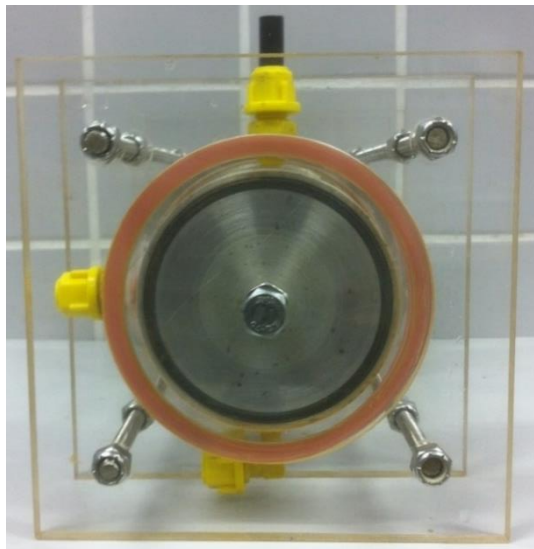
Figura 22 – Eletrodo.



Fonte: Autoria própria.

Uma solução para aumentar a eficiência da vedação foi desenvolver um ressalto na face interna do eletrodo, que permite aumentar o comprimento da rosca interna, onde será enroscado o parafuso. Através de uma porca no parafuso é controlado o aperto que será submetido ao *o´ring* na parede de acrílico na tampa externa (Figura 23).

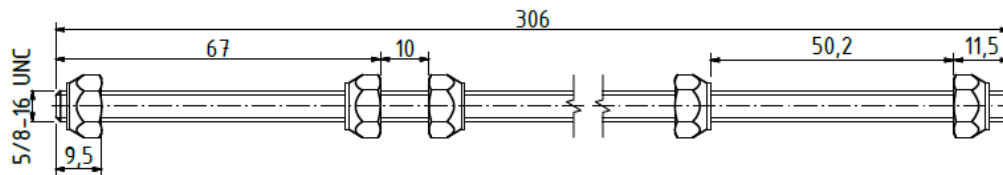
Figura 23 – Eletrodo fixado na tampa externa.



Fonte: Autoria própria.

A barra rosca de aço inoxidável 304 juntamente com as porcas promovem a sustentação estrutural e fixação dos componentes da célula eletrocinética (Figura 24). Foram utilizados quatro barras e vinte porcas na montagem da célula.

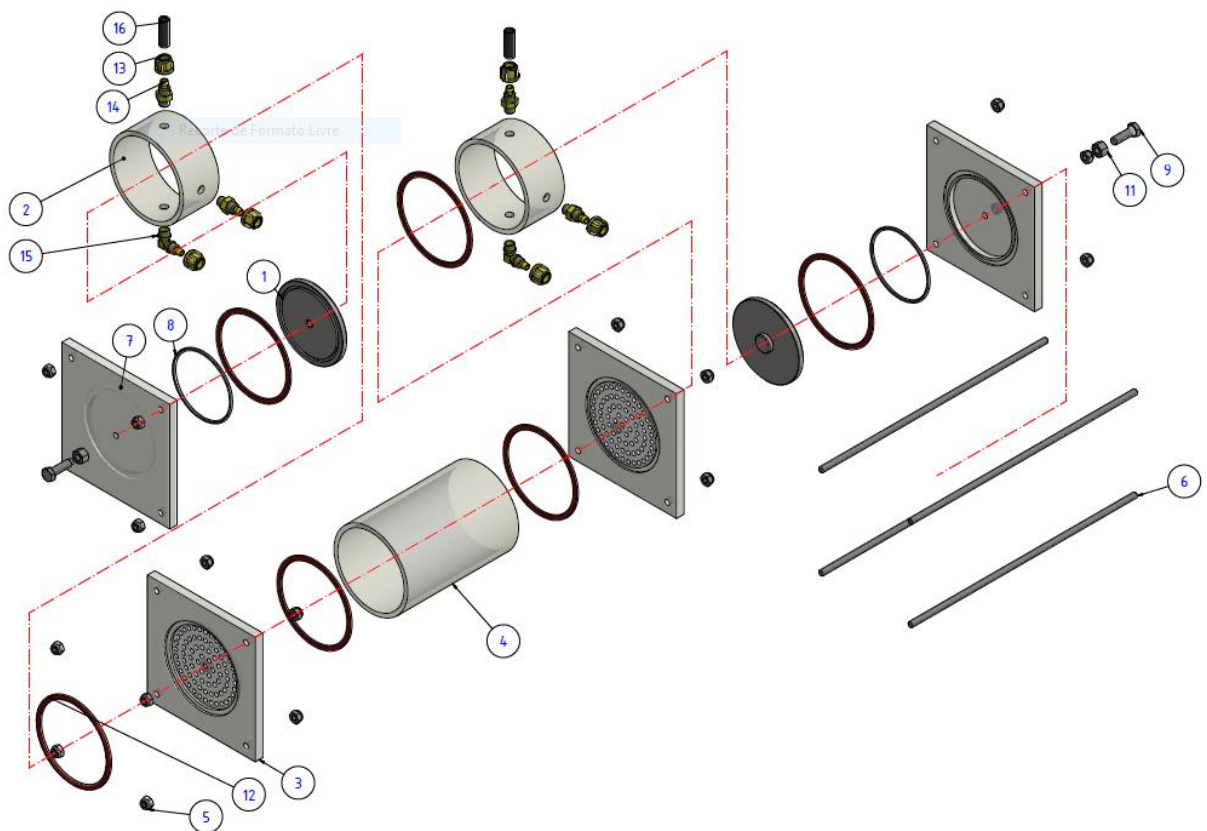
Figura 24 – Barra rosca.



Fonte: Autoria própria.

Na vista explodida (Figura 25) é possível visualizar a sequência de montagem dos componentes da célula eletrocinética.

Figura 25 – Vista explodida da célula eletrocinética.



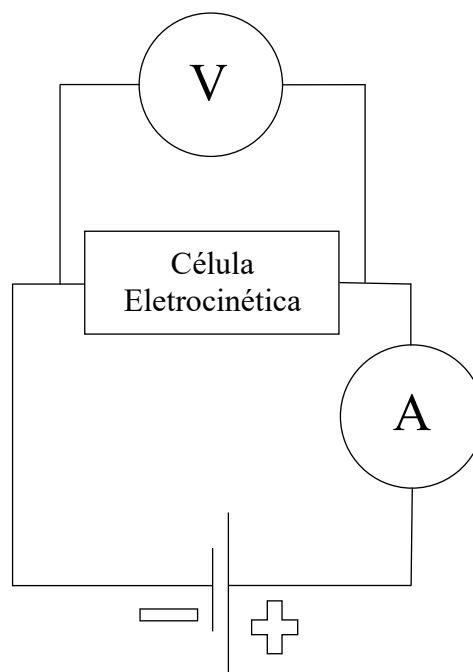
Fonte: Autoria própria.

Onde:

- (1) Eletrodo de inox 304;
- (2) Reservatório;
- (3) Placa intermediária;
- (4) Tubo da amostra;
- (5) Porca de inox do tirante;
- (6) Tirante de inox;
- (7) Placa da extremidade;
- (8) *O'ring* do eletrodo;
- (9) Parafuso do eletrodo;
- (11) Porca do parafuso do eletrodo;
- (12) Poliuretano de vedação;

Para a realização do processo eletrocinético, o voltímetro foi conectado em paralelo com a célula e o amperímetro foi conectado em série (Figura 26)

Figura 26 – Esquema elétrico do aparato.



Fonte: Autoria própria.

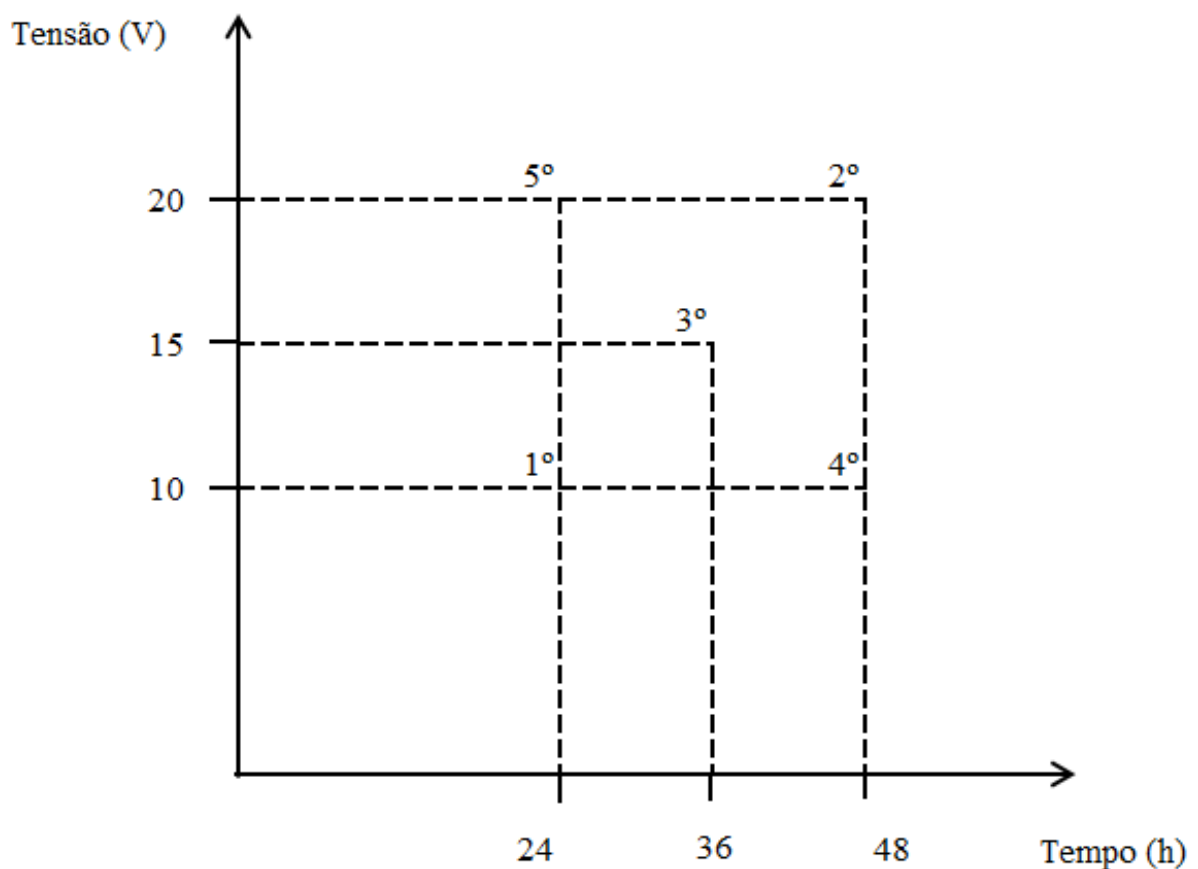
Para cada experimento foi realizado o registro da tensão e da corrente a cada hora.

3.2 Ensaios eletrocinéticos

Os experimentos eletrocinéticos foram realizados no Laboratório de Qualidade Ambiental da UFERSA. Em virtude da baixa disponibilidade de amostras de solo, elaboramos o planejamento fatorial de dois níveis ponto central, representado na matriz no Gráfico 1, para a realização da bateria de tratamentos, realizando-se os experimentos com parâmetros (tensão e tempo) distintos para atestar a capacidade de funcionamento do reator em diferentes condições e analisar o comportamento dos parâmetros físicos do processo.

O primeiro experimento foi realizado com tensão de 10 V e duração de 24 horas. O segundo foi realizado com tensão de 20 V e duração de 48 horas. O terceiro foi aplicado uma condição intermediária com tensão de 15 V e duração de 36 horas. O quarto foi realizado com tensão de 10 V e duração de 48 horas. E o quinto foi realizado com tensão de 20 V e duração de 24 horas.

Gráfico 1 – Delineamento experimental.



Fonte: Autoria própria.

Antes de realizar os ensaios eletrocinéticos, alguns procedimentos foram realizados no solo. O primeiro destes, foi destorroar, em seguida, o solo foi peneirado em uma tela com aberturas de 2 mm. A massa de 1300 g de solo foi a quantidade necessária para preencher completamente o tubo da amostra. No final de cada experimento o solo é retirado do tubo e armazenado em uma bandeja, na qual será posto para secar.

O solo utilizado é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico Argissólico e foi obtido na fazenda experimental Rafael Fernandes na cidade de Mossoró no estado do Rio Grande do Norte. As características físico-químicas das amostras de solo estão descritas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Características físicas do solo.

Característica	0 – 20 cm
Areia Grossa (Kg/Kg)	0,64
Areia Fina (Kg/Kg)	0,26
Areia Total (Kg/Kg)	0,90
Silte (Kg/Kg)	0,03
Argila (Kg/Kg)	0,07
Densidade (Kg/dm ³)	2,78
Porosidade (%)	35,97
Massa Específica (g/cm ³)	1,78
Relação Silte/Argila	0,44
Classe Textural	Areia

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Características químicas do solo

Prof	pH	CE	MO	P	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	(H+Al)	SB	t	CTC	V	PST
(cm)	(água)	dS m ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----							cmol _c dm ⁻³				--- % ---	
0 - 20	6,1	0,41	3,31	1,9	26,9	4,7	1,1	0,7	0,0	1,49	1,89	1,89	3,37	56	1

Fonte: Autoria própria.

A água utilizada nos experimentos foi obtida do reservatório que abastece o Laboratório de Engenharia de Pesca da UFERSA. Esse líquido foi selecionado por ser de maior salinidade que a água destilada, a qual facilitará o desenvolvimento dos processos eletrocinéticos, de acordo com Schmidt (2004). Essa água é adicionada nos tanques para saturar a amostra de solo.

Após a amostra estar saturada e o sistema elétrico ligado, pode-se dar início ao ensaio. Finalizado o ensaio, as amostras de líquidos dos tanques do ânodo e do cátodo foram armazenadas em provetas, para serem submetidas às análises.

As caracterizações das amostras de solos e líquidos foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta – LASAP da UFERSA. As análises do pH e condutividades das amostras foram realizadas através do pHômetro e condutivímetro, respectivamente. As concentrações de ferro, níquel, e cromo das amostras foram obtidas com o espectrofotômetro de absorção atômica de chama.

4 RESULTADOS

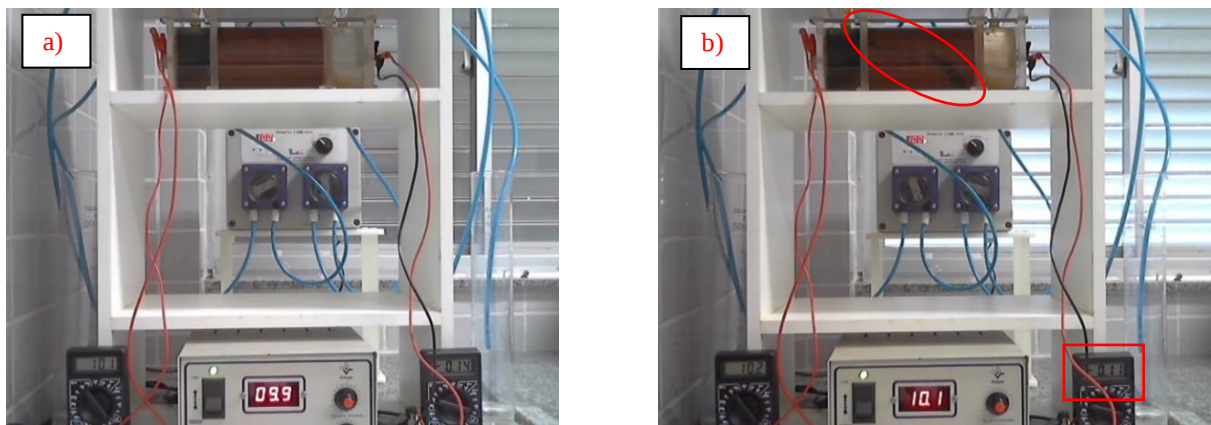
Os resultados dos ensaios eletrocinéticos foram obtidos pelo monitoramento da tensão, corrente, condutividade, pH e concentrações dos elementos químicos (ferro, níquel e cromo) das amostras de solo (não tratado e tratado) e líquidos dos reservatórios (cátodo e ânodo).

4.1 Corrente e tensão

Os experimentos (10V-48h), (15V-36h), (20V-48h), e (20V-24h) apresentaram fraturas nas amostras de solo, que foram visualizadas quando a corrente decrescia. Segundo Silveira (2009), as causas para o surgimento das fraturas são decorrentes do carreamento de partículas sólidas provocado pela eletro-osmose e devido a formação de gases no interior da amostra.

O experimento (10V-48h) ultrapassou 24 horas sem apresentar fraturas na amostra de solo. Após decorridas 39 horas do experimento (10V-48h), era visível a fratura horizontal na amostra de solo (Figura 27). A corrente diminuiu para 110 mA.

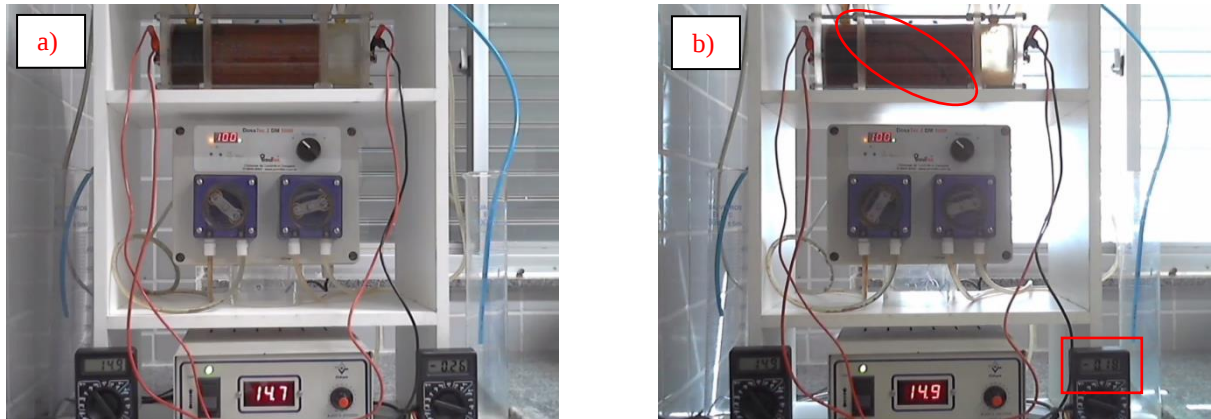
Figura 27 – Aspecto visual (a) 10V-48h; (b) 10V-48h, observando o surgimento da trinca após 39h.



Fonte: Autoria própria.

Para o experimento (15V-36h) só foi possível visualizar uma fratura transversal no comprimento da amostra, após 23 horas de ensaio (Figura 28). A corrente diminuiu para 180 mA.

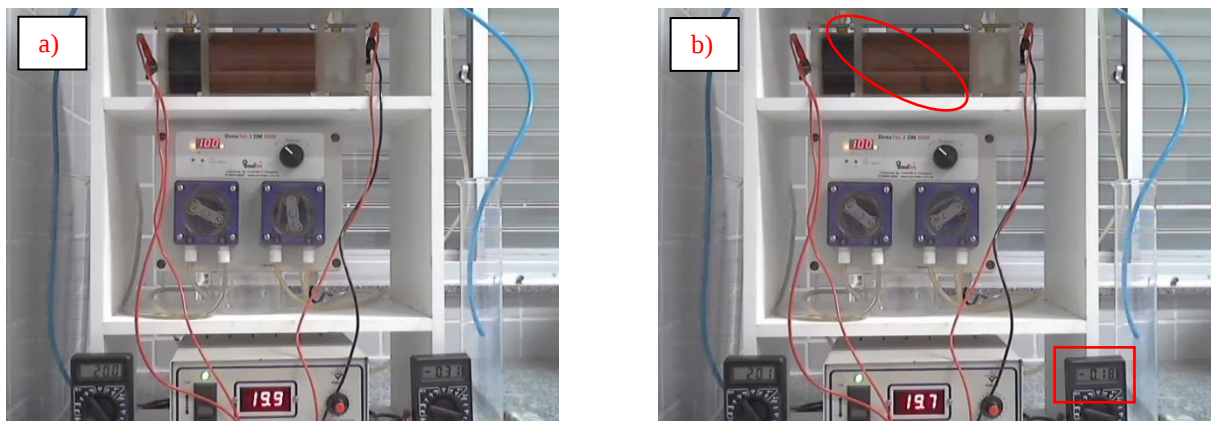
Figura 28 – Aspecto visual (a) 15V-36h; (b) 15V-36, observando o surgimento da trinca após 23h.



Fonte: Autoria própria.

Para o experimento (20V-48h), após decorridos 16 horas de experimento foi possível visualizar uma fratura transversal no comprimento da amostra (Figura 29). A corrente diminuiu para 180 mA.

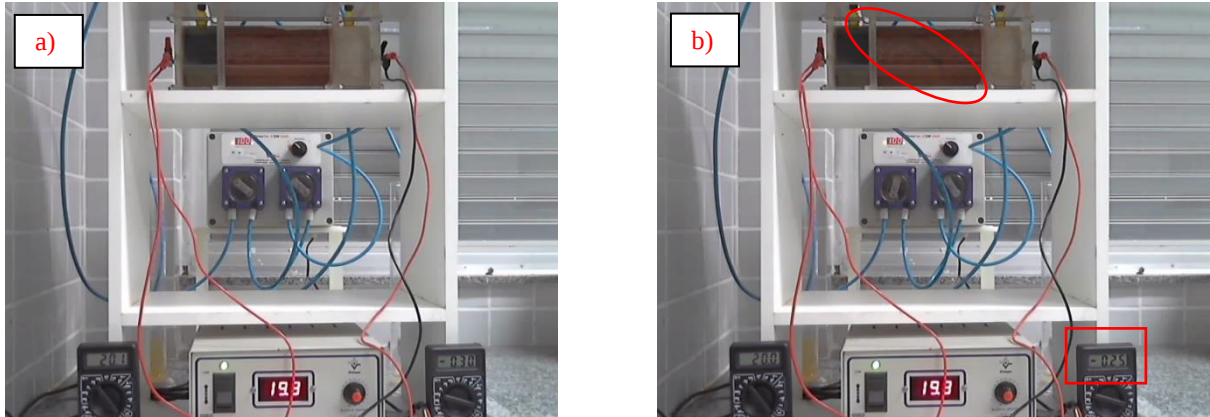
Figura 29 – Aspecto visual (a) 20V-48h; (b) 20V-48, observando o surgimento da trinca após 16h.



Fonte: Autoria própria.

No experimento (20V-24h), as fraturas foram visualizadas após decorridos 16 horas do início do experimento (Figura 30). A corrente diminuiu para 250 mA.

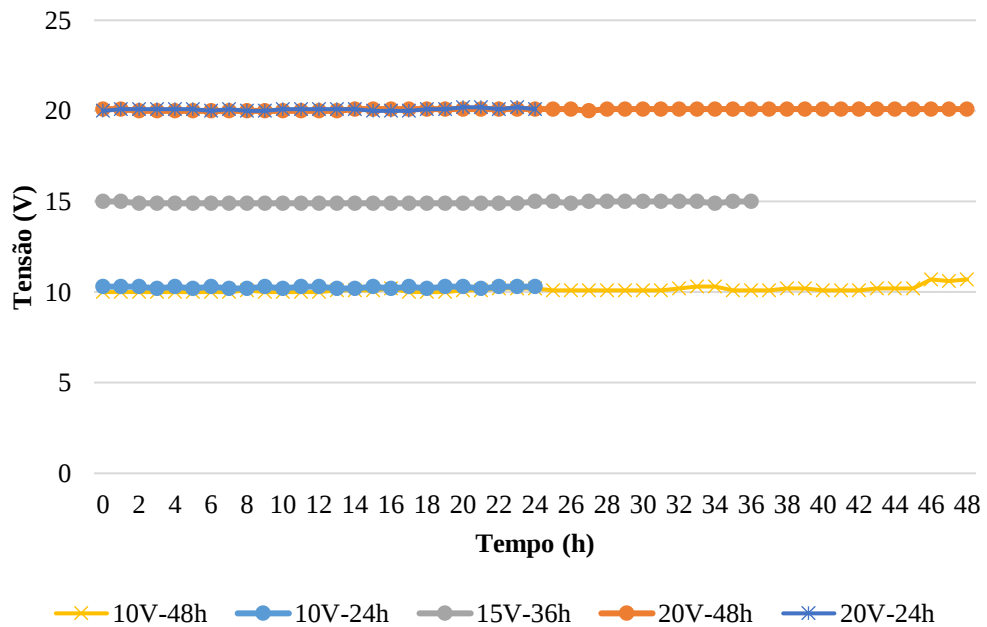
Figura 30 – Aspecto visual (a) 20V-24h; (b) 20V-24, observando o surgimento da trinca após 16h.



Fonte: Autoria própria.

As voltagens em função do tempo apresentaram um comportamento uniforme para todos os cinco experimentos (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Tensão em função do tempo.

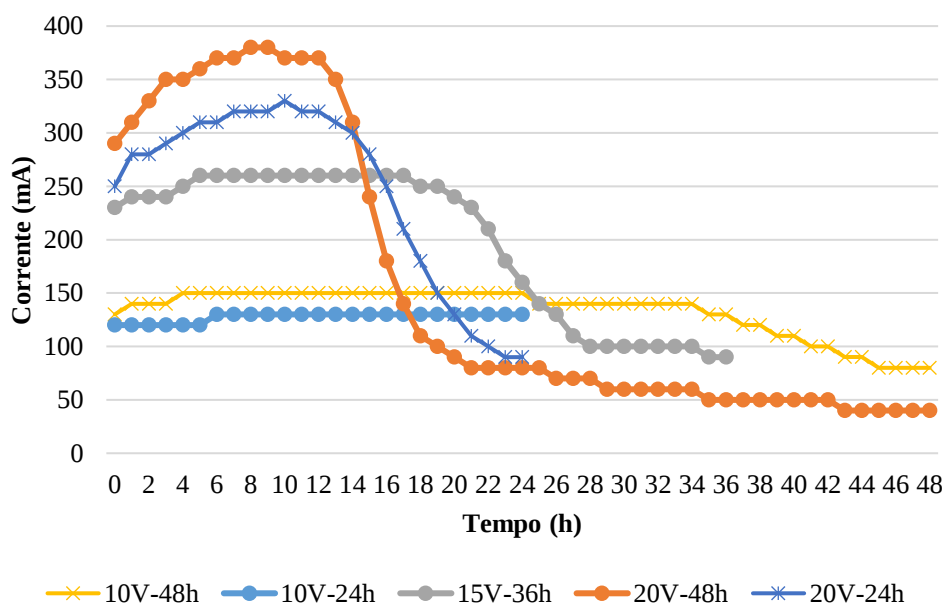


Fonte: Autoria própria.

As correntes inicialmente aumentaram e na sequência diminuíram para quatro ensaios. Esse comportamento só não foi verificado para o experimento (10V-24h), no qual a corrente apresentou um pequeno aumento após decorridos 6 horas de ensaio e manteve-se constante até

completar as 24 horas (Gráfico 3). Uma hipótese para a diminuição da corrente para quatro dos cinco experimentos foi o surgimento de fraturas na amostra de solo.

Gráfico 3 – Corrente em função do tempo.



Fonte: Autoria própria.

4.2 Condutividade e pH

As amostras de solos tratados apresentam condutividades maiores do que as amostras de solo não tratado, portanto, pode-se inferir que a utilização da água salina como fluido inicial do processo contribuiu para o desenvolvimento das reações eletrocinéticas e consequentemente para o aumento da condutividade elétrica do solo tratado (Tabela 3).

Tabela 3 – Condutividade das amostras (dSm^{-1}).

EXPERIMENTOS	Líquido - Cátodo	Líquido - Ânodo	Fluido Inicial	Solo Tratado	Solo Não Tratado
10V – 24H	15,43	14,5	14,93	17,3	8,5
10V – 48h	13,74	17,22	14,93	24,9	9,9
15V – 36h	13,73	17,02	14,93	23,3	15,4
20V – 24h	13,56	17,9	14,93	10,3	9,4
20V – 48h	13,97	18,74	14,93	15,9	10,7

Fonte: Autoria própria

O fluido inicial apresenta um pH neutro de 7,61. Os líquidos do cátodo são básicos, pois apresentam pH próximos de 12 e os líquidos do ânodo são ácidos, pois apresentaram pH próximos de 2. O maior pH da amostra de solo tratado foi de 10,4 no experimento (20V-48h), provavelmente a região da amostra de solo analisada estava mais próxima do cátodo, que é básico (Tabela 4).

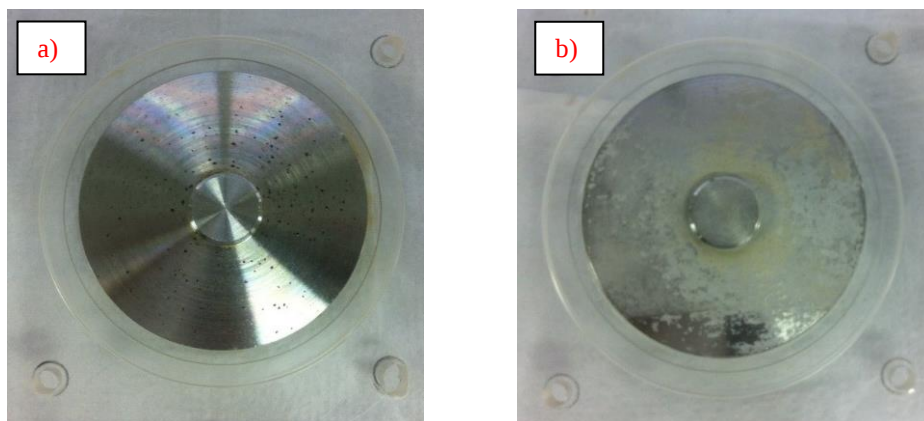
Tabela 4 – pH das amostras de solo.

EXPERIMENTOS	Líquido - Cátodo	Líquido - Ânodo	Fluido Inicial	Solo Tratado	Solo Não Tratado
10V – 24H	12,42	2,70	7,61	8,24	8,09
10V – 48h	12,65	2,42	7,61	5,52	7,59
15V – 36h	12,61	2,59	7,61	7,69	7,37
20V – 24h	12,67	2,60	7,61	8,65	7,61
20V – 48h	12,70	2,49	7,61	10,4	7,46

Fonte: Autoria própria

Os eletrodos do ânodo apresentaram pontos de corrosão após os ensaios, já os eletrodos do cátodo não apresentaram pontos de corrosão, porém sobre a superfície formou-se uma camada branca provavelmente resultado das reações de redução da eletrólise (Figura 31). De acordo com Miranda (2008), as possíveis causas para a corrosão dos eletrodos de inox estão associadas à presença de cloretos no meio, da temperatura e do pH.

Figura 31 – Aspecto visual (a) Eletrodo ânodo; (b) Eletrodo cátodo.



Fonte: Autoria própria

De acordo com Silveira (2009), a mudança do pH ocorre em função da mobilidade dos íons H^+ e OH^- , decorrentes da eletrólise, na qual o deslocamento dos íons H^+ ocorre do ânodo para o cátodo como uma frente ácida, predominante por eletro-osmose e migração iônica, já o deslocamento dos íons OH^- ocorre do cátodo para o ânodo como uma frente básica por migração iônica e difusão.

4.3 Concentrações dos elementos químicos

O líquido do ânodo com o decorrer do experimento tornou-se verde (Figura 32). Segundo Deotti (2005), a coloração verde no fluido do ânodo é decorrente da liberação dos precipitados de níquel e ferro na solução. De acordo com Miranda (2009), o cromo na presença de ácido clorídrico torna a solução verde, devido as reações de complexação.

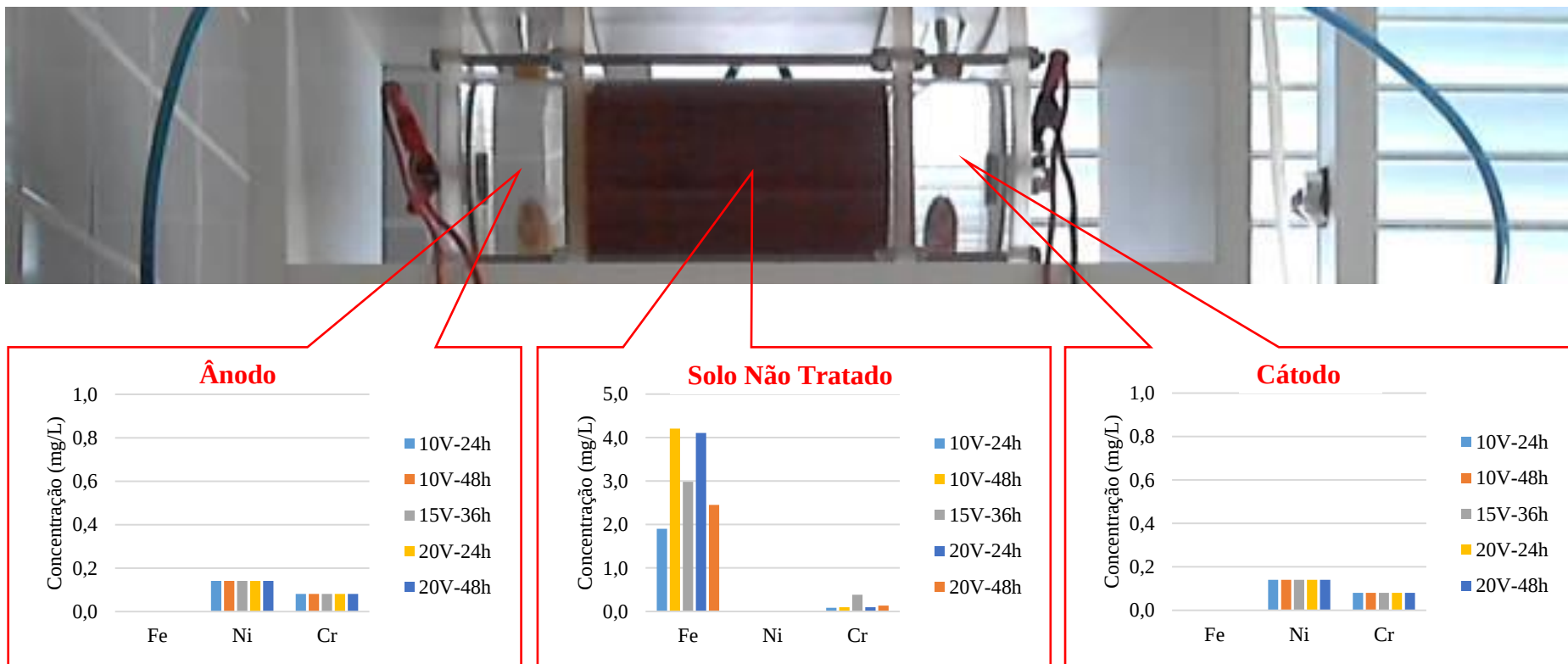
Figura 32 – Líquido do ânodo.



Fonte: Autoria própria

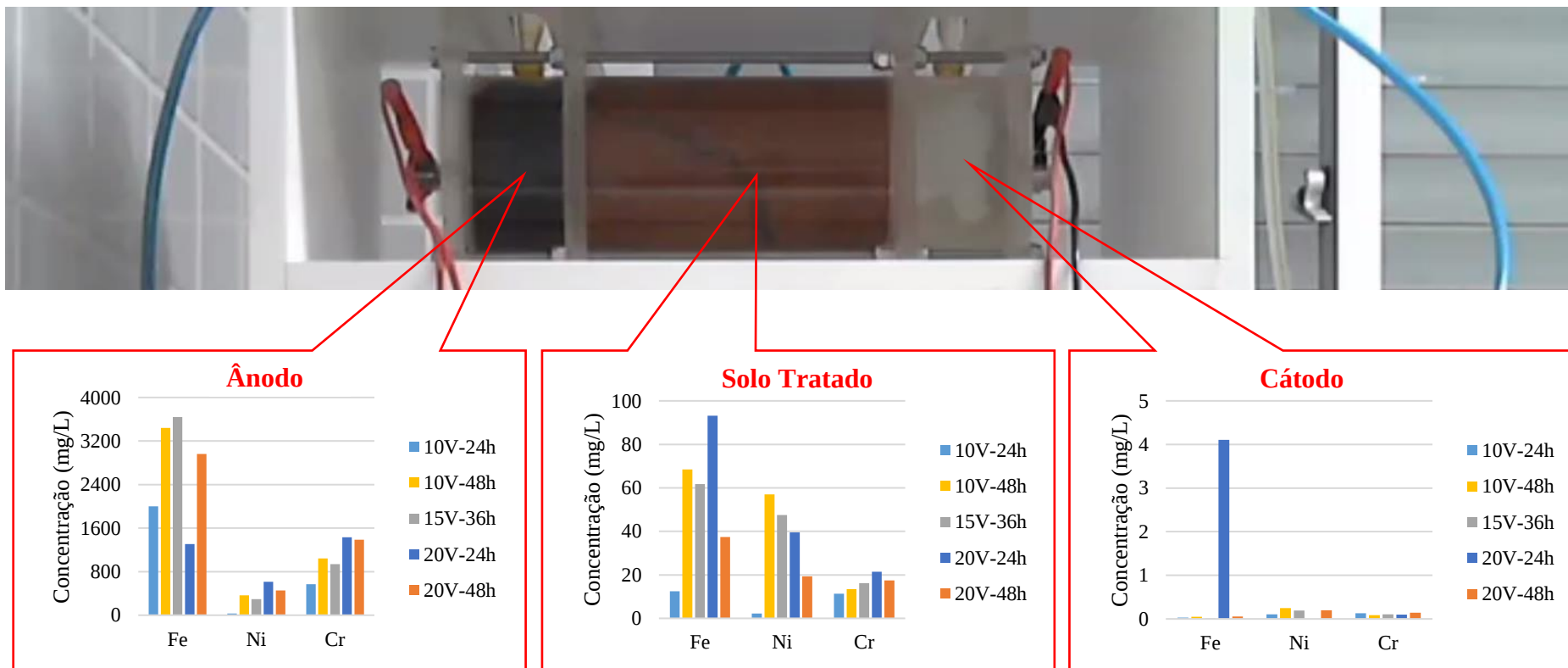
As concentrações de ferro, níquel e cromo foram determinadas em miligramas por litro, para a água salina (fluido inicial) e amostras de solo (não tratado) antes do início dos experimentos (Figura 33) e para os líquidos dos reservatórios (cátodos e ânodo) e amostras de solos (tratados) após o término dos experimentos (Figura 34).

Figura 33 – Aspecto visual e concentrações antes do início dos experimentos.



Fonte: Autoria própria

Figura 34 – Aspecto visual e concentrações após o término dos experimentos.



Fonte: Autoria própria

4.3.1 Concentrações de ferro

As concentrações de ferro foram maiores no líquido do ânodo para os cinco experimentos. Essa elevada concentração foi consequência da oxidação do eletrodo do ânodo, na qual promoveu a liberação desse elemento no anólito, pois a água salina (fluido inicial) não apresentava ferro (Tabela 5).

Tabela 5 – Concentrações de ferro.

EXPERIMENTOS	Líquido - Cátodo	Líquido - Ânodo	Fluido Inicial	Solo Tratado	Solo Não Tratado
10V – 24H	0,03	2002	0	12,418	1,90
20V – 48h	0,053	2962	0	37,4	2,45
15V – 36h	0,012	3640	0	61,75	2,98
10V – 48h	0,0549	3439	0	68,46	4,20
10V – 24h	0,074	1305	0	93,22	4,10

Fonte: Autoria própria

O solo não tratado apresentou concentração de ferro inferior ao solo tratado, logo, é possível inferir que o fluido do anólito com elevada quantidade de precipitado de ferro transferiu partes desses elementos para a amostra do solo tratado.

4.3.2 Concentrações de níquel

As concentrações de níquel, semelhantemente ao ferro foram maiores no líquido do ânodo, em decorrência também das reações de oxidação provocada pela eletrólise. Os anólitos apresentaram elevadas concentrações de níquel, na qual parte se transferiu para a amostra de solo tratado, pois o solo não tratado não possuía concentração de níquel (Tabela 6).

Tabela 6 – Concentrações de níquel.

EXPERIMENTOS	Líquido - Cátodo	Líquido - Ânodo	Fluido Inicial	Solo Tratado	Solo Não Tratado
10V – 24H	0,105	33	0,141	2,2	0
20V – 48h	0,198	453	0,141	19,3	0
15V – 36h	0,194	297	0,141	47,5	0
10V – 48h	0,248	363	0,141	57	0
10V – 24h	0,188	615	0,141	39,5	0

Fonte: Autoria própria

Para o primeiro experimento de 10 *volts* e duração de 24 horas, a concentração de níquel no líquido do ânodo foi de 33 mg/L, cuja hipótese para o reduzido valor foi o fato de não ter surgido fraturas na amostra de solo durante o experimento.

4.3.3 Concentrações de cromo

As concentrações de cromo não diferentemente do ferro e níquel também foram maiores nos líquidos dos ânodos e praticamente desprezível nos líquidos dos cátodos. As concentrações do cromo no solo tratado são maiores do que no solo não tratado, logo, pode-se inferir existiu a mobilidade de parte do cromo do líquido do ânodo para o solo tratado, uma vez que o fluido inicial não apresentava cromo e a amostra de solo não tratado apresentava reduzidas concentrações (Tabela 7).

Tabela 7 – Concentrações de cromo.

EXPERIMENTOS	Líquido - Cátodo	Líquido - Ânodo	Fluido Inicial	Solo Tratado	Solo Não Tratado
10V – 24H	0,128	567	0,081	11,3	0,087
20V – 48h	0,141	1389	0,081	17,4	0,132
15V – 36h	0,105	936	0,081	16,2	0,385
10V – 48h	0,084	1044	0,081	13,5	0,096
10V – 24h	0,106	1431	0,081	21,5	0,099

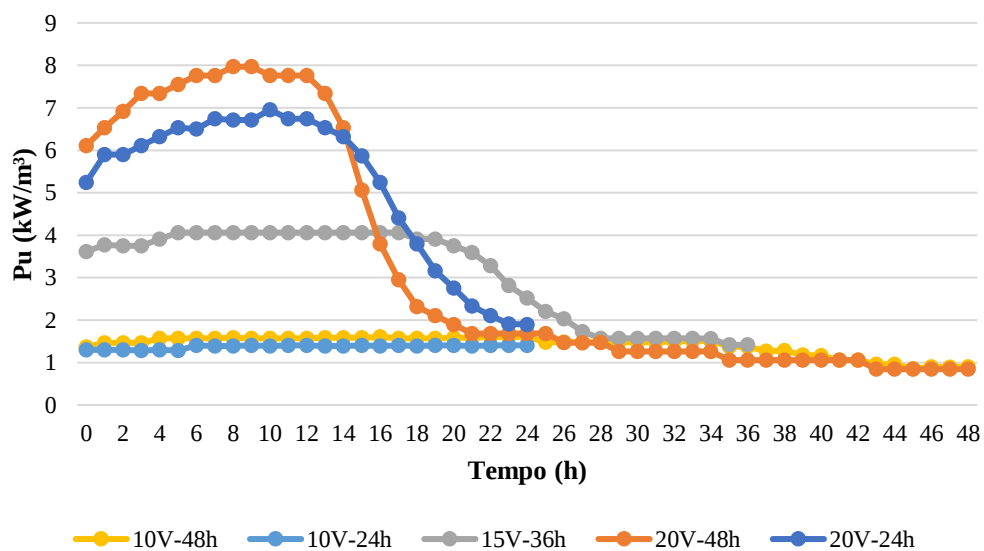
Fonte: Autoria própria

Várias propriedades do solo afetam a forma em que o metal se encontra no solo e, consequentemente, sua disponibilidade e mobilidade. Dentre esses fatores, pode-se citar o pH, a CTC (que é a capacidade de troca de cátions), matéria orgânica, teores de argila, a interação entre os próprios elementos.

4.4 Gasto energético

No gráfico 4 é apresentado o gasto energético dos experimentos, em que as maiores potências úteis foram dos experimentos (20V-48h) e (20V-24h), cujos valores máximos foram de 8 e 7 kW/m³, respectivamente. É notória a igualdade do gráfico do consumo energético em função do tempo com o gráfico da corrente em função do tempo, pois o consumo dependerá diretamente da corrente, já que a tensão permaneceu praticamente constante. O experimento (10V-24h) apresentou o menor consumo, com valores próximos de 1 kW/m³, pois a corrente permaneceu reduzida durante todo o experimento. Portanto, quanto maior a concentração de íons na solução maior será o consumo energético, pois maior será a corrente elétrica.

Gráfico 4 – Gasto energético.



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

A associação do eletrodo de inox SAE 304 com um fluido salino promoveu o aumento da concentração do ferro, níquel e cromo nas amostras de solo, cujos elementos foram provenientes do eletrodo do ânodo que sofreu oxidação. A mobilidade iônica dos elementos químicos dos reservatórios para as amostras de solo tratado foi verificada, na qual conclui-se que quanto maior a concentração dos íons na solução maior será a mobilidade. Uma possível solução para reduzir as concentrações dos metais pesados provenientes dos eletrodos de aço inox no solo tratado, se dá através da utilização de eletrodos de grafite ou da utilização de um eletrólito de pH controlado de forma que as reações de eletrólise nos eletrodos não favoreçam a oxidação dos mesmos. A capacidade de mobilizar elementos dos tanques para a amostra de solo, sugere a possibilidade de injetar elementos em solos.

As análises dos gráficos de tensão e corrente em função do tempo permitiram que algumas hipóteses fossem levantadas para explicar as fraturas que surgiram em algumas amostras de solo durante o tratamento eletrocinético, em que elevadas tensões favorecem o surgimento de trincas mais rapidamente para esse solo analisado.

A avaliação do reator eletrocinético construído para aplicações em laboratório é positiva, uma vez que foi possível testar o reator em diferentes condições, cuja utilização de elementos inovadores no reator foi fundamental para essa avaliação, como a utilização de anéis de poliuretano nas placas de acrílico que garantiram a vedação do sistema e aplicação da manta bidim que conteve a amostra de solo no tubo e permitiu o fluxo de fluidos.

6 PERSPECTIVAS

- Desenvolver um sistema de monitoramento dos parâmetros tensão, corrente e temperatura em pontos específicos da amostra;
- Identificar os gases que são gerados durante a aplicação eletrocinética, para garantir condições seguras durante a realização do ensaio;
- Verificar e controlar o pH do eletrólito durante o experimento, pois esse fator influencia diretamente na aplicabilidade do processo;
- Aplicar a técnica eletrocinética em solos com diferentes características para avaliar a mobilidade dos elementos;
- Desenvolver um reator eletrocinético para aplicação em campo;

REFERÊNCIAS

ACAR, Yalcin B.; ALSHAWABKEH, Akram N.; GALE, Robert J.. Fundamentals of Extracting Species from Soils by Electrokinetics. **Waste Management**, v.13, p.141-151, 1993. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0956-053x\(93\)90006-i](http://dx.doi.org/10.1016/0956-053x(93)90006-i)> Acesso em: 20/01/2018.

ACAR, Yalcin B.; ALSHAWABKEH, Akram N.. Principles of electrokinetic remediation. **Environmental Science & Technology**, v.27, n.13, p.2638-2647, dez 1993. American Chemical Society (ACS). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/es00049a002>> Acesso em: 10/06/2018.

ACAR, Y. B. et al. Removal of cadmium (II) from saturated kaolinite by the application of electrical current. **Géotechnique**, v.64, p.239-254, 1994. ICE: The Institution of Civil Engineers. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1680/geot.1994.44.2.239>> Acesso em: 17/03/2018.

ACAR, Yalcin B. et al. Electrokinetic remediation: basics and technology status. **Journal of Hazardous Materials**, v.40, p.117-137, 1995. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0304-3894\(94\)00066-P](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3894(94)00066-P)> Acesso em: 20/01/2018.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de Química: Questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2012. 1048 p.

BARBA, S. et al. Electro-bioremediation at the prototype scale: What it should be learned for the scale-up. **Chemical Engineering Journal**, v.334, p.2030-2038, 2018. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.172>> Acesso em: 16/03/2018.

CASTRO, Danielle da Nova Brum de. **Estudo em modelo físico 1d e 3d de remediação eletrocinética com uso de tensoativo em solo argiloso contaminado com óleo cru**. Rio de Janeiro, RJ:2010.132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

DEOTTI, Leonardo de Oliveira Guerra. **Controle de pH na técnica de biorremediação eletrocinética**. Rio de Janeiro, RJ: 2005. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DONG, Zhi-Yong et al. Remediation of soil co-contaminated with petroleum and heavy metals by the integration of electrokinetics and biostimulation. **Journal of Hazardous Materials**, v.260, p.399-408, 2013. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.05.003>> Acesso em: 20/01/2018.

GALE, Robert. J.; LI, Heyi; ACAR, Yalcin. B.. Soil Decontamination Using Electrokinetic Processing. **Studies in Environmental Science**, p.621-654, 1994. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0166-1116\(08\)70567-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0166-1116(08)70567-3)> Acesso em: 12/03/2018.

HYPOLITO, Raphael; ANDRADE, Sandra; EZAKI, Sibele. **Geoquímica da Interação: Água/Rocha/Solo Estudos Preliminares**. São Paulo: All Print Editora, 2011. 450 p.

KIM, Gye-nam et al. Development of pilot-scale electrokinetic remediation technology for uranium removal. **Separation and Purification Technology**, v.80, n.1, p.67-72, 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.009>> Acesso em: 20/01/2018.

KIM, Woo-seung et al. In situ field scale electrokinetic remediation of multi-metals contaminated paddy soil: Influence of electrode configuration. **Electrochimica Acta**, v.86, p.89-95, 2012. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2012.02.078>> Acesso em: 21/01/2018.

LÓPEZ-VIZCAÍNO, Rubén et al. Scale-up on electrokinetic remediation: Engineering and technological parameters. **Journal of Hazardous Materials**, v.315, p.135-143, 2016. Elsevier. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.012>> Acesso em: 21/01/2018.

MIRANDA, Gricel Alcira Portilho. **Transporte eletrocinético de cromo em sedimentos da Baía de Guanabara**. Rio de Janeiro, RJ:2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - PUC-RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MITCHELL, James K.; SOGA, Kenichi. **Fundamentals of Soil Behavior**. 3. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005. 558 p.

PENG, Weihua et al. Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. **Journal of Soils and Sediments**, v.18, n.4, p.1701-1719, 2018. Springer Nature. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11368-018-1921-7>> Acesso em: 20/05/2018.

OUHADI, V.R. et al. Impact of carbonate on the efficiency of heavy metal removal from kaolinite soil by the electrokinetic soil remediation method. **Journal of Hazardous Materials**, v.173, n.1-3, p.87-94, 2010. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.052>> Acesso em: 20/01/2018.

PENG, Weihua et al. Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. **Journal of Soils and Sediments**, v.18, p.1701-1719, 2018. Springer Nature. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11368-018-1921-7>> Acesso em: 16 mar 2018.

PNAAS - Plano Nacional de Ação Ambiental e Saúde. **Relatório de atividades da EP Solos e Sedimentos 2009/2011**. 2012. Disponível em: <https://www.apambiente.pt/_zdata/Políticas/Ambiente&Saude/Destaques/Relatorio_Actividades-Solo_Sedimentos.pdf> Acesso em: 5 ago. 2018.

PUPPALA, Susheel K. et al. Enhanced electrokinetic remediation of high sorption capacity soil. **Journal of Hazardous Materials**, v.55, p.203-220, 1997. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894\(97\)00011-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894(97)00011-3)> Acesso em: 20/01/2018.

REDDY, Krishna R. et al. Effects of soil composition on the removal of chromium by electrokinetics. **Journal of Hazardous Materials**, v.55, p.135-158, 1997. Elsevier BV. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894\(97\)00020-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894(97)00020-4)> Acesso em: 20/01/2018.

SANDU, Ciprian et al. Electrokinetic oxidant soil flushing: A solution for in situ remediation of hydrocarbons polluted soils. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v.799, p.1-8, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.05.0360>> Acesso em: 21/11/2017.

SCHMIDT, Celina Aída Bittencourt. **Aplicação de técnica eletrocinética em laboratório a dois tipos de solos argilosos**. Rio de Janeiro, RJ: 2004. 336 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SILVEIRA, Ana Júlia Pereira Pinto Mergulhão. **Estudo em modelo físico 2d de biorremediação eletrocinética de solo argiloso contaminado com óleo de produção**. Rio de Janeiro, RJ:2009.232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

VAN RAIJ, Bernardo. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

YEUNG, A. T.; MITCHELL, J. K.. Coupled fluid, electrical and chemical flows in soil. **Géotechnique**, v.43, p.121-134, 1993. Thomas Telford Ltd.. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1680/geot.1993.43.1.121>> Acesso em: 23/05/2018.

YEUNG, Albert T. et al. Design, Fabrication, and Assembly of an Apparatus for Electrokinetic Remediation Studies. **Geotechnical Testing Journal**, v.20, n.2, p.199-210, 1997. ASTM International. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1520/gtj10739j>> Acesso em: 25/01/2018.

YEUNG, Albert T.; ASCE, F.; HSU, Cheng-non. Electrokinetic Remediation of Cadmium-Contaminated Clay. **Journal Of Environmental Engineering**, v.131, n. 2, p.298-304, 2005. American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2005\)131:2\(298\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2005)131:2(298))> Acesso em: 25/01/2018.

YEUNG, Albert T.. Milestone developments, myths, and future directions of electrokinetic remediation. **Separation And Purification Technology**, v.79, n.2, p.124-132, 2011. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2011.01.022>> Acesso em: 20/01/2018.

YEUNG, Albert T.; HSU, Cheng-non; MENON, Rajendra M.. Physicochemical soil-contaminant interactions during electrokinetic extraction. **Journal of Hazardous Materials**, v.55, p.221-237, 1997. Elsevier. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894\(97\)00017-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3894(97)00017-4)> Acesso em: 20/01/2018.