

**Estudo da técnica de eletroosmose para descontaminação  
de terrenos estratificados**

**Inês Costa Feijão Borges**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

Orientadora

Professora Doutora Maria Rafaela Pinheiro Cardoso

**Júri**

Presidente: Professor Doutor Rodrigo de Almada Cardoso Proença de Oliveira

Orientadora: Professora Doutora Maria Rafaela Pinheiro Cardoso

Vogal: Professor Doutor Rui Pedro Carrilho Gomes

**outubro 2017**



## **Agradecimentos**

Agradeço em primeiro lugar à minha orientadora, Professora Rafaela, por toda a boa disposição, positivismo e disponibilidade demonstrada.

Agradeço à AMARSUL por ter disponibilizado o lixiviado e ao INESC-MN por ter cedido o laboratório para medições elétricas específicas.

Agradeço ao meu pai, à minha mãe, à minha irmã Rita e ao Tesla pelo amor incondicional.

Agradeço aos meus dois companheiros de tese, Miguel Cruz e Ricardo Prazeres, por me terem acompanhado nesta etapa.

Agradeço aos meus amigos Pedro, Escabelado, Micaela, Marta, Catarina, Bruno, Miguel e João pelo apoio.



## Resumo

Este trabalho estuda a técnica de tratamento de solos contaminados com matéria orgânica e iões metálicos através da passagem de corrente elétrica, aplicada a terrenos estratificados incluindo estratos de solos arenosos e argilosos. Ocorrem eletrólise da água, eletroosmose e eletromigração, que consistem no movimento de iões e de água devido a um gradiente de potencial elétrico aplicado. Estes fenómenos são eletrocinéticos e motivam a designação da técnica em inglês por *Electrokinetic Treatment* (EKT).

As propriedades químicas, elétricas e hidráulicas dos solos arenosos e argiloso são distintas e pretende-se compreender melhor o comportamento e a interação dos estratos sob a ação de EKT durante a descontaminação. Trata-se de um trabalho experimental realizado com um equipamento que consiste numa caixa de Perspex dotada com elétrodos e dois reservatórios onde pode-se colocar água da torneira e lixiviado. Realizaram-se ensaios numa amostra de areia e numa estratificada, com um estrato de areia sobre um de argila compactada, usando como contaminante lixiviado recolhido num aterro de resíduos da área de Lisboa. A eficiência do tratamento foi avaliada através da monitorização, em tempo real, das propriedades eletroquímicas do solo e do fluido intersticial. Esta análise permitiu quantificar indiretamente o grau de contaminação. Conseguiu-se um bom grau de descontaminação para as duas configurações de solo. No caso da areia, a descontaminação foi facilitada pela percolação da água.

Neste estudo foram realizados avanços na compreensão do comportamento de solos arenosos e estratificados durante a aplicação de EKT para a descontaminação, com várias aplicações em engenharia Civil e Geo-ambiental.

## Palavras-chave

Descontaminação, Eletroosmose, Areia, Argila, Matéria orgânica, Lixiviante



## **Abstract**

This work studies the technique of treating soils contaminated with organic matter and metal ions through the passage of electric current, applied to stratified soils including strata of sandy and clayey soils. Water electrolysis, electroosmosis and electromigration occur, which consist of the movement of ions and water due to an applied electrical potential gradient. These phenomena are electrokinetic and the designation of the technique is Electrokinetic Treatment (EKT).

The chemical, electrical and hydraulic properties of sandy and clayey soils are very different and it is intended to better understand the behaviour and interaction of the strata under the action of EKT during the decontamination. This is an experimental work carried out with an equipment consisting of a Perspex box equipped with electrodes and two reservoirs which can be filled with tap water and leachate. Tests were carried out on a sand sample and a stratified sample, with a sand stratum on a compacted clay layer, using leachate collected in a landfill from the Lisbon area. The efficiency of the treatment was evaluated by real-time monitoring of the electrochemical properties of the soil and pore fluid. This analysis allowed to quantify indirectly the degree of contamination. A good degree of decontamination was achieved for both soil configurations. In the case of sand, decontamination was facilitated by percolation of water.

In this study, advances were made in the understanding of the behaviour of sandy and stratified soils during the application of EKT to decontamination, with several applications in Civil Engineering and Geo-Environmental.

### **Key-words**

Decontamination, Electroosmosis, Sand, Clay, Organic matter, Leachate





# Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Enquadramento geral .....	1
1.2	Objetivos e metodologia .....	1
1.3	Organização da tese .....	2
2	Estado de arte .....	3
2.1	Definições .....	3
2.2	Aplicação de EKT no laboratório .....	5
2.3	Aplicação de EKT <i>in situ</i> .....	6
2.4	Uso de EKT para descontaminação de solos .....	7
2.5	Monitorização da EKT .....	8
3	Materiais e principais métodos experimentais .....	11
3.1	Introdução .....	11
3.2	Areia .....	11
3.2.1	Caracterização física .....	11
3.2.2	Cálculo da compacidade relativa da areia .....	12
3.2.2.1	Procedimento experimental .....	12
3.2.2.2	Resultados .....	14
3.2.3	Determinação da resistividade elétrica do solo .....	15
3.2.3.1	Procedimento experimental .....	15
3.2.3.2	Resultados .....	17
3.2.4	Determinação da permeabilidade hidráulica .....	19
3.2.5	Determinação da permeabilidade eletroosmótica .....	19
3.2.5.1	Procedimento experimental .....	19
3.2.5.2	Resultados .....	21
3.3	Argila.....	22
3.3.1	Caracterização física da argila .....	22
3.3.2	Parâmetros da argila para o ensaio de EKT .....	23
3.4	Fluidos intersticiais .....	24
4	Caixa de tratamento eletrocínético .....	27
4.1	Introdução .....	27
4.2	Descrição da caixa de tratamento eletrocínético.....	27

4.3	Variantes do ensaio de tratamento eletrocinético .....	31
4.3.1	Montagem das amostras .....	31
4.3.2	Técnica da corrente intermitente .....	33
4.3.3	Técnica de tratamento melhorado .....	33
4.4	Grandezas medidas na caixa .....	34
4.4.1	Caudal de entrada e saída da caixa .....	34
4.4.2	pH .....	35
4.4.3	Diferença de potencial elétrico .....	35
4.4.4	Intensidade da corrente elétrica .....	36
4.4.5	Resistividade elétrica .....	36
4.4.6	Concentração de água lixiviante na célula de solo .....	37
4.5	Ensaio realizado com a caixa de tratamento eletrocinético .....	38
5	Resultados .....	39
5.1	Introdução .....	39
5.2	Resultados esperados .....	39
5.3	Monitorização durante o ensaio de EKT .....	41
5.3.1	Caudal de entrada e saída da caixa .....	41
5.3.2	pH .....	43
5.3.3	Diferença de potencial elétrico .....	47
5.3.4	Intensidade da corrente elétrica .....	51
5.3.5	Resistividade elétrica .....	53
5.4	Avaliação indireta da descontaminação .....	57
5.4.1	Evolução da resistividade elétrica do solo .....	57
5.4.2	Observação visual .....	58
5.4.2.1	Teste B .....	58
5.4.2.2	Teste C .....	59
5.4.2.3	Descoloração devido a lavagem ou a oxidação .....	62
5.5	Verificação direta da descontaminação por análises químicas .....	64
5.6	Observações finais .....	66
6	Conclusões e estudos futuros .....	67
6.1	Conclusões .....	67
6.2	Estudos futuros .....	68
7	Referências Bibliográficas .....	71
	Anexos .....	75

## Lista de quadros

Tabela 2.1 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade saturada $k_h$ e do coeficiente de permeabilidade eletrosmótica $k_e$ para vários solos (adaptada de Gingine (2017)) .....	5
Tabela 2.2 - Valores de resistividade elétrica para alguns materiais (adptado de Mota et al., 2004) ..	10
Tabela 3.1 - Características do molde cilíndrico Proctor .....	12
Tabela 3.2 - Dados medidos e calculados para a obtenção da compacidade relativa.....	14
Tabela 3.3 - Resistividade elétrica das amostras .....	18
Tabela 3.4 - Dados e resultados do ensaio eletrocinético .....	21
Tabela 3.5 - Propriedades da caulinite (Gingine, 2017).....	22
Tabela 3.6 - Parâmetros da água lixiviante (Gingine, 2017).....	25
Tabela 3.7 - C (água lixiviante)/ C (água da torneira) .....	25
Tabela 4.1 - Detalhes de cada configuração de solo.....	31
Tabela 4.2 - Equações da resistividade elétrica para cada zona da caixa de EKT .....	36
Tabela 4.3 - Funções da concentração de água lixiviante para valores de pH obtidas em laboratório	37
Tabela 4.4 - Funções da concentração de água lixiviante para todos os valores de pH .....	37
Tabela 4.5 - Ensaio realizados na caixa de tratamento eletrocinético .....	38
Tabela 5.1 - Taxa de descontaminação das amostras de solo.....	65
Tabela 5.2 - Comparação das argilas .....	65



## Lista de figuras

Figura 2.1 - EKT <i>in situ</i> , adaptado de Reddy (2010).....	6
Figura 2.2 - Pluma contaminante, adaptado de Greenhouse e Monier-Williams (1985).....	9
Figura 2.3 - Condutividade elétrica medida a partir da superfície em zonas adjacentes a uma lixeira (Mota et al. 2004) .....	9
Figura 3.1 - Areia APAS 20 .....	11
Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia.....	12
Figura 3.3 - Molde cilíndrico: (a) sem e (b) com a alonga.....	13
Figura 3.4 - (a) Topo do molde com uma massa e alonga e (b) Mesa vibratória .....	14
Figura 3.5 - Amostra de areia em molde cilíndrico .....	15
Figura 3.6 - Processo de montagem de uma amostra de areia .....	16
Figura 3.7 - Frascos herméticos com as 18 amostras mergulhadas na solução de água lixiviante.....	16
Figura 3.8 - Multímetro Keithley .....	17
Figura 3.9 - Esquema (a) e fotografia (b) da medição d resistência elétrica de uma amostra de solo	17
Figura 3.10 - Gráficos de L%(p) na areia para diferentes pH .....	18
Figura 3.11 - Permeâmetro .....	19
Figura 3.12 - Edômetro onde se vêem as pedras porosas e os elétrodos de prata .....	20
Figura 3.13 - Fotografias do ensaio eletrocínético .....	20
Figura 3.14 - Caulinite .....	22
Figura 3.15 - Curva granulométrica da argila.....	22
Figura 3.16 - Gráficos de L%(p) para na argila para diferentes pH (Gingine, 2017). .....	23
Figura 3.17 - Gotas de água da torneira e água lixiviante .....	24
Figura 3.18 - Concentração de iões e água da torneira (Machete, 2015) .....	24
Figura 4.1 - Elementos do ensaio da caixa de tratamento eletrocínético .....	27
Figura 4.2 - Esquema da caixa de tratamento eletrocínético.....	28
Figura 4.3 - Identificação das quatro zonas da caixa de EKT.....	28
Figura 4.4 - Placas de (a) grafite e de (b) aço.....	29
Figura 4.5 - Elétrodos de monitorização do solo.....	29
Figura 4.6 - Fonte de alimentação elétrica.....	30
Figura 4.7 - Programador de tempo .....	30
Figura 4.8 - Multímetro digital DT9205A .....	30
Figura 4.9 - Configurações do solo: (a) areia e (b) areia + argila .....	32
Figura 4.10 - Camada de argila escarificada (vista de topo) .....	32
Figura 4.11 - Gráfico da tensão elétrica em função do tempo utilizando a técnica de CI .....	33
Figura 4.12 - (a) Garrafa de Mariotte e (b) garrafa coletora.....	34

Figura 4.13 - Papel de pH .....	35
Figura 4.14 - Esquema das medições de diferença de potencial elétrico na caixa de EKT .....	35
Figura 5.1 - Esquema do escoamento (a) eletroosmótico e (b) hidráulico .....	39
Figura 5.2 - Esquema dos resultados esperados no teste B ao longo do tempo .....	40
Figura 5.3 - Esquema dos resultados esperados no teste C ao longo do tempo .....	40
Figura 5.4 - Massa de fluido que entra e sai da caixa de EKT ao longo do tempo para os testes A, B e C .....	42
Figura 5.5 - pH ao longo da caixa para o teste A.....	44
Figura 5.6 - pH ao longo da caixa para o teste B.....	45
Figura 5.7 - pH ao longo da caixa para o teste C .....	46
Figura 5.8 - Diferença de potencial elétrico ao longo do tempo para cada zona para o teste A .....	48
Figura 5.9 - Diferença de potencial elétrico ao longo do tempo para cada zona para o teste B .....	49
Figura 5.10 - Diferença de potencial elétrico ao longo do tempo para cada zona para o teste C .....	50
Figura 5.11 - Gráficos da corrente elétrica ao longo do tempo para os testes A, B e C .....	52
Figura 5.12 - Resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa para o teste A .....	54
Figura 5.13 - Resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa para o teste B .....	55
Figura 5.14 - Resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa para o teste C .....	56
Figura 5.15 - Concentração de água lixiviante no final de cada subteste para cada zona da caixa para os testes B e C .....	58
Figura 5.16 - Progressão ao longo do tempo do ensaio B.....	59
Figura 5.17 - Progressão ao longo do tempo do ensaio C .....	60
Figura 5.18 - Progressão ao longo do tempo no estrato de areia durante o teste C.....	60
Figura 5.19 - <i>Progressão ao longo do tempo no estrato de argila durante o teste C.....</i>	61
Figura 5.20 - Esquema do teste C com os vários sentidos do escoamento.....	62
Figura 5.21 - Fotografias de microscópio da superfície exterior de um grão de areia.....	62
Figura 5.22 - Comparação entre areia no final do teste B com e sem lavagem de 24 horas.....	63

## Lista de abreviaturas e símbolos

$A$	Área	$u$	Pressão intersticial
$D_r$	Compacidade relativa do solo	$V$	Potencial elétrico ou tensão elétrica
$dV/dx$	Gradiente elétrico	$V$	Volume
$e$	Índice de vazios	$W$	Peso de solo
$e_{max}$	Índice de vazios máximo	$w$	Teor em água
$e_{min}$	Índice de vazios mínimo	$w_L$	Limite de liquidez
$g$	Aceleração gravítica	$w_P$	Limite de plasticidade
$G_s$	Densidade das partículas sólidas	$\gamma_d$	Peso volúmico seco
$H$	Carga hidráulica	$\gamma_w$	Peso volúmico da água
$i$	Gradiente hidráulico	$\Delta V$	Diferença de Potencial elétrico
$I$	Intensidade da corrente elétrica ou corrente	$\rho$	Resistividade elétrica
$IP$	Índice de plasticidade	$\rho_{\text{água}}$	Massa volúmica da água
$k_e$	Coefficiente de permeabilidade eletrosmótica	$\sigma$	Condutividade elétrica
$k_h$	Coefficiente de permeabilidade hidráulica		
$L\%$	Concentração da solução aquosa de lixiviante		
$m$	Massa		
$Q_e$	Caudal eletrosmótico ou elétrico		
$Q_h$	Caudal hidráulico		
$R$	Resistência elétrica		





# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento geral

As preocupações com a contaminação de solos de fundação de aterros de resíduos sólidos urbanos ou de resíduos mineiros têm vindo a aumentar, por motivos de saúde pública, ambientais e legais. A prevenção é fundamental, mas em caso de contaminação os métodos de descontaminação e as medidas de monitorização têm de ser postas em prática.

Os tratamentos através de eletrocinese, ou de fenómenos eletrocinéticos (traduzido do termo em inglês *Electrokinetic Treatment*) são os estudados no presente trabalho. Este tipo de tratamento já tem sido alvo de vários estudos em solos argilosos, um deles o trabalho de Gingine (2017) realizado no IST. Devido às características da argila, os resultados desta técnica ao nível da descontaminação têm sido bastante eficientes. Existem técnicas para descontaminação de solos arenosos bastante mais eficientes que o uso de eletrocinese, no entanto, existindo terrenos estratificados na natureza, a falta de informação destes tratamentos em solos arenosos motivou a realização do presente trabalho, pretendendo-se avaliar, principalmente o estudo de terrenos estratificados com solos arenosos e argilosos se o tratamento eletrocinético pode ser viável nestes casos.

### 1.2 Objetivos e metodologia

O principal objetivo do presente trabalho é estudar a eletroosmose como técnica de descontaminação de solos estratificados contendo camadas de solo arenoso. Para tal utilizou-se como base o trabalho de Gingine (2017), onde se estuda a utilização de tratamentos eletrocinéticos para descontaminação de solos argilosos. Este autor projetou uma caixa em Perspex para a realização de ensaios de eletrocinese. No presente trabalho utiliza-se esta mesma caixa, denominada por caixa de EKT, onde são realizados dois ensaios, um em que a amostra é apenas areia, e o outro em que a amostra foi preparada com dois estratos de solo, um de argila compactada e outro de areia. Em ambas as configurações os solos foram saturados com água lixiviante recolhida de um aterro de resíduos sólidos urbanos da região de Lisboa. Nos ensaios foi aplicada voltagem constante e foram medidos valores de pH e de intensidades de corrente elétrica. A determinação da resistividade elétrica com estes parâmetros permitiu a monitorização do ensaio e perceber a evolução da descontaminação, após conhecer a relação entre a concentração de água lixiviante e a resistividade elétrica do solo (curva de calibração). A realização dos ensaios tem por base os procedimentos experimentais adotados no trabalho de Gingine (2017), que estudou amostras preparadas só com argila compactada. Nesta tese

as amostras de argila foram compactadas de forma idêntica à adotada por Gingine (2017) para permitir a comparação entre resultados.

A caracterização do material argiloso e os resultados das medições de parâmetros necessários ao tipo de estudo em causa estão disponíveis no trabalho de Gingine (2017). Quanto ao material arenoso, no presente estudo foi realizada a sua caracterização física e a medição de todos os parâmetros necessários para a interpretação dos resultados, inclusive a determinação da curva de calibração. Entre os parâmetros medidos enumeram-se os coeficientes de permeabilidade hidráulica e eletrosmótica.

### **1.3 Organização da tese**

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos. A seguir ao presente capítulo encontram-se os seguintes capítulos:

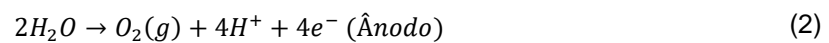
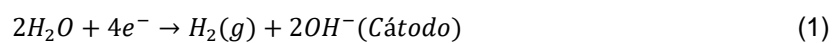
- Capítulo 2 - Explicam-se alguns conceitos teóricos fundamentais para a compreensão do tema, refere alguns estudos realizados e descreve-se como pode esta técnica ser usada para descontaminação de solos;
- Capítulo 3 - Apresenta-se as principais características dos materiais usados e detalham-se os procedimentos experimentais adotados para a determinação de algumas características dos materiais, principalmente da areia;
- Capítulo 4 - Explica-se como é realizado um ensaio de EKT, descreve os vários componentes da caixa de EKT e as suas funções, detalham-se quais os equipamentos e métodos utilizados na realização de leituras durante o ensaio de EKT, explicam-se como são medidas e calculadas as grandezas necessárias à obtenção de resultados e quais os procedimentos experimentais adotados para cada subteste realizado;
- Capítulo 5 - Apresentam-se os resultados e os comentários, explicando as possíveis causas para os resultados obtidos e cruzando os resultados numa interpretação final;
- Capítulo 6 - Apresentam-se as conclusões e descrevem-se possíveis melhoramentos futuros que pretendam aprofundar o tema.

## Capítulo 2

### Estado de arte

#### 2.1 Definições

A eletrocinese estabelece a relação entre o potencial elétrico e o movimento da água e iões. Quando é aplicado um potencial elétrico a uma massa de solo saturada, a água move-se do ânodo (+) para o cátodo (-) podendo ocorrer eletrólise da água (Equações (1) e (2)).



Segundo Esrig (1968), a corrente elétrica é inicialmente transmitida por migração dos iões através do fluido intersticial, sendo os catiões atraídos em direção ao ânodo e os aniões ao cátodo. A migração iônica é a migração de iões (catiões e aniões) para os elétrodos sob a influência de um potencial elétrico. Os iões carregados positivamente (catiões) migram para o cátodo, e os iões carregados negativamente (aniões) migram para o ânodo. A velocidade da migração depende da quantidade de carga nos iões, diferença de tensão, mobilidade de iões e a viscosidade do fluido intersticial. As variações de concentração dos iões no fluido devidas a este movimento é designada por eletrosmose. No caso de haver movimento das partículas de argila, estas ao movimentarem-se transportam água do meio devido à sua viscosidade, a esta movimentação da água dá-se o nome de eletroforese.

A eficiência da eletrosmose é definida pela quantidade de água movida por unidade de corrente elétrica. A técnica eletrocínética é mais eficiente em solos saturados, na presença de minerais de argila, mas melhor se estes têm relativamente baixa capacidade de atrair catiões. Também funciona melhor para descontaminação de terrenos ou quando o fluido intersticial tem catiões com menos eletrões de valência. Basicamente, a técnica é mais eficiente para materiais com uma grande densidade de carga de superfície e uma grande área de superfície específica, pois é quando a mobilidade de iões é elevada.

O coeficiente de permeabilidade eletrosmótica,  $k_e$ , é um parâmetro fundamental a considerar quando se utiliza a técnica de eletrosmose à escala de laboratório ou no campo. Este parâmetro para o mesmo solo depende do tempo, é bastante influenciada pela duração do tratamento, do fluido intersticial presente no solo e do índice de vazios, estas dependências tornam complicada a sua definição.

Segundo a teoria da consolidação eletrosmótica, a solução analítica unidimensional para o cálculo do caudal transportado por corrente elétrica foi apresentada em 1960 (Esrig 1968, Mitchell e Soga 2005). O caudal eletrosmótico pode ser descrito pela Equação (3), onde  $Q_e$  é o caudal elétrico ( $m^3/s$ ),  $k_e$  é o coeficiente de permeabilidade eletrosmótica ( $m^2/V/s$ ),  $\nabla E$  é o gradiente do campo elétrico de corrente

continua aplicada (V/m) e A é a área total da secção transversal perpendicular à direcção do escoamento.

$$Q_e = k_e \nabla EA \quad (3)$$

No caso de o escoamento ser unidirecional ao longo da posição  $x$ , o caudal electrosmótico pode ser descrito pela Equação (4), onde  $k_e$  é medido quando a água percola pelo solo sob um gradiente eléctrico constante  $\partial V/\partial x$ .

$$Q_e = k_e \frac{\partial V}{\partial x} A \quad (4)$$

A Equação (4) é análoga à lei de Darcy (Equação (5)), esta define o caudal,  $Q_h$ , provocado por um gradiente hidráulico em solos saturados, onde  $k_h$  é o coeficiente de permeabilidade hidráulica (m/s) e  $i$  é o gradiente hidráulico dado pela carga hidráulica,  $\partial H$ , ao longo da direcção do escoamento,  $\partial x$ , causada por pressão intersticial.

$$Q_h = k_h i A = k_h \frac{\partial H}{\partial x} A \quad (5)$$

A Equações (4) e (5) não consideram nenhum acoplamento entre as características eléctricas e hidráulicas. Considerando que a aplicação de  $\partial V/\partial x$  provoca geração de pressão intersticial ( $\partial u/\partial x$ ), que induz um escoamento no sentido contrário ao sentido do escoamento electrosmótico, pode-se deduzir a Equação (6), onde se considerou que o caudal electrosmótico,  $Q_e$ , tem sentido contrário ao caudal hidráulico,  $Q_h$ , e onde Q é o caudal total originado pelo cruzamento destes dois efeitos.

$$Q = Q_h - Q_e = A \left[ \left( k_h \frac{\partial H}{\partial x} \right) - \left( k_e \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (6)$$

Para se entender a relação entre o gradiente eléctrico ( $\partial V/\partial x$ ) e o hidráulico ( $\partial H/\partial x$ ), considerou-se uma amostra de solo onde os coeficientes de permeabilidade,  $k_e$  e  $k_h$ , são constantes ao longo do tempo e que cada um dos gradientes impõe um caudal percolado igual,  $Q_e=Q_h$ , assim obtém-se a Equação (7).

$$Q_h = Q_e \rightarrow k_h \frac{\partial H}{\partial x} k_e = \frac{\partial V}{\partial x} \rightarrow \frac{k_h}{k_e} = \frac{\partial V}{\partial H} \quad (V/m) \quad (7)$$

A partir deste quociente é possível entender e comparar os custos energéticos associados a estas duas técnicas de descontaminação. Uma vez que os solos granulares não são partículas com a superfície carregada,  $k_e$  depende maioritariamente da porosidade do solo e das propriedades do fluido. Em relação à porosidade, quanto maior o valor do índice de vazios, maior o coeficiente de permeabilidade electrosmótica, pois a mobilidade dos iões na solução aumenta (Segall and Bruell 1992; Gabrieli et al., 2008). A Tabela 2.1 apresenta valores típicos para alguns tipos de solos.

Tabela 2.1 - Valores típicos do coeficiente de permeabilidade saturada  $k_h$  e do coeficiente de permeabilidade eletrosmótica  $k_e$  para vários solos (adaptada de Gingine (2017))

<b>Material</b>	<b>Teor de água (%)</b>	<b><math>k_e \times 10^{-9}</math> (m<sup>2</sup>/V/s)</b>	<b><math>k_h \times 10^{-9}</math> (m/s)</b>	<b><math>k_h/k_e</math> (V/m)</b>
<i>Argila London Clay</i>	52,3	5,8	0,1	0,02
<i>Argila Boston Blue Clay</i>	50,8	5,1	0,1	0,02
<i>Argila Siltosa</i>	32,0	3,0 - 6,0	0,12 - 0,65	0,02 - 0,22
<i>Caulinite</i>	67,7	5,7	1,0	0,18
<i>Pó de Rocha</i>	27,2	4,5	1,0	0,22
<i>Silte Argiloso</i>	31,7	5,0	10,0	2,00
<i>Pó de Mica</i>	49,7	6,9	100,0	14,5
<i>Areia Fina</i>	26,0	4,1	1000,0	244
<i>Pó de Quartzo</i>	26,5	4,3	1000,0	233

Pode verificar-se que, para solos arenosos, a EKT não é muito eficiente porque a mobilidade dos iões é muito maior se estes são transportados na água em movimento de percolação, e, portanto, é mais fácil transportar iões através de gradientes hidráulicos do que por gradientes elétricos. No entanto, a existência de terrenos estratificados na natureza motivou a realização deste estudo.

## 2.2 Aplicação de EKT no laboratório

Os primeiros estudos do tratamento eletrocinético tiveram início nos anos 40 com argilas saturadas realizados por Casagrande, ao longo do tempo foram estudados vários sistemas para a medição de  $k_e$  e de outros parâmetros.

Os sistemas utilizados neste estudo encontram-se descritos detalhadamente nos capítulos 3 e 4 (edómetro na secção 3.2.5 e caixa na secção 4.2). Foram o edómetro modificado de Santos (2012), para medição do coeficiente de permeabilidade eletrosmótica,  $k_e$ , e a caixa de EKT em Perspex desenvolvida no âmbito do doutoramento de Gingine (2017). Este autor projetou uma caixa de EKT, concebida tendo em consideração modelos de outros autores, melhorando as suas características.

A caixa de EKT apresenta modo de monitorizar o teste enquanto este decorre, por oposição aos modelos anteriores que apenas obtinham as propriedades químicas e mecânicas do solo no final do tratamento. A monitorização do teste de EKT em laboratório é uma ferramenta essencial para avaliar as mudanças graduais no solo ao longo do tratamento, usando as propriedades químicas e elétricas do solo. A monitorização deve ser realizada durante o andamento do teste de EKT para que em tempo real se altere a metodologia do ensaio, no caso de ser necessário para melhorar os resultados. Tal

como se apresentará na secção 4.4, o comprimento da caixa de EKT foi tido em conta para a monitorização por zonas e para que o tempo de realização do teste fosse suficiente para recolher leituras de todas as propriedades eletroquímicas possíveis. São exemplos destas propriedades o pH e a condutividade elétrica do fluido intersticial, e a resistividade elétrica do solo.

### 2.3 Aplicação de EKT *in situ*

O tratamento de solos argilosos contaminadas usando métodos como lavagem do solo, bactérias e outros tratamentos bioquímicos por vezes são ineficazes e dispendiosos devido à baixa permeabilidade hidráulica dos solos argilosos. A EKT, também conhecida como tratamento eletrocinético *in situ*, mostrou ser adequada para a descontaminação de argilas contaminadas.

A aplicação do tratamento eletrocinético *in situ* consiste em perfurar poços ou drenos, onde são instalados eléctodos e posteriormente aplica-se um potencial eléctrico de corrente directa muito baixa. Em algumas situações podem ser necessários sistemas de bombagem de água e condicionamento nos eléctodos. A Figura 2.1 mostra um sistema de descontaminação de solo *in situ* utilizando o tratamento eletrocinético. De modo semelhante, o tratamento eletrocinético pode ser realizado *ex situ* usando equipamentos à superfície especialmente projetados para tal. O tratamento de descontaminação *ex situ* envolve remover o solo contaminado e realizar o tratamento no local ou em locais próprios.

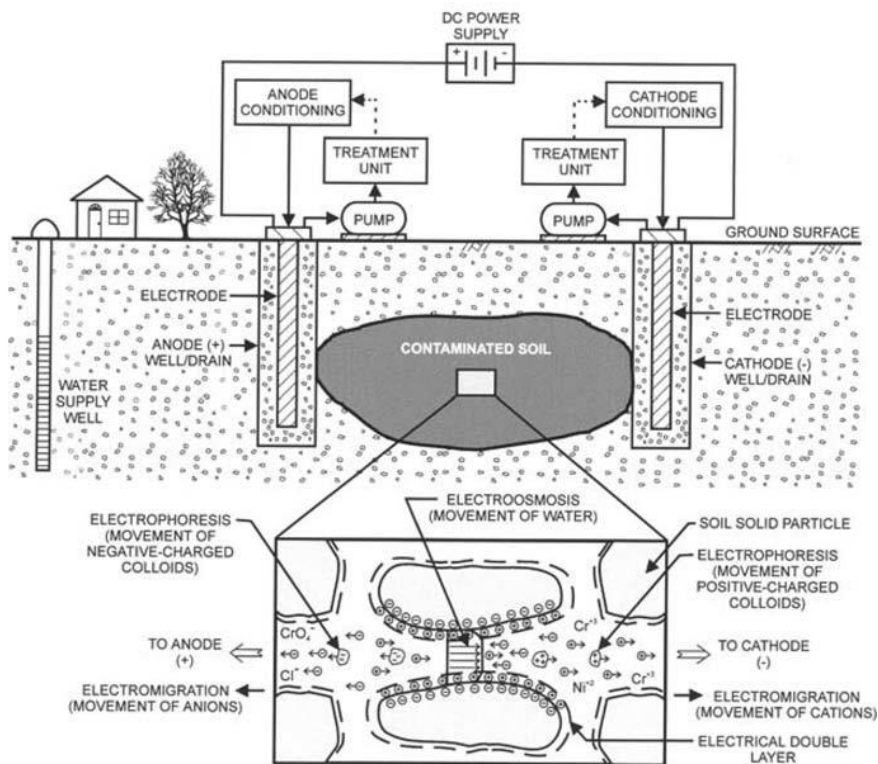


Figura 2.1 - EKT *in situ*, adaptado de Reddy (2010)

Apesar das vantagens desta técnica, existe uma grande quantidade de pesquisa realizada em EKT sobre consolidação e descontaminação de solos, mas não há muitos casos de aplicação de EKT no campo, sendo a maioria relativa a testes de pequena escala.

A técnica de EKT enfrenta vários desafios em campo (Reddy, 2010; Zhuang, 2015). A principal dificuldade é a compreensão dos fenômenos complexos que ocorrem no solo durante a aplicação de um gradiente elétrico, pois devem-se à presença de diferentes sais, metais e matéria orgânica. Para além da eletroquímica e da migração iônica existe a evolução do pH (Hamed e Bhadra, 1997; Saichek e Reddy, 2003), a geração de gás (Gabrieli et al., 2008; Tamagnini et al., 2010; Yeung et al., 1997, Yuan e Hicks, 2016), a formação de compostos no solo e eventuais alterações do solo a nível mineralógico (Adamson et al., 1966). Complementarmente, é também uma técnica pouco económica pois envolve, para além da instalação dos drenos, a instalação de eléctrodos e a aplicação de corrente elétrica, tarefas que têm que ser executadas por mão de obra especializada.

## **2.4 Uso de EKT para descontaminação de solos**

As condições de drenagem, durante a aplicação da técnica, são importantes porque a pressão da água gerada pelo fluxo eletrosmótico no ânodo gera um fluxo hidráulico com sentido contrário. O uso de EKT para descontaminação de solos tem de ser realizado de modo a que a drenagem seja possível, para evitar este contra fluxo, ou seja, evitar que haja aumento da pressão intersticial. Adicionalmente, só assim é que se pode eliminar os contaminantes, pois promove-se circulação com substituição do fluido intersticial por água limpa. A drenagem deve ser permitida no ânodo e impedida no cátodo, e esta é a configuração adotada para a desidratação do solo ou a consolidação hidrodinâmica.

As vantagens do uso desta técnica *in situ* em relação aos métodos convencionais de descontaminação são os seguintes:

- Simplicidade - não são necessários muitos equipamentos;
- Segurança - os trabalhadores e a população não são expostos aos contaminantes;
- Variedade dos meios contaminados - pode ser usada em solos, lamas, sedimentos e águas subterrâneas (particularmente adequados para argilas de baixa permeabilidade e depósitos de solo heterogêneos, onde os métodos convencionais provaram ser ineficazes ou caros);
- Variedade de contaminantes - pode ser usado para metais, compostos orgânicos, poluição radiativa ou combinações desses contaminantes;
- Flexibilidade - pode ser usado como um tratamento de descontaminação *in situ* ou *ex situ*.

As equações usadas para descrever os processos EKT no solo de um ponto de vista geotécnico são agora revistas enfatizando o comportamento acoplado eletro-hidráulico e como é afetado pelo tipo de solo. A água movimenta-se em resposta a diferenças de pressão, nomeada de carga hidráulica. O caudal percolado de água depende do coeficiente de permeabilidade hidráulica, que é importante para os solos arenosos, mas, para solos finos tais como argilas, esse valor é muito baixo. Por essa razão, nas argilas pensou-se em induzir o movimento da água através de diferenças de potencial elétrico, mas em areias é mais rentável do ponto de vista de tempo e de custo remover os contaminantes por percolação hidráulica.

Acredita-se que as principais aplicações da EKT no futuro são no domínio da engenharia ambiental, um melhor conhecimento do comportamento químico, elétrico e hidráulico acoplado de argilas ligadas ao seu comportamento mecânico (mudanças de volume e conseqüentemente mudanças de rigidez e força) causadas pela interação entre os dois níveis estruturais podem ajudar a definir melhores modelos também neste domínio.

## **2.5 Monitorização da EKT**

A resistividade elétrica do solo,  $\rho$ , é um parâmetro que depende do índice de vazios, grau de saturação, composição química (condutividade,  $\sigma$ ) do líquido intersticial e mineralogia, esta última porque afeta o tamanho, forma e superfície de contacto das partículas de solo. Isto porque a passagem da corrente elétrica nos solos é feita através das fases sólida, líquida e gasosa. Considerando apenas solos saturados, a condutividade da fase sólida é muito elevada no caso de minerais argilosos, através da água adsorvida na superfície das partículas carregadas negativamente, mas muito baixa no caso das areias (Santamarina et al., 2001). A condutividade da fase líquida é a condutividade do fluido intersticial, que depende dos iões aí presentes e do pH.

Uma forma usual de verificar a contaminação de solos é através da medição da resistividade elétrica (Mota et al., 2004), uma vez que esta propriedade é muito afetada pela composição química do fluido intersticial. Quanto mais contaminado estiver o solo maior será a concentração de iões no fluido intersticial, e, portanto, maior será a sua condutividade e menor será a resistividade do solo. Assim, é possível monitorizar o processo de descontaminação através da medição de variações de resistividade elétrica durante o tratamento por EKT. A Figura 2.2 mostra um método de medição desta propriedade *in situ* e a Figura 2.3 mostra um caso de aplicação *in situ*.



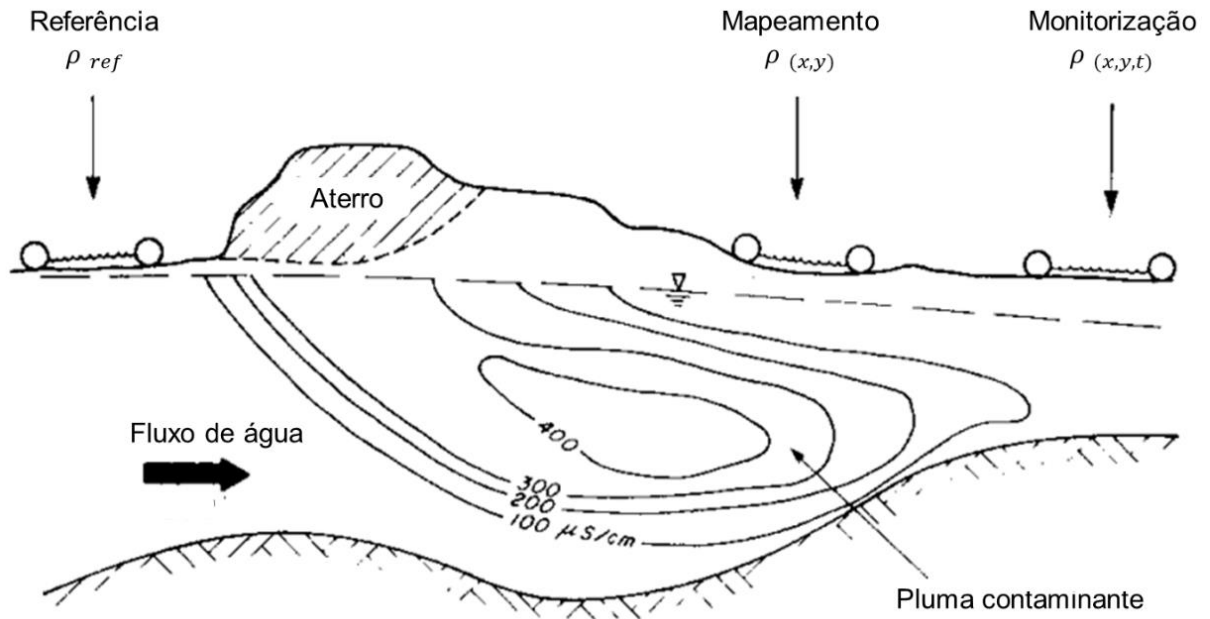


Figura 2.2 - Pluma contaminante, adaptado de Greenhouse e Monier-Williams (1985)

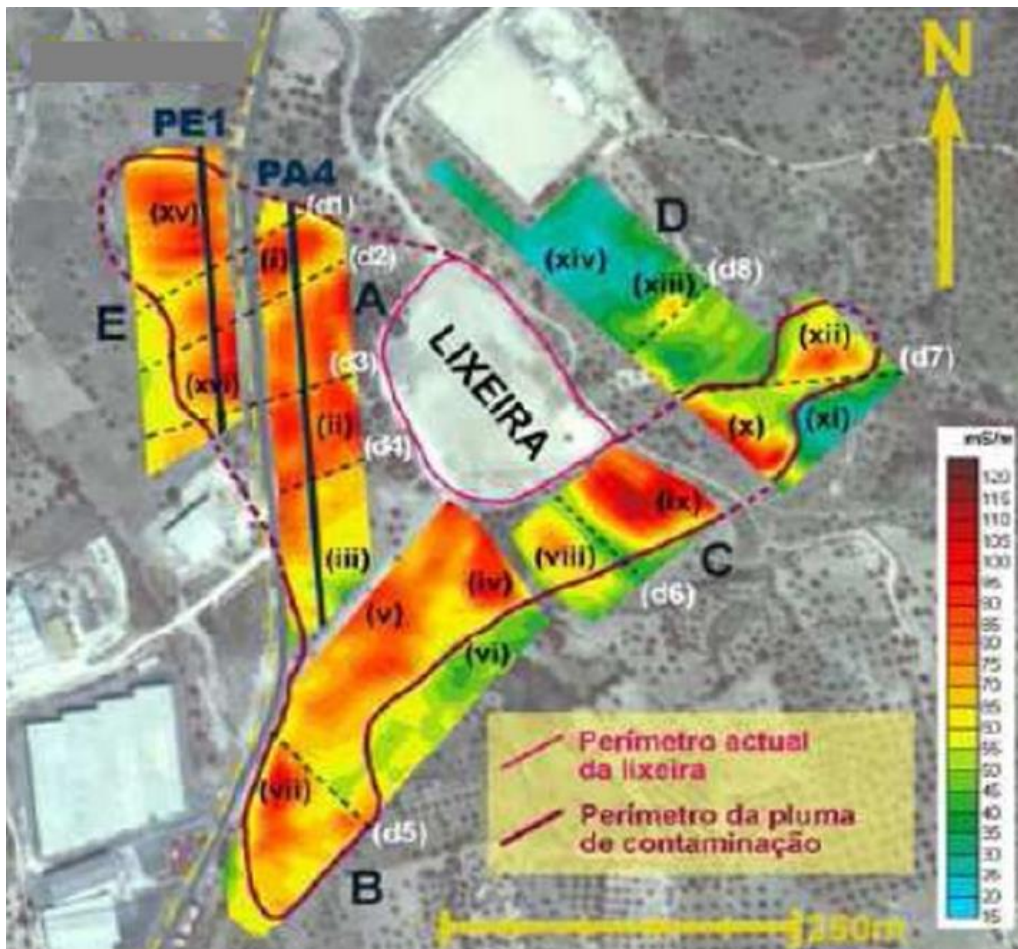


Figura 2.3 - Condutividade elétrica medida a partir da superfície em zonas adjacentes a uma lixeira (Mota et al. 2004)

O conhecimento dos valores padrão de resistividade para o terreno e contaminante em causa é essencial para monitorizar o processo de descontaminação. A Tabela 2.2 apresenta valores de resistividade eléctrica para alguns materiais.

Tabela 2.2 - Valores de resistividade eléctrica para alguns materiais (adptado de Mota et al., 2004)

<b>Material</b>	<b>Resistividade (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
<b>Água do mar</b>	0,2 - 1
<b>Água</b>	2 - 100
<b>Cobre</b>	$1,7 \times 10^{-8}$
<b>Aço</b>	$15 - 90 \times 10^{-8}$
<b>Grafite</b>	10 - 100
<b>Aluvião e areias</b>	10 - 800
<b>Argilas</b>	1 - 100
<b>Argila (seca)</b>	50 - 150
<b>Solo (40% argila)</b>	8
<b>Solo (20% argila)</b>	33

Neste trabalho vai-se efetuar a monitorização do tratamento do solo através de variações da sua resistividade eléctrica, conforme se explicará no capítulo 4.

## Capítulo 3

### Materiais e principais métodos experimentais

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se as principais características dos materiais utilizados nos trabalhos experimentais. Parte das características tiveram de ser medidas em laboratório, por essa razão também se descrevem os procedimentos realizados para estes casos.

#### 3.2 Areia

O material arenoso utilizado foi uma areia comercial, cuja referência é APAS 20. Na Figura 3.1 pode ver-se a areia e em anexo pode ser consultada a sua ficha técnica.



Figura 3.1 - Areia APAS 20

##### 3.2.1 Caracterização física

A densidade das partículas sólidas ( $G_s$ ) da areia é 2,68. Quanto à sua descrição petrográfica, é uma areia quartzosa com dureza elevada, constituída por elementos rolados de forma alongada, textura granoblástica, poligonal e heterogranular, apresenta minerais de Quartzo, Zircão e Turmalina.

Segundo a classificação unificada dos solos é uma areia mal graduada SP, baseada na curva granulométrica apresentada na Figura 3.2.

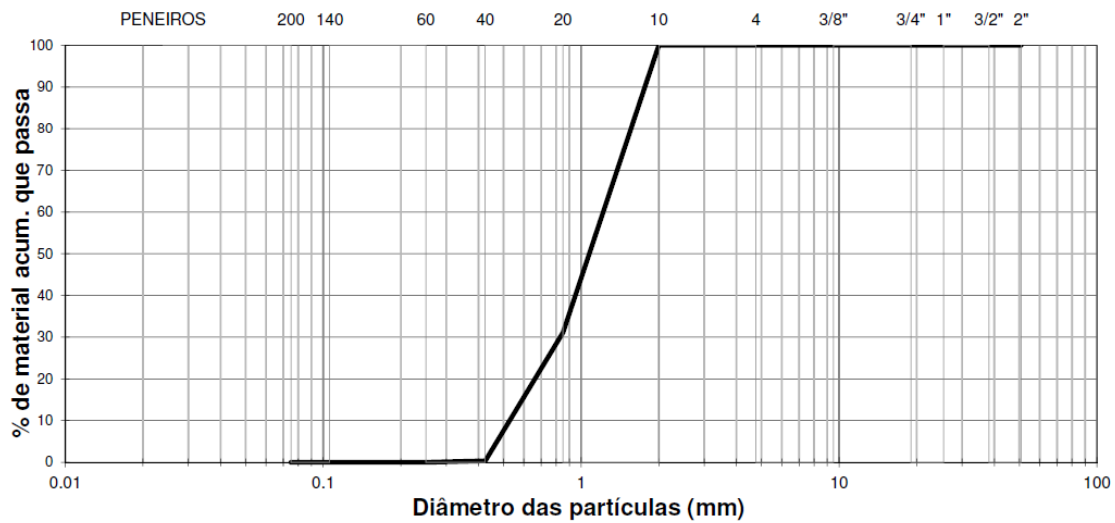


Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia

### 3.2.2 Cálculo da compacidade relativa da areia

A realização de ensaios com a areia obriga a que seja definido um valor do índice de vazios e um procedimento de montagem para que este seja respeitado em todas as amostras preparadas em laboratório. Para essa definição foi importante o conhecimento da compacidade relativa da areia em função do índice de vazios, estabelecendo-se que as amostras seriam montadas com o índice de vazios para o qual a compacidade relativa é 50% (amostras nem muito soltas, nem muito densas).

#### 3.2.2.1 Procedimento experimental

Com o objetivo de calcular a compacidade relativa da areia ( $D_r$ ), através da Equação (8), foi necessária a determinação dos índices de vazios máximo ( $e_{max}$ ) e mínimo ( $e_{min}$ ). Estes foram determinados de forma experimental através de amostras de areia seca montadas a seco num molde cilíndrico Proctor com as características apresentadas na Tabela 3.1.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (8)$$

Tabela 3.1 - Características do molde cilíndrico Proctor

<b>Diâmetro do molde</b>	116,6 mm
<b>Altura do molde</b>	101,2 mm
<b>Volume do molde</b>	937,9 cm <sup>3</sup>
<b>Massa do topo</b>	1240 g

A Figura 3.3 mostra a fotografia do molde Proctor usado, com a respectiva alonga. Esta serve normalmente para facilitar o enchimento com solo do molde até ao topo, neste caso serviu também para conter a massa colocada no molde para confinar a areia e para evitar a saída de areia durante a vibração do molde.

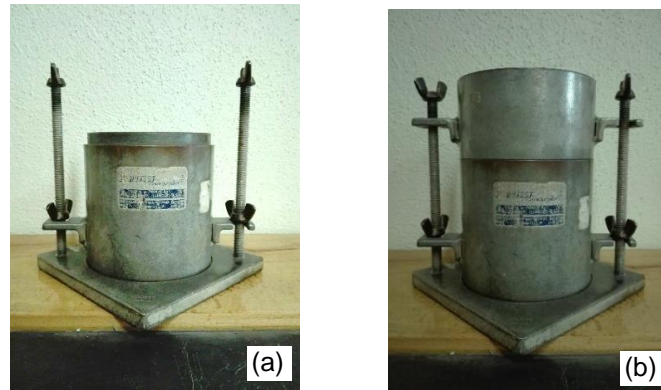


Figura 3.3 - Molde cilíndrico: (a) sem e (b) com a alonga

O peso volúmico seco do solo ( $\gamma_d$ ) é calculado a partir dos valores da massa de areia no molde ( $m$ ) e do volume interior do molde ( $V = 937,9 \text{ cm}^3$ ). Para tal usou-se a Equação (9). O índice de vazios foi calculado através do peso específico da areia ( $G_s = 2,68$ ), peso volúmico seco do solo e da água ( $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ), que se relacionam através da Equação (10).

$$\gamma_d = \frac{W}{V} = \frac{m \times g}{V} \quad (9)$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \Leftrightarrow e = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1 \quad (10)$$

O valor da massa de areia no molde, para a determinação do índice de vazios máximo ( $e_{\text{max}}$ ), foi obtido através da média de 3 tentativas. O processo consistiu em colocar areia seca no molde de forma cuidadosa e diminuir o mais possível a altura de queda da areia no molde, o  $e_{\text{min}}$  é muito sensível ao método de colocação da areia no molde. Assim definiu-se que a arrumação das partículas obtida através deste processo seria a menos densa.

Na determinação índice de vazios mínimo ( $e_{\text{min}}$ ) utilizou-se uma das amostras de areia montadas a seco anteriores, colocou-se a alonga do molde e para confinar a amostra colocou-se uma massa no topo (Figura 3.4 (a)). A amostra foi para uma mesa vibratória (CONTROLS C195,  $f=50\text{Hz}$ ) (Figura 3.4 (b)) e foi submetida à seguinte sequência de procedimentos:

- 19 segundos de vibração;
- Reenchimento do molde até ao topo;
- 15 segundos de vibração;
- Reenchimento do molde até ao topo;
- 15+15 segundos de vibração.

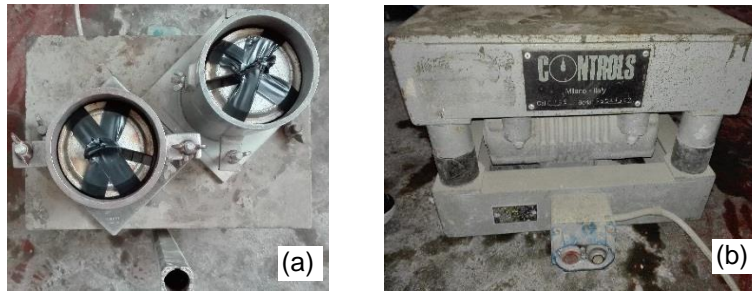


Figura 3.4 - (a) Topo do molde com uma massa e alonga e (b) Mesa vibratória

No último passo do procedimento verificou-se que o nível de areia seca no molde se tinha mantido, assim definiu-se que a arrumação das partículas obtida, através deste processo, seria a mais densa possível, e por isso a massa de areia nesta amostra utilizou-se para o cálculo de  $e_{min}$ .

### 3.2.2.2 Resultados

Os valores do índice de vazios esperados para a areia em estudo são entre 1,05 e 0,57 para  $e_{max}$  e entre 0,30 e 0,52 para  $e_{min}$  (Youd, T. L., 1973). A Tabela 3.2 mostra os resultados obtidos e pode concluir-se que o procedimento usado para o cálculo de  $e_{min}$  poderia ser melhorando, ou seja, ser repetido para uma mesa vibratória com características diferentes desta.

Tabela 3.2 - Dados medidos e calculados para a obtenção da compactidade relativa

	<b>Massa de areia (g)</b>	<b>Peso volúmico seco (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Índice de vazios (-)</b>
<b>Areia muito solta</b>	1352,6	14,42	$e_{max} = 0,858$
<b>Areia muito densa</b>	1582,5	16,87	$e_{min} = 0,588$

Através da equação (8) apresentada anteriormente foi possível obter o índice de vazios igual a 0,723 para uma compactidade relativa de 50%. Este valor de índice de vazios foi o adotado para a areia em todos os ensaios que se seguiram. Assim sendo, a forma utilizada para garantir que estes valores eram respeitados em cada ensaio foi através da relação entre o volume ( $V$ ) e a massa ( $m_s$ ) apresentada na Equação (11), esta foi deduzida através das Equações (9) e (10)

$$\gamma_d = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w = \frac{W_s}{V} \rightarrow m_s(V) = \frac{V}{g} \times \frac{G_s}{1+e} \gamma_w \quad (11)$$

### 3.2.3 Determinação da resistividade elétrica do solo

Prepararam-se amostras de solo saturadas com fluido com concentração variável de lixiviante, de modo a obter a relação entre a concentração de solução aquosa de água lixiviante e o valor de resistividade elétrica do solo ( $L\%(\rho)$ , sendo  $\rho$  a resistividade elétrica).

O estudo foi feito para pH ácido, básico e neutro pois sabe-se que este parâmetro afeta a condutividade elétrica do fluido intersticial, inversamente proporcional à resistividade elétrica. Nas soluções ácidas existe uma maior concentração de íons  $H^+$ , do que nas soluções básicas, e os cátions aumentam a condutividade elétrica. Esta relação entre pH e condutividade elétrica não é diretamente proporcional, pois o pH apenas considera os cátions  $H^+$ , deixando de fora todos os outros íons existentes no fluido que aumentam ou reduzem a condutividade.

#### 3.2.3.1 Procedimento experimental

As funções  $L\%(\rho)$  foram definidas a partir do ajuste de uma função exponencial a valores obtidos de forma experimental. Decidiu-se medir a resistividade elétrica para seis soluções aquosas de água lixiviante com concentrações diferentes, preparadas por diluição em volume (100%, 50%, 10%, 5%, 1% e 0%). Cada concentração foi estudada para três intervalos de valor de pH (1 a 3, 7 a 8 e 10 a 13), perfazendo assim o total de 18 amostras.

As amostras foram montadas em moldes cilíndricos com 25 mm de diâmetro interior, espessura 1 mm e 60 mm de altura. Cada molde era constituído por um tubo em PVC vedado dos dois lados com geotêxtil. O geotêxtil escolhido é muito permeável, permitindo a entrada da solução na amostra com facilidade, com uma malha que impedia a saída de areia da amostra e foi preso ao tudo de PVC com alguma tensão para evitar alterações no volume da amostra (Figura 3.5).



Figura 3.5 - Amostra de areia em molde cilíndrico

Observou-se em laboratório que os moldes não eram cilindros perfeitos e, como as amostras eram pequenas, para garantir o índice de vazios pretendido o procedimento adotado para a determinação do volume e massa de cada amostra foi o seguinte:

- Vedou-se o molde de um dos lados usando fita adesiva, de modo a torná-lo estanque durante os passos seguintes, e mediu-se a massa do molde  $i$  ( $m_{v,i}$ );
- Encheu-se o molde de água e mediu-se a massa do molde ( $m_{c,i}$ );
- Calculou-se o volume de água, através da Equação (12), e definiu-se que este é igual ao volume do molde;
- Calculou-se a massa de areia a colocar em cada molde para obter-se uma amostra com o índice de vazios igual a 0,723, de acordo com a Equação (11).

$$\rho_{\text{água}} = \frac{m_{c,i} - m_{v,i}}{V_i} \rightarrow V_i = \frac{m_{c,i} - m_{v,i}}{\rho_{\text{água}}} \quad (12)$$

As amostras foram montadas obedecendo aos passos seguintes:

- Vedou-se a base do tubo com o geotêxtil recorrendo a fita adesiva (Figura 3.6 (a));
- Colocou-se a massa de areia respetiva ao molde em causa medida através da Equação (11), com o auxílio de um aparelho vibratório (Figura 3.6 (b));
- Vedou-se o topo do tubo, novamente, com o geotêxtil recorrendo a fita adesiva (Figura 3.6 (c));
- Colocou-se um fio na amostra para facilitar o seu manuseamento sem entrar em contacto com o fluido de imersão (Figura 3.6 (d)).



Figura 3.6 - Processo de montagem de uma amostra de areia

As amostras foram mergulhadas na solução aquosa de água lixiviante em frascos herméticos, evitando a alteração da concentração ou do pH através de trocas com o ambiente exterior. As amostras ficaram nos frascos durante algumas semanas para que ficassem saturadas.



Figura 3.7 - Frascos herméticos com as 18 amostras mergulhadas na solução de água lixiviante



Para medir a resistividade eléctrica inserira-se dois pregos de aço inoxidável e usou-se um multímetro (Keithley, com precisão 0,05 Ω) (Figura 3.8) para medir a resistência eléctrica. O procedimento usado para a determinação da resistividade eléctrica nas amostras foi o seguinte:

- Colocaram-se dois pregos afastados um do outro 3 cm (L), de cada extremidade da amostra 1,5 cm e enterrados cerca de 1,5 cm, como mostra a Figura 3.9 (a), este passo foi sempre que possível realizado com a amostra mergulhada para evitar alterações do grau de saturação;
- Ligaram-se os fios eléctricos do multímetro aos pregos (Figura 3.9 (b)) e com a função de medir resistência eléctrica mediu-se ao fim de 30 e 60 segundos ( $R_{30,i}$  e  $R_{60,i}$  respetivamente);
- Calculou-se a resistividade eléctrica de cada amostra ( $\rho_i$ ) através da Equação (13).

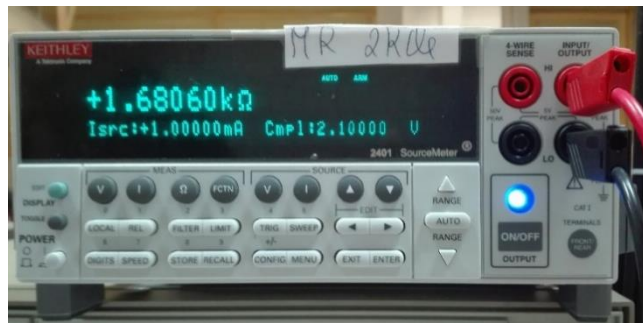


Figura 3.8 - Multímetro Keithley

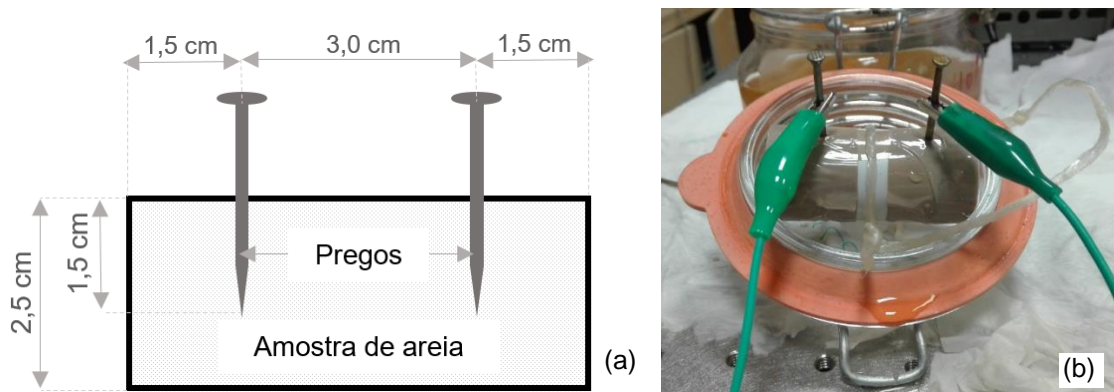


Figura 3.9 - Esquema (a) e fotografia (b) da medição d resistência eléctrica de uma amostra de solo

$$\rho_i = \frac{R_{30,i} - R_{60,i}}{2} L \quad (13)$$

A resistência eléctrica foi medida em dois intervalos de tempo distintos (30 e 60 segundos) porque se observou algum efeito capacitivo do solo. Considerou-se a média dos dois valores.

### 3.2.3.2 Resultados

Na Tabela 3.3 estão apresentadas as resistividades eléctricas medidas em cada amostra. Com estes valores tentou-se ajustar funções  $L\%(\rho)$  minimizando o erro e chegaram-se aos gráficos da Figura 3.10.

É de salientar que o ajuste para as concentrações de 50% e de 10% para as funções  $L\%(p)$  (pH 7-8) e  $L\%(p)$  (pH 10-13), respetivamente, apresentaram maior erro que as outras concentrações.

Tabela 3.3 - Resistividade elétrica das amostras

Resistividade elétrica das amostras em $\Omega \cdot m$						
	Concentração da solução aquosa de água lixiviante					
pH	0%	1%	5%	10%	50%	100%
1-3	75,6	57,5	41,0	39,6	25,5	16,6
7-8	534,6	360,0	145,3	51,4	36,2	9,0
10-13	785,3	420,6	263,2	248,0	35,6	30,0

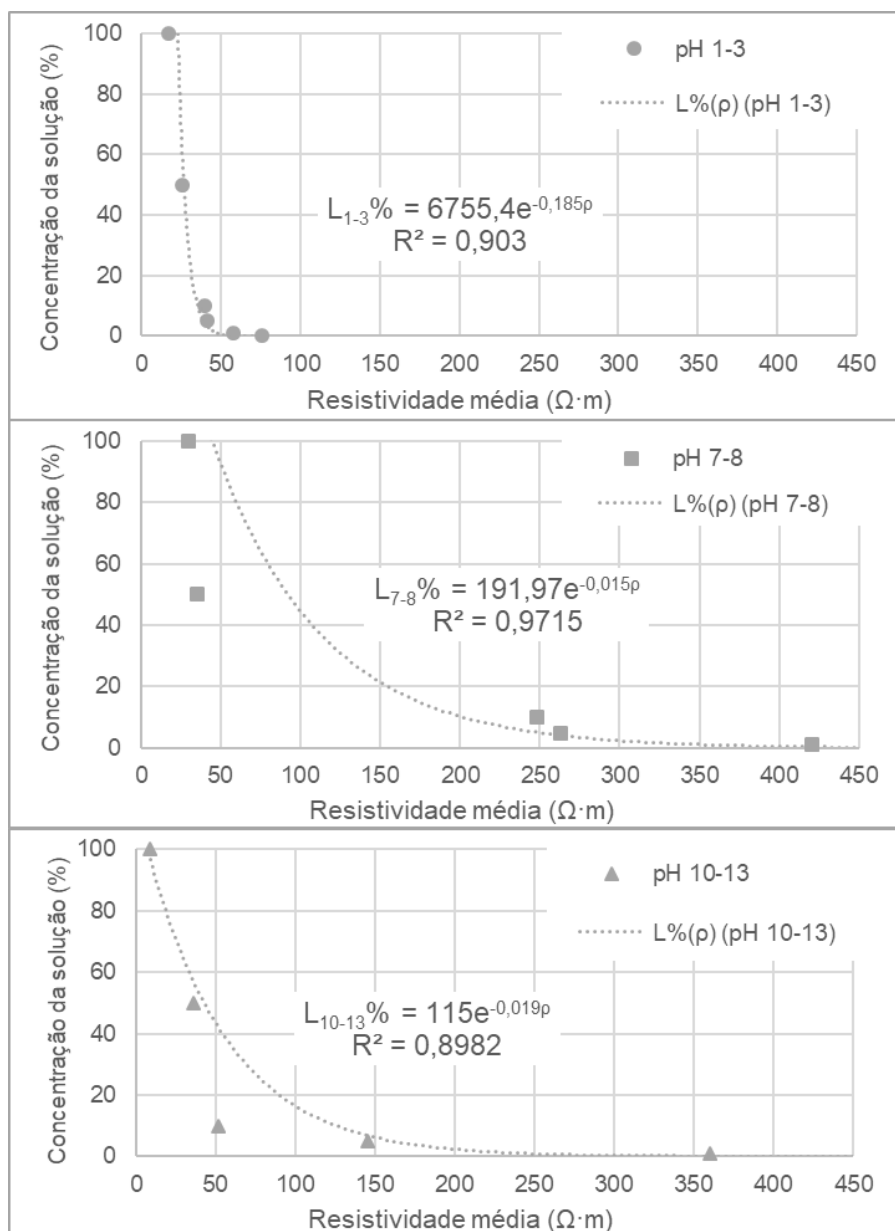


Figura 3.10 - Gráficos de  $L\%(p)$  na areia para diferentes pH

### 3.2.4 Determinação da permeabilidade hidráulica

A determinação do coeficiente de permeabilidade hidráulica ( $k_h$ ) foi feita através de um ensaio de carga constante ( $\Delta h$ ) no permeâmetro, medida num percurso com 10,1 cm (L). A amostra de areia foi colocada na câmara do permeâmetro, com 962,59 cm<sup>3</sup> de volume (23,0 cm de altura e 7,3 cm de diâmetro), de maneira a ficar com o valor do índice de vazios de 0,723. Colocou-se 1496,94 g de areia na câmara.

O coeficiente de permeabilidade hidráulica foi calculado pela lei de Darcy, considerando o gradiente hidráulico constante (Equação (14)).

$$Q_h = k_h i A \rightarrow k_h = \frac{Q_h}{i A} = \frac{Q_h L}{\Delta h A} \quad (14)$$

Mediu-se o caudal que passava no permeâmetro ( $Q_h=18,48$  cm<sup>3</sup>/s) para uma carga constante ( $\Delta h=20,7$  cm) e assim se chegou ao coeficiente de permeabilidade hidráulica de  $2,15 \times 10^{-3}$  m/s.



Figura 3.11 - Permeâmetro

### 3.2.5 Determinação da permeabilidade eletrosmótica

#### 3.2.5.1 Procedimento experimental

A determinação da permeabilidade eletrosmótica ( $k_e$ ) foi realizada num edómetro adaptado por Santos (2012) para incluir eléctrodos nas pedras porosas do topo e da base. O edómetro usado (Figura 3.12) tem válvulas para entrada e saída da água e passagens para fios elétricos, que ligavam aos eléctrodos a fonte de alimentação elétrica (descrita no capítulo 4). Os eléctrodos consistem em folha de prata com 7% de cobre, com 0,15 mm de espessura e 2 cm de lado. O ânodo ficou no topo e o cátodo na base.



Figura 3.12 - Edómetro onde se vêem as pedras porosas e os elétrodos de prata

O ensaio foi realizado num anel endométrico com  $39,27 \text{ cm}^3$  de volume (2 cm de altura e 5 cm de diâmetro), onde se montou uma amostra de areia com índice de vazios 0,723, ou seja, 61,07 g de massa de areia. Em seguida a amostra foi saturada e manteve-se uma altura de água contante no edómetro durante todo o ensaio, garantida através de uma fonte de alimentação de água com carga constante e de uma purga. Foi aplicada na amostra uma tensão vertical de 12 kPa para garantir o contato adequado entre os elétrodos e o solo. A Figura 3.13 ilustra a descrição do sistema.

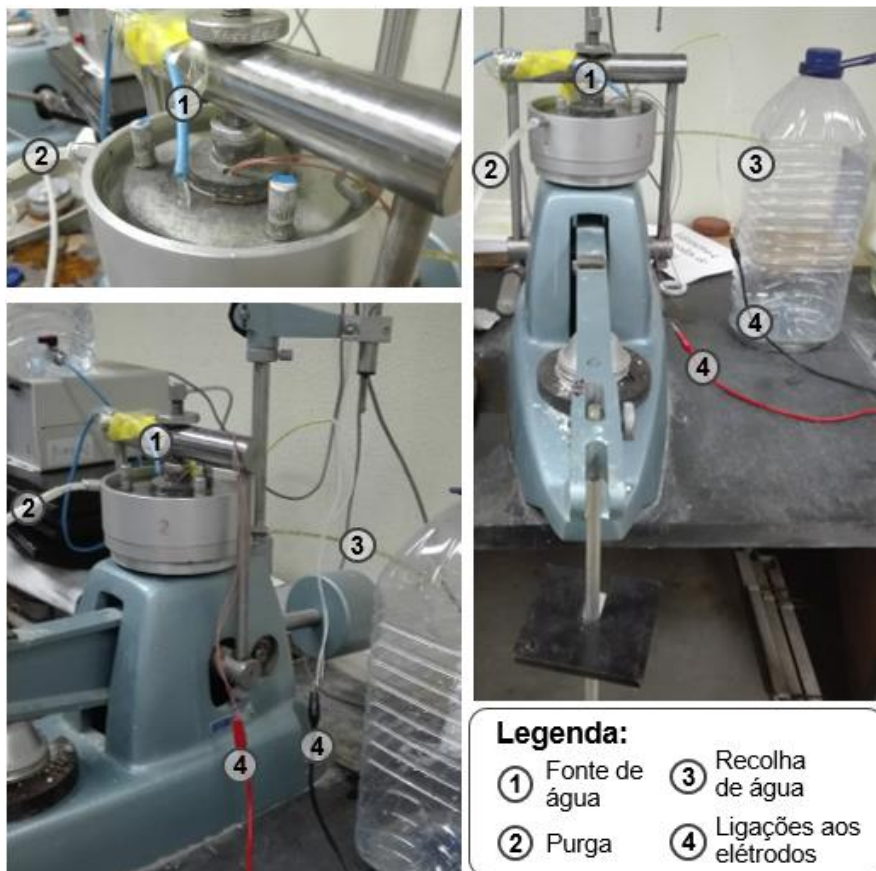


Figura 3.13 - Fotografias do ensaio eletrocinético

Os passos deste ensaio foram os seguintes:

- Aplicou-se uma diferença de potencial elétrico nos elétrodos, decidiu-se realizar o ensaio para 0,00; 2,50; 4,00 e 6,00 V/cm;
- Medir-se a massa que água ( $\Delta m_i$ ) saída pela zona de recolha de água durante um determinado intervalo de tempo ( $\Delta t=120$  minutos);
- Calculou-se o caudal de saída da água através da Equação (15).

$$Q_i = \frac{\Delta m_i}{\rho_{\text{água}} \Delta t} \quad (15)$$

Para o tratamento dos dados utilizou-se a Equação(16), que considera que o caudal total é a soma do caudal hidráulico ( $Q_h$ ) e elétrico ( $Q_e$ ), para o caso da diferença de potencial elétrico de 0,00 V/cm considerou-se que o caudal elétrico era zero, por isso, para este ensaio, o caudal hidráulico considerado para as outras diferenças de potencial elétrico foi o caudal total de 0,00 V/cm.

$$Q = Q_h - Q_e = A \left[ \left( \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial x} \right) - \left( k_e \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (16)$$

### 3.2.5.2 Resultados

O coeficiente de permeabilidade elétrico ( $k_e$ ) foi calculado através da Equação(17), onde a área (A) é 19,6 cm<sup>2</sup>, a diferença de potencial elétrico é  $dV/dx$  e o caudal elétrico ( $Q_e$ ) é o definido anteriormente.

$$Q_e = A \left( k_e \frac{\partial V}{\partial x} \right) \rightarrow k_e = \frac{Q_e}{A \frac{dV}{dx}} \quad (17)$$

A Tabela 3.4 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3.4 - Dados e resultados do ensaio eletrocinético

dV/dx (V/cm)	$\Delta m$ (g)	Caudal total (cm <sup>3</sup> /s)	Caudal elétrico (cm <sup>3</sup> /s)	$k_e$ (m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	$k_h/k_e$ (V/m)
0,00	533,25	7,41×10 <sup>-2</sup>	0,00	-	-
2,50	163,97	2,28 ×10 <sup>-2</sup>	5,13 ×10 <sup>-2</sup>	1,04 ×10 <sup>-7</sup>	20600
4,00	205,56	2,86 ×10 <sup>-2</sup>	4,55 ×10 <sup>-2</sup>	5,79 ×10 <sup>-8</sup>	37200
6,00	355,78	4,94 ×10 <sup>-2</sup>	2,46 ×10 <sup>-2</sup>	2,09 ×10 <sup>-8</sup>	103000

O valor esperado para a razão entre o coeficiente de permeabilidade hidráulico e o eletrosmótico, consultado na bibliografia para outros solos arenosos, mais finos que a areia APAS 20 (Tabela 2.1 do capítulo 2) está entre 233 e 244 V/m. Não considerando os dados recolhidos para a diferença de

potencial elétrico de 6,00 V/cm por ser claramente diferente das anteriores, chega-se assim ao coeficiente permeabilidade eletrosmótica de  $8,04 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  e  $k_r/k_e=26500 \text{ V/m}$ .

### 3.3 Argila

#### 3.3.1 Caracterização física da argila

O material argiloso utilizado foi uma argila comercial, uma caulinite branca, cuja fotografia se apresenta na Figura 3.14. Este material foi caracterizado por Gingine (2017), pelo que aqui só se apresentam os principais resultados.

Segundo a classificação unificada dos solos é este material é um silte elástico, MH. Na Figura 3.15 é apresentada a sua curva granulométrica.



Figura 3.14 - Caulinite

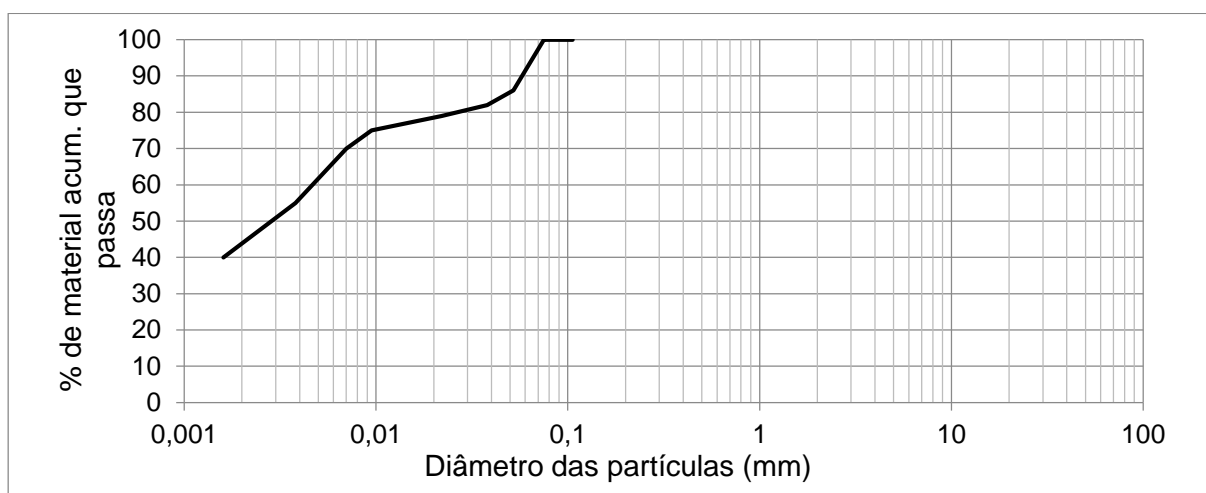


Figura 3.15 - Curva granulométrica da argila

A Tabela 3.5 apresenta propriedades importantes para a utilização deste solo. Segundo a classificação da fração argilosa quanto à atividade, é uma argila inativa.

Tabela 3.5 - Propriedades da caulinite (Gingine, 2017)

Propriedades	Valor
Densidade das partículas sólidas (Gs)	2,61
Limite de liquidez ( $w_L$ )	52 %
Limite de plasticidade ( $w_P$ )	30 %
Índice de plasticidade IP	22

O principal mineral que constitui esta argila é a caulinite, por essa razão confere-lhe a denominação, através de um ensaio de difração de raio X confirmou-se a existência dos minerais quartzo e moscovite.

### 3.3.2 Parâmetros da argila para o ensaio de EKT

A caulinite utilizada no ensaio de EKT de Gingine (2017) foi compactada com um teor em água de 25%, e com índice de vazios de 0,9, ou seja, com o peso volúmico seco de 13,48 kN/m<sup>3</sup>.

O índice de vazios e o teor em água escolhidos para a compactação da argila permitiram determinar os seus coeficientes de permeabilidade hidráulica e electrosmótica, que são 1,3×10<sup>-8</sup> m/s e 9,3 ×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/V/s respetivamente. As Figura 3.16 mostram as funções L%(ρ) para a argila. Foram ajustadas para as mesmas concentrações de solução aquosa de água lixiviante e para os mesmos valores de pH usados na areia em 3.2.3.1.

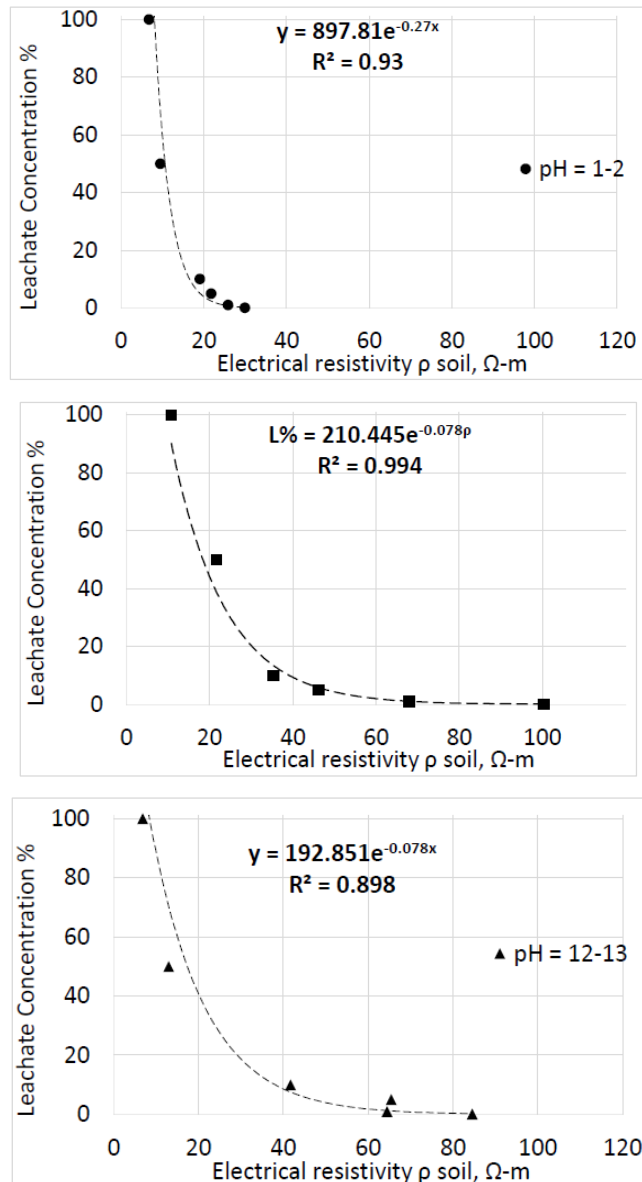


Figura 3.16 - Gráficos de L%(ρ) para na argila para diferentes pH (Gingine, 2017).

### 3.4 Fluidos intersticiais

Foram usados como fluidos intersticiais neste estudo a água da torneira, usada como fluido de controlo para se compreender o sistema criado, e a água lixiviante, para se perceber como é que a técnica descontamina os solos em estudo. A Figura 3.17 é uma fotografia de uma gota de cada fluido.



Figura 3.17 - Gotas de água da torneira e água lixiviante

Os gráficos da Figura 3.18 mostram as concentrações de iões para vários pontos de recolha de água da torneira, retirados de Machete (2015). Os resultados apresentados correspondem à zona das Avenidas Novas (Praça do Saldanha), que é o ponto de recolha mais próximo do Laboratório de Geotecnia do IST e foi por isso tomado como exemplo.

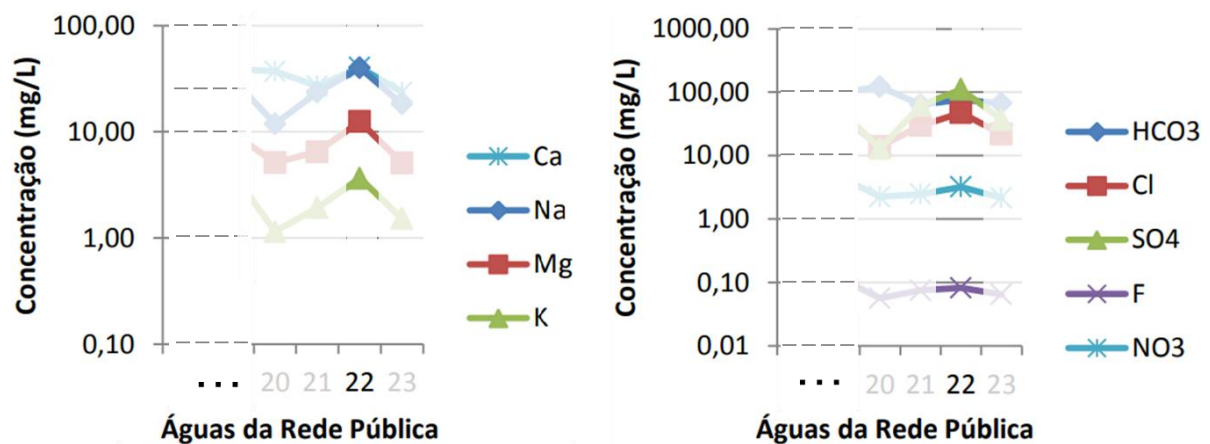


Figura 3.18 - Concentração de iões e água da torneira (Machete, 2015)

A Tabela 3.7 apresenta a composição, para duas datas diferentes de colheita, da água lixiviante utilizada neste estudo, a tabela foi adaptada de Gingine (2017).



Tabela 3.6 - Parâmetros da água lixiviante (Gingine, 2017)

Parâmetro		Maio 2015	Novembro 2015
<b>Cálcio</b>	(mg Ca/l)	74	152
<b>Sódio</b>	(mg/l)	3382	2432
<b>Magnésio</b>	(mg Mg/l)	90	92
<b>Potássio</b>	(mg K/l)	3183	2420
<b>Bicarbonato</b>	(HCO <sub>3</sub> mg/l)	22,418	880
<b>Cálcio</b>	(Cl mg/l)	2,82	1,21
<b>Sulfates</b>	(mg SO <sub>4</sub> /l)	4400	4100
<b>Fluorites</b>	(mg F/l)	0,77	0,44
<b>Nitrates</b>	(mg NO <sub>3</sub> /l)	48	38

A Tabela 3.7 apresenta o quociente entre a concentração de íões da água lixiviante e a da torneira, dando assim uma ideia da ordem de grandeza das concentrações dos íões entre os dois fluidos.

Tabela 3.7 - C (água lixiviante)/ C (água da torneira)

<b>Ca<sup>2+</sup></b>	2,8	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	145,6
<b>Na<sup>+</sup></b>	72,7	<b>Cl<sup>-</sup></b>	83,0
<b>Mg<sup>+</sup></b>	6,1	<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	40,5
<b>K<sup>+</sup></b>	800,4	<b>F<sup>-</sup></b>	6,7
		<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	13,4



## Capítulo 4

### Caixa de tratamento eletrocinético

#### 4.1 Introdução

Este capítulo explica os vários elementos que constituem caixa de tratamento eletrocinético, assim como o seu funcionamento. Explicam-se também as variações realizadas ao longo do ensaio, as medições e cálculos para a obtenção de resultados e a identificação e descrição dos testes e subtestes realizados na caixa de tratamento eletrocinético.

#### 4.2 Descrição da caixa de tratamento eletrocinético

Para a realização de um ensaio de tratamento eletrocinético (EKT), foi projetado um sistema à escala de laboratório. Este consiste na caixa de EKT, numa fonte de alimentação elétrica e num sistema de alimentação e recolha de água. A Figura 4.1 mostra uma fotografia legendada de um ensaio de EKT a decorrer.

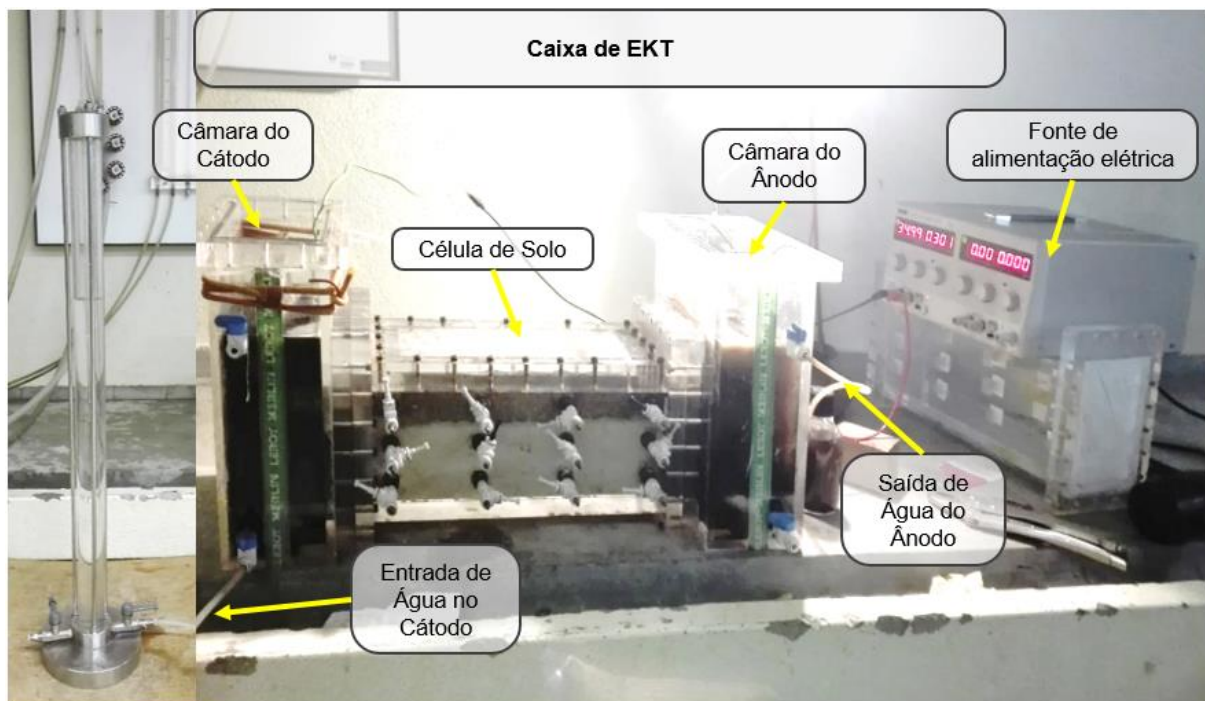


Figura 4.1 - Elementos do ensaio da caixa de tratamento eletrocinético

A caixa de EKT é constituída por três compartimentos em Perspex e destacáveis: uma célula de solo no meio e duas câmaras para os eléctrodos e fluídos. A Figura 4.2 apresenta um esquema da caixa de EKT onde é possível observar-se os compartimentos da caixa e como se ligam entre si.

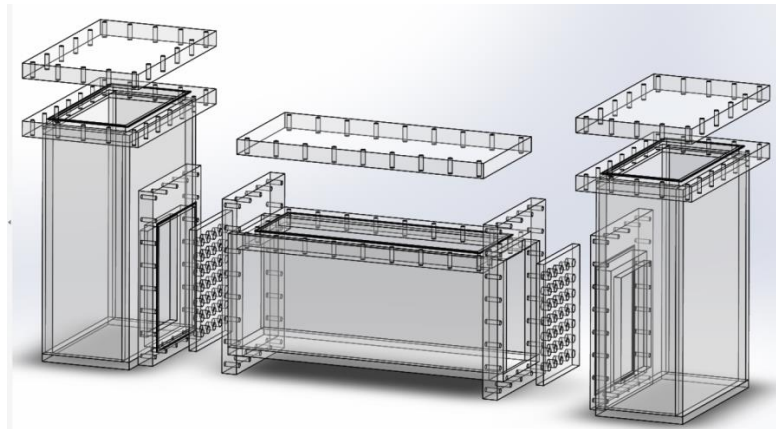


Figura 4.2 - Esquema da caixa de tratamento eletrocinético

A célula de solo tem 350 mm de comprimento, 100 mm de profundidade e 150 mm de altura. A célula tem 12 furos em cada um dos lados, estes formam uma grelha espaçada de 100 mm ao longo do comprimento e 40 mm ao longo da altura. Os furos servem para serem colocados os elétrodos de monitorização do solo. A célula está dividida em quatro zonas onde foram medidos e comparados os vários parâmetros, na Figura 4.3 estão identificadas as zonas A, B, C e D.

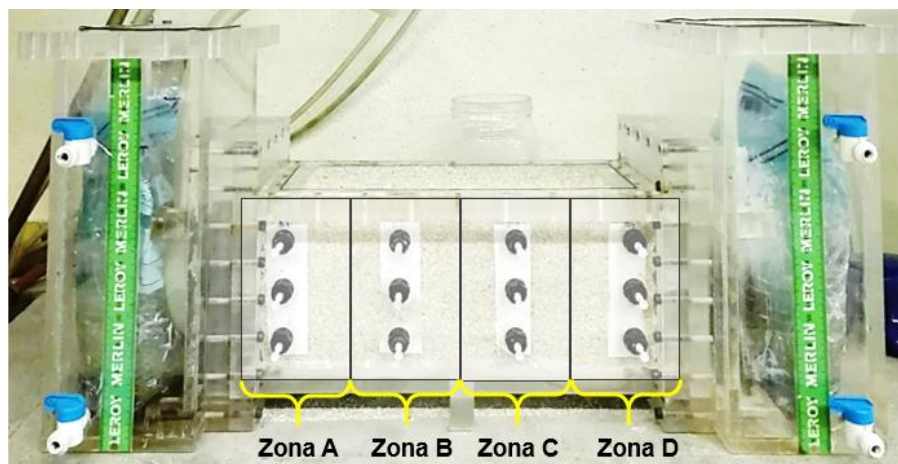


Figura 4.3 - Identificação das quatro zonas da caixa de EKT

As câmaras para os elétrodos têm capacidade para cerca de 6 litros de fluido, uma pequena estrutura para manter os elétrodos estáveis, duas válvulas, uma no fundo e outra no topo, para facilitar a entrada e saída de fluidos nas camaras e está separada da célula de solo através de uma placa de Perspex com furos e geotêxtil.

Os elétrodos usados foram placas de grafite e aço. A placa de grafite foi usada como elétrodo do cátodo, tem dimensões de 164 mm x 124 mm x 15 mm. A placa de aço foi usada como elétrodo do ânodo, tem dimensões de 160 mm x 160 mm x 5 mm. A Figura 4.4 mostra os elétrodos.

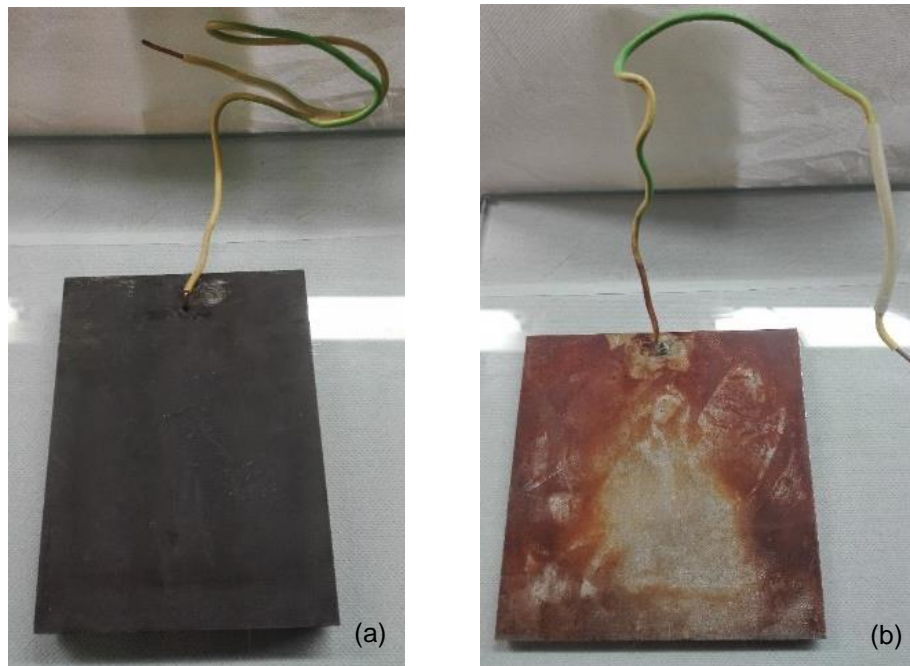


Figura 4.4 - Placas de (a) grafite e de (b) aço

Os elétrodos de monitorização do solo utilizados são feitos de níquel com 4 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (Figura 4.5). Foram inseridos nos furos laterais da caixa como mostrado na figura, a uma profundidade de cerca 30 mm no solo através das entradas laterais.

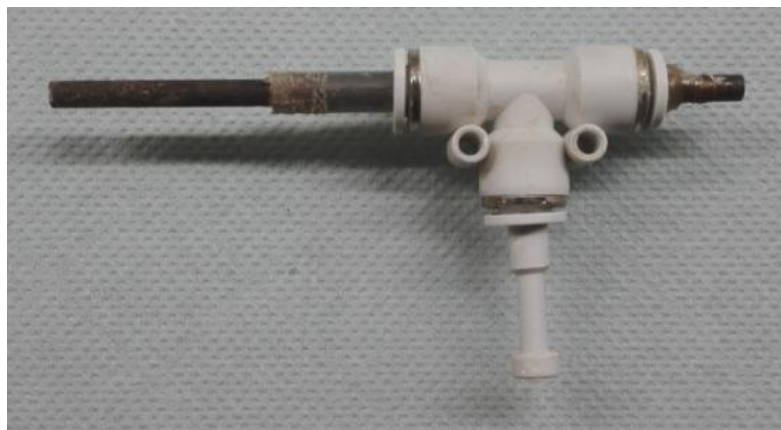


Figura 4.5 - Elétrodos de monitorização do solo

A fonte de alimentação elétrica usada nos ensaios foi o gerador elétrico TTi EX354RD Dual Power Supply de 280 W (fotografia na Figura 4.6), que tem duas fontes de alimentação elétrica, que conjugadas permitem fornecer até 70V, ou seja, um gradiente máximo de 2V/cm na caixa de EKT.

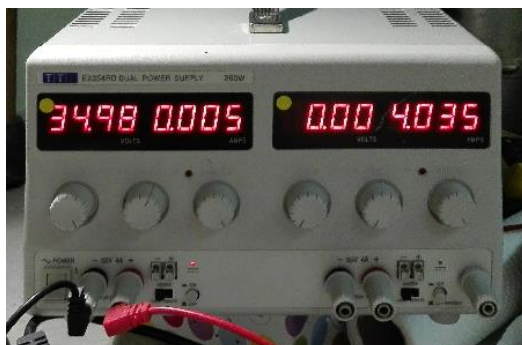


Figura 4.6 - Fonte de alimentação elétrica

A fonte de alimentação elétrica foi ligada a um programador de tempo (Figura 4.7) para que se pudesse fornecer à caixa de EKT corrente intermitente, ou seja, poder ser aplicada uma diferença de potencial elétrica constante ao solo em intervalos de tempo controlados. O intervalo de tempo adotado para a fonte foi 60 minutos ligada e 30 minutos desligada.



Figura 4.7 - Programador de tempo

O aparelho usado nos ensaios para medir diferenças de potencial elétrico foi o multímetro digital DT9205A (Figura 4.8) com máximo 1000 V para corrente contínua e com uma incerteza de  $\pm 0,1$  mV.

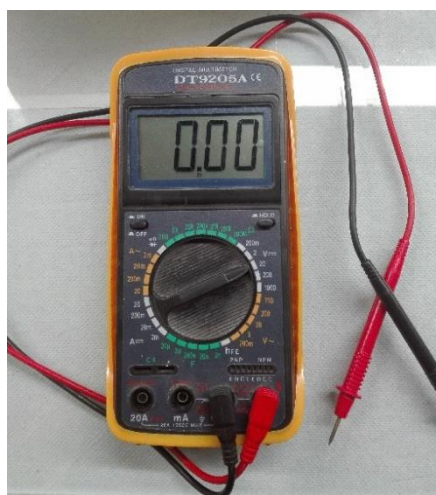


Figura 4.8 - Multímetro digital DT9205A

### 4.3 Variantes do ensaio de tratamento eletrocinético

Realizaram-se dois ensaios EKT, um em areia e o outro num meio estratificado constituído por uma camada de areia sobre uma camada de argila compactada. No ensaio de EKT variaram-se os procedimentos entre testes e subtestes, que se descrevem em seguida. As variações ao longo do ensaio previamente definidos e normalizados possibilitam a comparação e interpretação de resultados.

#### 4.3.1 Montagem das amostras

Foram usadas duas configurações de solo na caixa de tratamento eletrocinético: uma com apenas areia (Areia), e outra com dois estratos horizontais de solo, um de argila e um de areia (Areia + Argila), com espessura de 8 cm e 6 cm respetivamente. As propriedades de cada material estão detalhadas na Tabela 4.1. A Figura 4.9 mostra uma fotografia de cada configuração.

Tabela 4.1 - Detalhes de cada configuração de solo

	<b>Areia</b>	<b>Areia + Argila</b>	
	Areia	Areia	Argila
<b>Índice de vazios</b>	0,723	0,723	0,9
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	4763	2060	2652
<b>Massa seca (g)</b>	7407,1	3203,6	3643,6

A montagem da amostra de areia foi realizada de forma idêntica à montagem da amostra do permeâmetro. A argila da configuração Areia + Argila foi compactada para ser idêntica à estudada por Gingine (2017). Com o objetivo de garantir o índice de vazios pretendido (0,9) o estrato de argila foi compactado em três camadas e entre cada uma escurificou-se a argila (Figura 4.10) para garantir uma melhor adesão entre camadas, uniformizar o valor do índice de vazios no estrato e evitar caminhos preferenciais à passagem de fluídos.

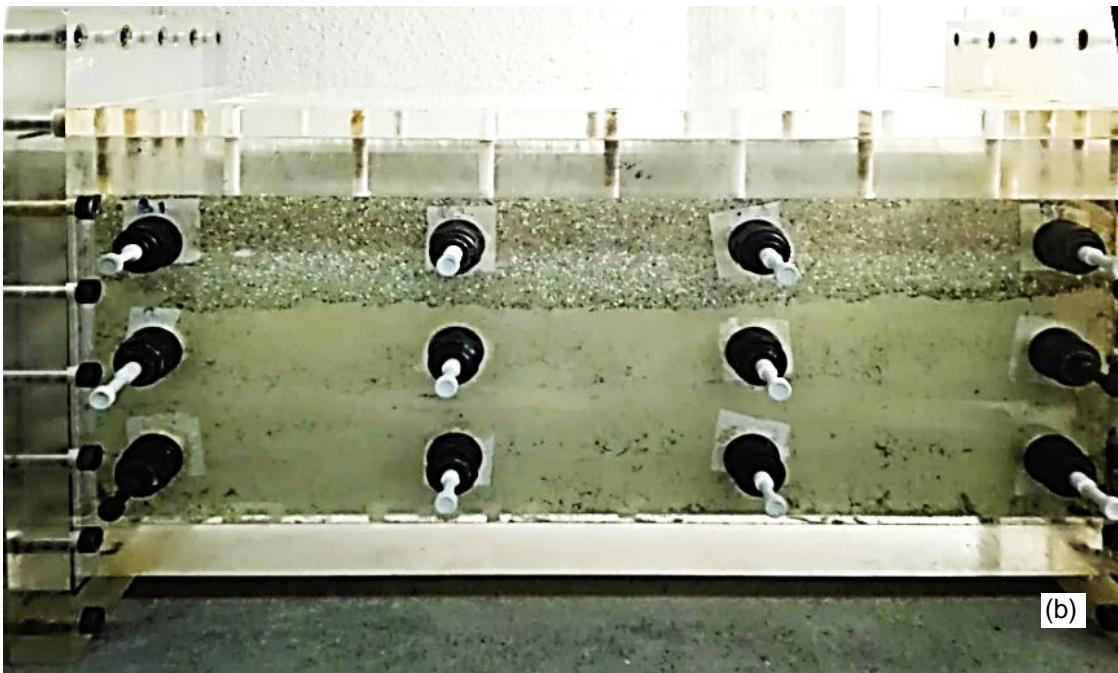
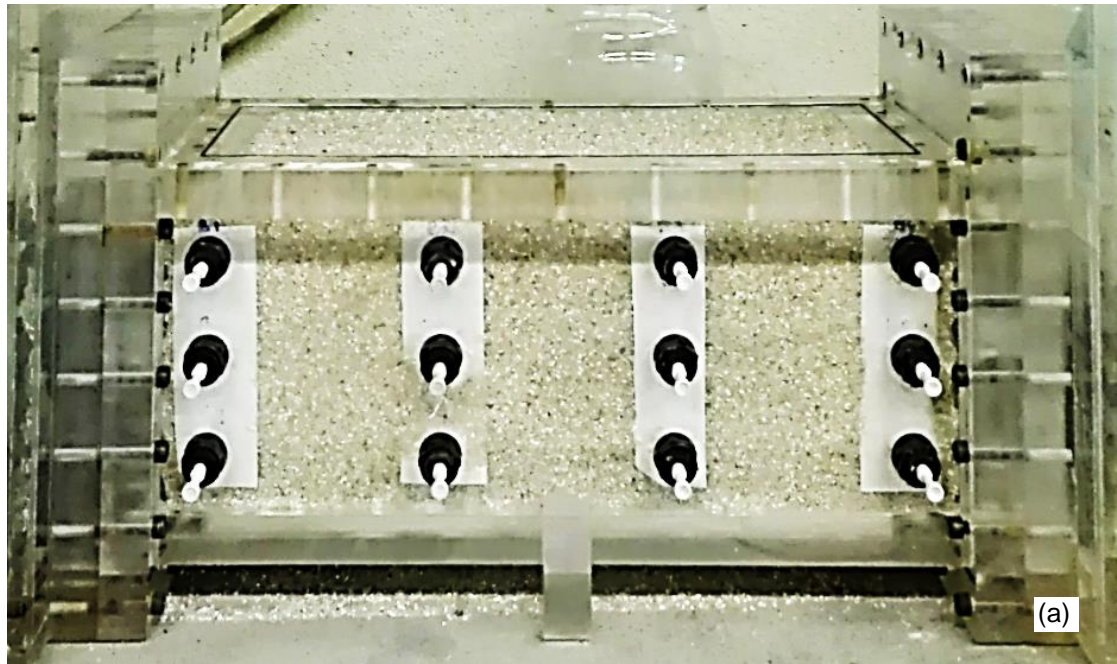


Figura 4.9 - Configurações do solo: (a) areia e (b) areia + argila



Figura 4.10 - Camada de argila escarificada (vista de topo)



### 4.3.2 Técnica da corrente intermitente

O elevado consumo de energia devido à alta condutividade elétrica dos fluídos contaminantes é o principal desafio quando se usa a técnica de eletrocinese para descontaminação (Reddy, 2010). A técnica de corrente intermitente (CI) foi utilizada neste estudo experimental com o objetivo de reduzir o consumo de energia e a corrosão de elétrodos. Esta técnica consiste na aplicação de tensão em intervalos previamente definidos, onde a fonte de alimentação elétrica se liga e desliga, em vez de estar ligada continuamente. A técnica foi aplicada com intervalos de 60 minutos com a fonte ligada alternados com 30 minutos com a fonte desligada, o gráfico da Figura 4.11 ilustra a técnica para uma tensão de 35 V.

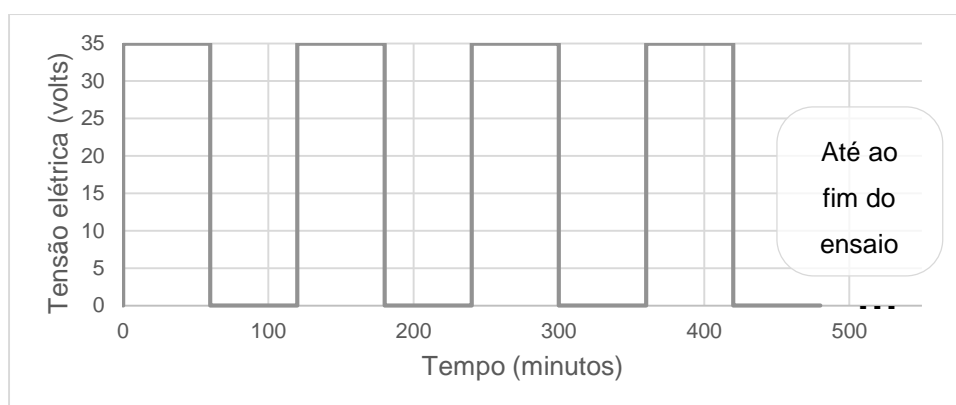


Figura 4.11 - Gráfico da tensão elétrica em função do tempo utilizando a técnica de CI

A literatura mostra que a técnica CI dá melhores resultados do que a fonte de energia constante convencional (Fourie et al., 2007; Glendinning et al., 2007; Micic et al., 2003, 2001; Hu et al., 2012; Wang e Liu, 2012). Mesmo depois de desligar o fornecimento de energia por um tempo definido, as cargas no solo ainda prevalecem e a difusão iônica pós-tratamento continua (Micic et al., 2003).

### 4.3.3 Técnica de tratamento melhorado

Durante o ensaio na de EKT, o pH nas câmaras dos elétrodos altera-se devido à oxidação e redução de água (Acar e Alshawabkeh, 1993). Esta alteração no pH afeta os processos eletrosmose e, portanto, é necessário controlar o pH. Utilizando a técnica de tratamento melhorado (TM), o fluido nas câmaras dos elétrodos é substituído por água de torneira em intervalos regulares, com o objetivo de manter o pH 7 perto dos elétrodos. A água da torneira foi usada para simular tratamentos à de escala de campo, onde água destilada ou ionizada não seria economicamente viável.

Este tipo de aprimoramento, que também é chamado de condicionamento, também pode ser feito pela adição de soluções tampão ácido e base (Gomes et al., 2012; Saichek e Reddy, 2003; Lysenko, 2014; Zhang et al., 2016) ou pelo uso de membranas de permuta iônica (Almeira O. et al., 2012; Gomes et al., 2012; Ottosen et al., 2012; Hansen et al., 2013, 2012; Kim et al., 2015). Em geral, pequenas concentrações de ácidos e bases são adicionadas, na prática, ao cátodo e ao ânodo, respetivamente,

para fornecer íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$  e neutralizar o pH. Quando estes íons são esgotados, o pH no ânodo volta a ácido e o pH perto do cátodo volta ao básico. Portanto, o pH deve ser monitorado regularmente durante o teste EKT.

Durante o teste realizado, a substituição da água na câmara foi feita adicionando lentamente a água pela abertura superior da câmara, e foi sendo removida ao mesmo tempo a água antiga pela válvula inferior. Este procedimento permitiu evitar o desenvolvimento repentino do gradiente hidráulico na água no solo provocado pelo esvaziamento total da câmara. No entanto, também promoveu a percolação de água, em especial na camada de areia que tem uma elevada permeabilidade.

#### 4.4 Grandezas medidas na caixa

##### 4.4.1 Caudal de entrada e saída da caixa

Foram instalados equipamentos para a medição do caudal de entrada e saída de água da célula do solo mantendo a altura de água constante nas câmaras dos eletrodos. Na câmara do cátodo, utilizou-se um sistema de entrada de água com base na garrafa de Mariotte para medir o volume de água que entra no sistema (Gingine, 2017). O sistema é constituído por duas saídas, uma para a câmara do cátodo e a outra aberta ao ar. A água ao entrar no solo a partir da câmara do cátodo é compensada pela água da garrafa de Mariotte. O caudal que sai da célula do solo para a câmara do ânodo provoca a subida do nível freático na câmara, e o volume de água em excesso é recolhido através de um tubo e armazenado numa garrafa coletora.

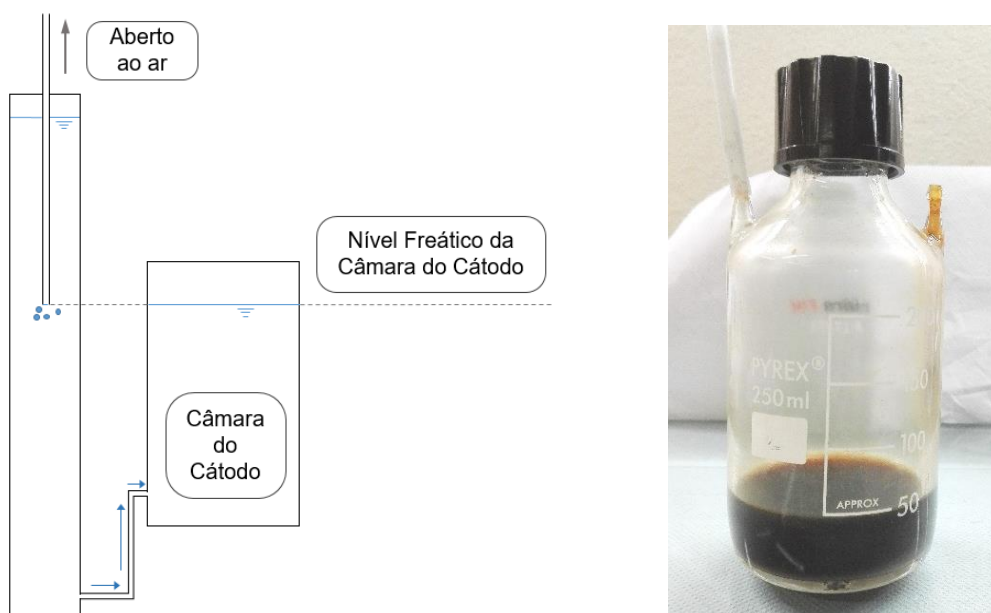


Figura 4.12 - (a) Garrafa de Mariotte e (b) garrafa coletora

#### 4.4.2 pH

O pH foi medido com papel de pH (Figura 4.13), utilizando uma pequena amostra recolhida através dos elétrodos de monitorização do solo. Colocou-se uma a duas gotas da solução no papel de pH. Este, através de reações químicas, muda de cor e a sua comparação com um espetro de cores chega-se ao valor do pH.



Figura 4.13 - Papel de pH

A recolha das gotas de solução apresentou dificuldades em ambos os solos. Na areia por vezes aconteceu escapar uma quantidade significativa de solução arrastando consigo algum material. Na argila as gotas da solução continham partículas de argila tornando o papel de pH um pouco mais acastanhado, podendo assim induzir em erro a classificação feita visualmente.

#### 4.4.3 Diferença de potencial elétrico

A diferença de potencial elétrico ( $\Delta V$ ) é aplicada aos elétrodos através da fonte de alimentação elétrica. Foram aplicadas diferenças de potencial elétrico nos ensaios de 35 e 70 V. Uma vez que o comprimento da célula do solo é 35 cm, estas duas diferenças de potencial elétrico tinham como objetivo aplicar 1 e 2 V/cm respetivamente.

A diferença de potencial elétrico foi medida na caixa de EKT com o multímetro, descrito anteriormente neste capítulo, na função de voltímetro, entre o elétrodo do ânodo e a zona A, B, C, D e o elétrodo do cátodo. O esquema da Figura 4.14 ilustra as medições realizadas.

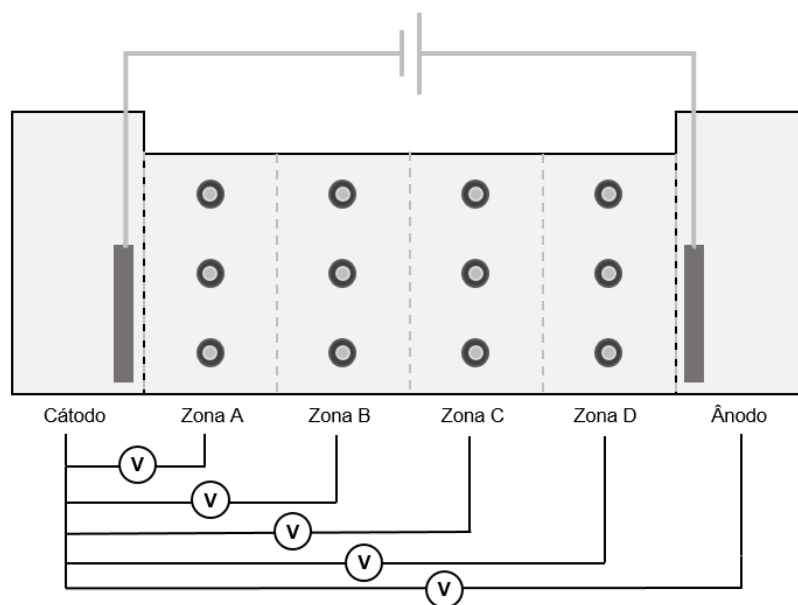


Figura 4.14 - Esquema das medições de diferença de potencial elétrico na caixa de EKT

#### 4.4.4 Intensidade da corrente elétrica

A intensidade da corrente elétrica ( $I$ ) foi medida com a fonte de alimentação de energia, que mostra a valor da corrente elétrica que passa em todo o sistema da caixa de EKT. Teria sido vantajoso confirmar este valor com o multímetro, na função de amperímetro, mas o aparelho não tinha precisão suficiente porque os valores de  $I$  em solos arenosos são muito baixos para as voltagens utilizadas.

Os ensaios realizados na caixa de EKT foram realizados para duas configurações de solo. Uma delas tinha um único solo homogêneo, por isso considerou-se que a corrente  $I$  se mantinha constante em todo o material. A outra configuração apresentava dos estratos de solos diferentes, então a distribuição de  $I$  foi feita como se tratasse de circuitos em paralelo, por isso deduziu-se a Equação, onde  $R_i$  é a resistência elétrica do material  $i$ ,  $I_i$  é a intensidade da corrente elétrica do material  $i$  e  $V_i$  é a diferença de potencial elétrico do material  $i$ . A relação entre as resistências elétricas dos dois materiais foi feita através das funções  $L\%(\rho)$  (secção 3.2.3.2 para a areia e 3.3.2 para a argila), resolvendo assim o último passo do sistema de equações. O material 1 corresponde à areia e o 2 à argila.

$$\begin{cases} V_1 = V_2 \rightarrow R_1 I_1 = R_2 I_2 \\ I = I_1 + I_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \\ I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \end{cases} \rightarrow \begin{cases} I_1 = 0,757 \times I \\ I_2 = 0,243 \times I \end{cases} \quad (18)$$

#### 4.4.5 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica ( $\rho$ ) na caixa de EKT foi calculada para cada zona da célula de solo da caixa. Primeiramente calculou-se a resistência elétrica entre cada zona, através da Equação (19), onde  $i$  e  $j$  são as zonas da caixa de EKT.

$$R_{i,j} = \frac{V_j - V_i}{I} \quad (19)$$

Em seguida utilizaram-se as equações da Tabela 4.2 para se chegar à resistividade elétrica de cada zona.

Tabela 4.2 - Equações da resistividade elétrica para cada zona da caixa de EKT

Zona A	$\rho_A = R_{A,B} \times 10 \text{ cm}$
Zona B	$\rho_B = R_{A,B} \times 5 \text{ cm} + R_{B,C} \times 5 \text{ cm}$
Zona C	$\rho_C = R_{A,B} \times 5 \text{ cm} + R_{B,C} \times 5 \text{ cm}$
Zona D	$\rho_D = R_{C,D} \times 10 \text{ cm}$

#### 4.4.6 Concentração de água lixiviante na célula de solo

A concentração de água lixiviante (L%) em cada zona da caixa de EKT foi calculada através das funções L%(ρ) definidas em 0 para a areia e em 3.3.2 para a argila. Utilizando os valores de pH medidos durante os ensaios foi possível ajustar as funções a cada zona.

Tabela 4.3 - Funções da concentração de água lixiviante para valores de pH obtidas em laboratório

pH:	Ácido (a)	Neutro (n)	Básico (b)
<b>Areia (s)</b>	$L_{a,s}\%(\rho) = 6755,4e^{-0,185\rho}$	$L_{n,s}\%(\rho) = 155,0e^{-0,019\rho}$	$L_{b,s}\%(\rho) = 192,0e^{-0,015\rho}$
<b>Argila (c)</b>	$L_{a,c}\%(\rho) = 897,8e^{-0,270\rho}$	$L_{n,c}\%(\rho) = 210,5e^{-0,078\rho}$	$L_{b,c}\%(\rho) = 192,9e^{-0,078\rho}$

Visto que as funções L%(ρ) estão apenas definidas para alguns valores de pH decidiu-se ajustá-las através de interpolação, definiu-se para cada valor de pH as expressões apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Funções da concentração de água lixiviante para todos os valores de pH

pH	L%(ρ)	pH	L%(ρ)
1	$L_a\%(\rho) \times 100\%$	8,5	$L_n\%(\rho) \times 25\% + L_b\%(\rho) \times 75\%$
2		9	
3		$L_n\%(\rho) \times 50\% + L_b\%(\rho) \times 50\%$	10
4	$L_b\%(\rho) \times 100\%$		11
5		$L_a\%(\rho) \times 50\% + L_n\%(\rho) \times 50\%$	12
6			13
6,5		$L_a\%(\rho) \times 25\% + L_n\%(\rho) \times 75\%$	14
7	$L_n\%(\rho) \times 100\%$		
8			

A resistência elétrica (ρ) para cada zona foi calculada e os resultados estão apresentados na secção 5.3.5 do Capítulo 5, na Figura 5.12, na Figura 5.13 e na Figura 5.14. O pH foi medido em cada zona e os resultados estão apresentados na secção 5.3.2 do Capítulo 5, na Figura 5.5, na Figura 5.6 e na Figura 5.7.

Estas funções foram definidas para moldes diferentes da caixa de EKT, de diferentes materiais, formas e volumes, por este motivo foi necessário corrigir os valores da resistividade elétrica multiplicando-a por um fator de correção (fc) constante. Para cada material e subteste foi determinado um fator de correção diferente. Este era tal que o valor médio da concentração de água lixiviante nas quatro

zonas no início dos testes B e C era 100% e para o teste A 0% e o somatório da diferença entre o dia 3 e o dia 0 de subtestes consecutivos era aproximadamente zero.

#### 4.5 Ensaios realizados com a caixa de tratamento eletrocinético

Na caixa de tratamento eletrocinético foram realizados 3 ensaios (Ensaio A, B e C) divididos em 3 etapas (Etapa I, II e III). Foi necessário ter estas etapas para poder testar o aumento do gradiente de potencial elétrico e a influência do uso do tratamento melhorado na descontaminação (testes B e C), de I para II e de II para III, respetivamente. Relativamente ao teste A, trata-se de um teste de controlo para se entender como a areia se adaptava às características da caixa de EKT.

Na Tabela 4.5 estão identificados todos os ensaios realizados.

Tabela 4.5 - Ensaios realizados na caixa de tratamento eletrocinético

Configuração do Solo	Fluido intersticial	Ensaios	Tempo (horas)	V/cm	Fluido nas câmaras dos elétrodos
Areia	Água da Torneira	A-I	24	1	Água da Torneira (TM)
		A-II	48 (CI)	1	Água da Torneira (TM)
		A-III	72 (CI)	1	Água da Torneira
	Água Lixivante	B-I	72 (CI)	1	Água da Torneira (TM)
		B-II	72 (CI)	2	Água da Torneira (TM)
		B-III	72 (CI)	2	Água da Torneira
Areia + Argila	Água Lixivante	C-I	72 (CI)	1	Água da Torneira (TM)
		C-II	72 (CI)	2	Água da Torneira (TM)
		C-III	72 (CI)	2	Água da Torneira

CI - Corrente Intermitente; TM - Tratamento Melhorado

## Capítulo 5

### Resultados

#### 5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados das medições efetuadas na caixa de EKT e os cálculos, enunciados no capítulo 4, que permitiram monitorizar a evolução do processo de descontaminação.

#### 5.2 Resultados esperados

Quando se impõe na caixa de EKT um gradiente de potencial elétrico o sentido do escoamento seria feito do ânodo para o cátodo, no caso de o sistema não ser influenciado por nenhum gradiente hidráulico. A Figura 5.1 a) mostra como se movem as partículas na caixa de EKT, os iões presentes no fluido intersticial e os que se geram devido à eletrolise da água (Equações (1) e (2)). Na figura,  $M^{n+}$  representa os iões metálicos.

Uma vez que, ao aplicar-se uma diferença de potencial elétrica no solo, esta provoca uma alteração das pressões intersticiais no sistema, esta é responsável por gerar um caudal hidráulico com sentido contrário, ou seja, do cátodo para o ânodo. Esta situação está ilustrada na Figura 5.1 b). Sendo o coeficiente de permeabilidade hidráulica da areia muito superior ao eletrosmótico (valores determinados no capítulo 3), o sentido hidráulico sobrepõe-se ao eletrosmótico. Neste caso os contaminantes movem-se transportados pela água.

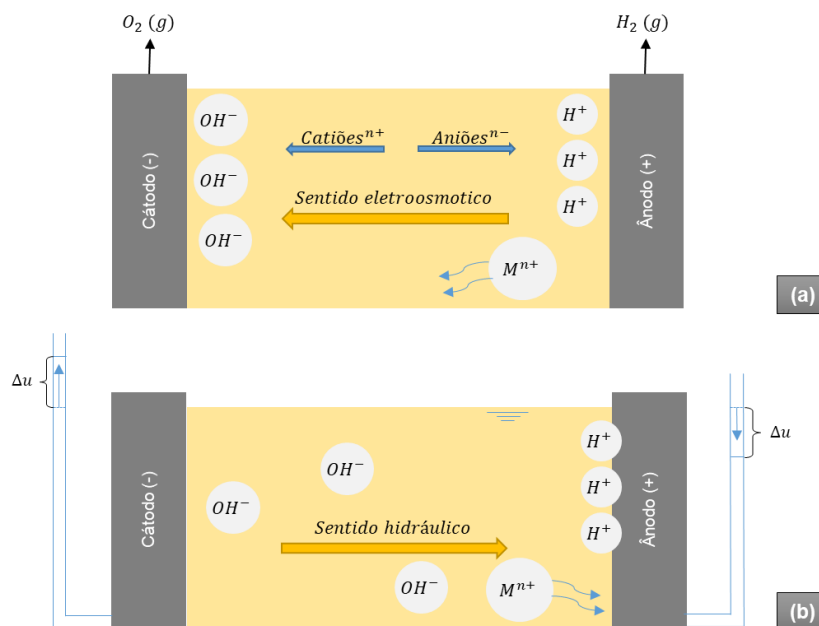


Figura 5.1 - Esquema do escoamento (a) eletrosmótico e (b) hidráulico

No teste B, só Areia com fluido lixiviante, esperava-se que o sentido hidráulico fosse o sentido preferencial do escoamento e que se verificasse visualmente um avanço progressivo da cor esbranquiçada do cátodo para o ânodo, como está representado esquema da Figura 5.2

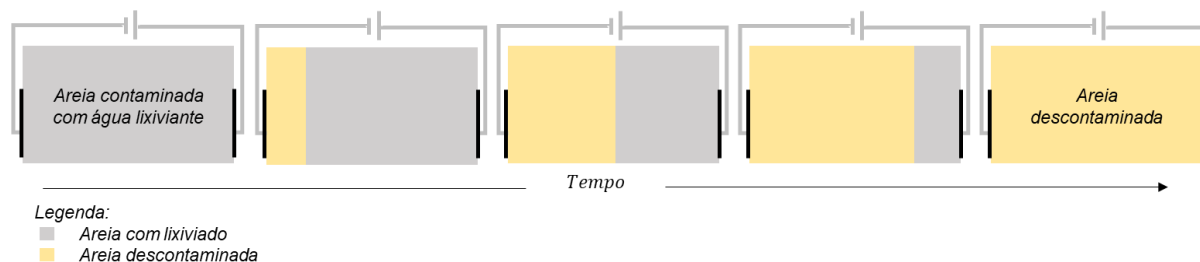


Figura 5.2 - Esquema dos resultados esperados no teste B ao longo do tempo

Para o teste C (Areia + Argila contaminadas com lixiviante) esperavam-se resultados no estrato de areia iguais aos resultados observados para o teste B, e para o estrato de argila semelhantes aos obtidos por Gingine (2017), ou seja, um avanço progressivo da cor branca do cátodo para o ânodo. Esta situação está ilustrada na Figura 5.3.

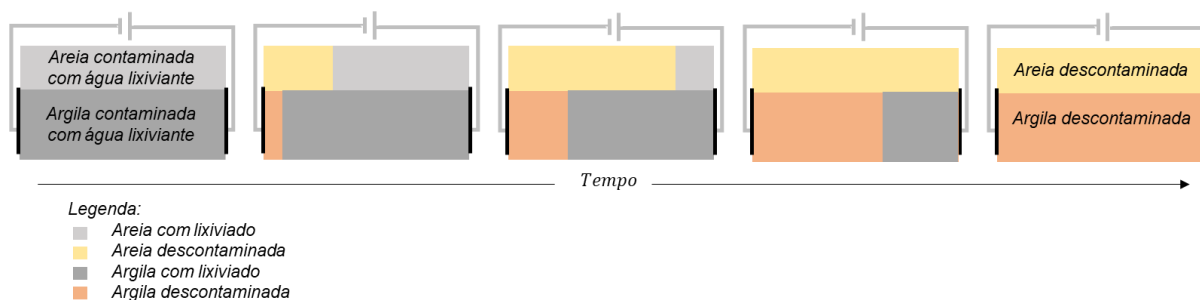


Figura 5.3 - Esquema dos resultados esperados no teste C ao longo do tempo

Contudo, devido à interferência do escoamento na camada de areia, a progressão da descontaminação na camada de areia deverá ser mais rápida do que na camada de argila, pelo que o avanço da cor branca deverá ser mais rápido no estrato arenoso do que no estrato argiloso. Este aspeto será discutido posteriormente.



### **5.3 Monitorização durante o ensaio de EKT**

A monitorização durante ensaios laboratoriais é uma ferramenta fundamental para a interpretação de resultados e fundamentação de conclusões. Neste trabalho foi efetuado através da medição dos caudais de entrada e de saída de água da caixa, diferença de potencial elétrico, Intensidade da corrente elétrica e resistividade elétrica do solo.

#### **5.3.1 Caudal de entrada e saída da caixa**

O volume de água ao longo do ensaio de EKT foi medido de acordo com o processo descrito em 4.3.1. Os gráficos da massa acumulada de entrada e saída da caixa de EKT para cada subtteste, ao logo do tempo, estão representados na Figura 5.11.

Durante o teste A apenas se registaram entradas e saídas de pequenas massas de água na câmara do cátodo. Este ensaio serviu como referência pois só se usou areia saturada com água da torneira.

Ao longo do subtteste B - I verificou-se entrada de água pelo cátodo na caixa, o significa que o escoamento hidráulico se sobrepôs ao eletroosmótico. O oposto aconteceu no subtteste B - II, observou-se saída de fluido pelo cátodo, esta observação pode ser justificada pelo aumento de gradiente de potencial elétrico aplicado de B - I para B - II.

Durante o subtteste B - III registaram-se massas de água a entrar e a sair do sistema praticamente insignificantes. Tal poderá ser explicado por não ter sido aplicada a técnica de tratamento melhorado, com possível ocorrência de reações químicas cuja análise está fora do âmbito desta tese.

Ao longo dos subttestes C - I e C - II registou-se menor quantidade de água a entrar pela câmara do cátodo do que fluido a sair pela câmara do ânodo. O contrário verificou-se no subtteste C - III, mas a quantidade de massa de água que entrou pela câmara do cátodo foi da mesma ordem de grandeza durante todo o teste C.

As entradas e saídas de massa de água registadas ao longo do teste C foram substancialmente superiores às registadas nos testes A e B. Esta observação pode ser explicada pela facilidade de percolação do fluido através da camada superior de areia, ou seja, o sistema consegue rapidamente anular pressões intersticiais que possam surgir, causadas pelo gradiente de potencial elétrico aplicado, evitando assim a passagem de elevados volumes de fluido da célula de solo para as câmaras dos elétrodos.

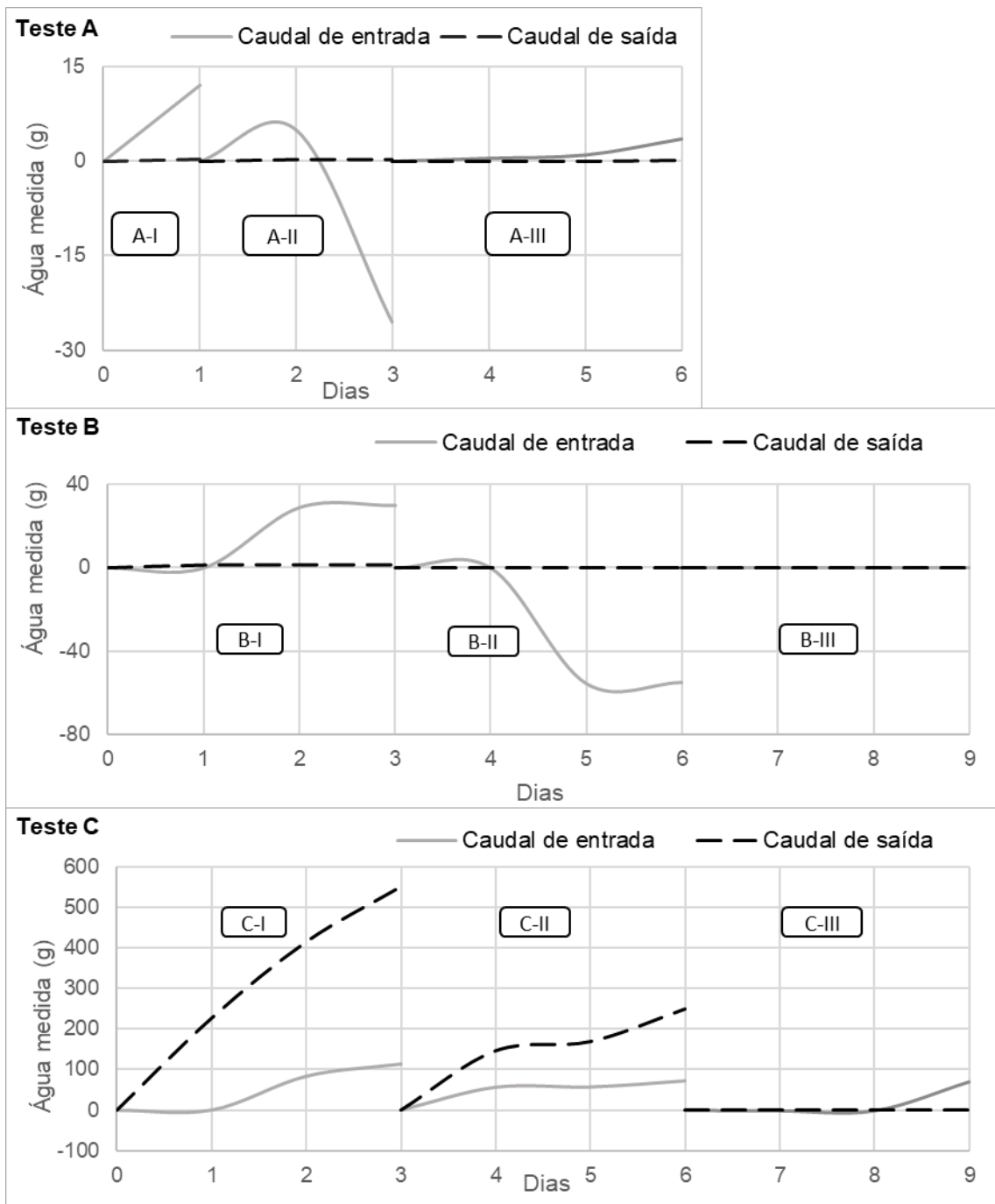


Figura 5.4 - Massa de fluido que entra e sai da caixa de EKT ao longo do tempo para os testes A, B e C

### 5.3.2 pH

O valor de pH ao longo do ensaio de EKT foi medido de acordo com o processo descrito no capítulo 4. Os gráficos do valor de pH para cada teste ao longo do tempo para cada zona da caixa de EKT estão representados na Figura 5.5 para o teste A, na Figura 5.6 para o teste B e na Figura 5.7 para o teste C, neste caso também para cada solo.

O cátodo ao receber elétrons reage quimicamente respeitando a Equação (1) (enunciada anteriormente no capítulo 2). Assim, é possível prever-se um aumento de pH junto à câmara do cátodo devido à formação de íons  $\text{OH}^-$ , que contribuem para tornar o pH mais básico. Todas as zonas da caixa, principalmente a A, B e C, apresentam um aumento do pH devido à alta permeabilidade hidráulica da areia, cuja água em movimento arrasta os íons formados no cátodo em direção ao ânodo. No estrato de argila do teste C, isto já não é verificado devido à baixa permeabilidade da argila. Nesse caso poderá haver diferenças de pH nos dois estratos. Na presença de lixiviante, rico em íons metálicos e muito condutor, em ambos os testes B e C, na câmara do ânodo registou-se uma descida do pH. A eletrólise foi acelerada devido à presença do lixiviante e houve a formação de mais íons  $\text{H}^+$  pela Equação (2) (enunciada anteriormente no capítulo 2), que foram responsáveis pela descida do pH.

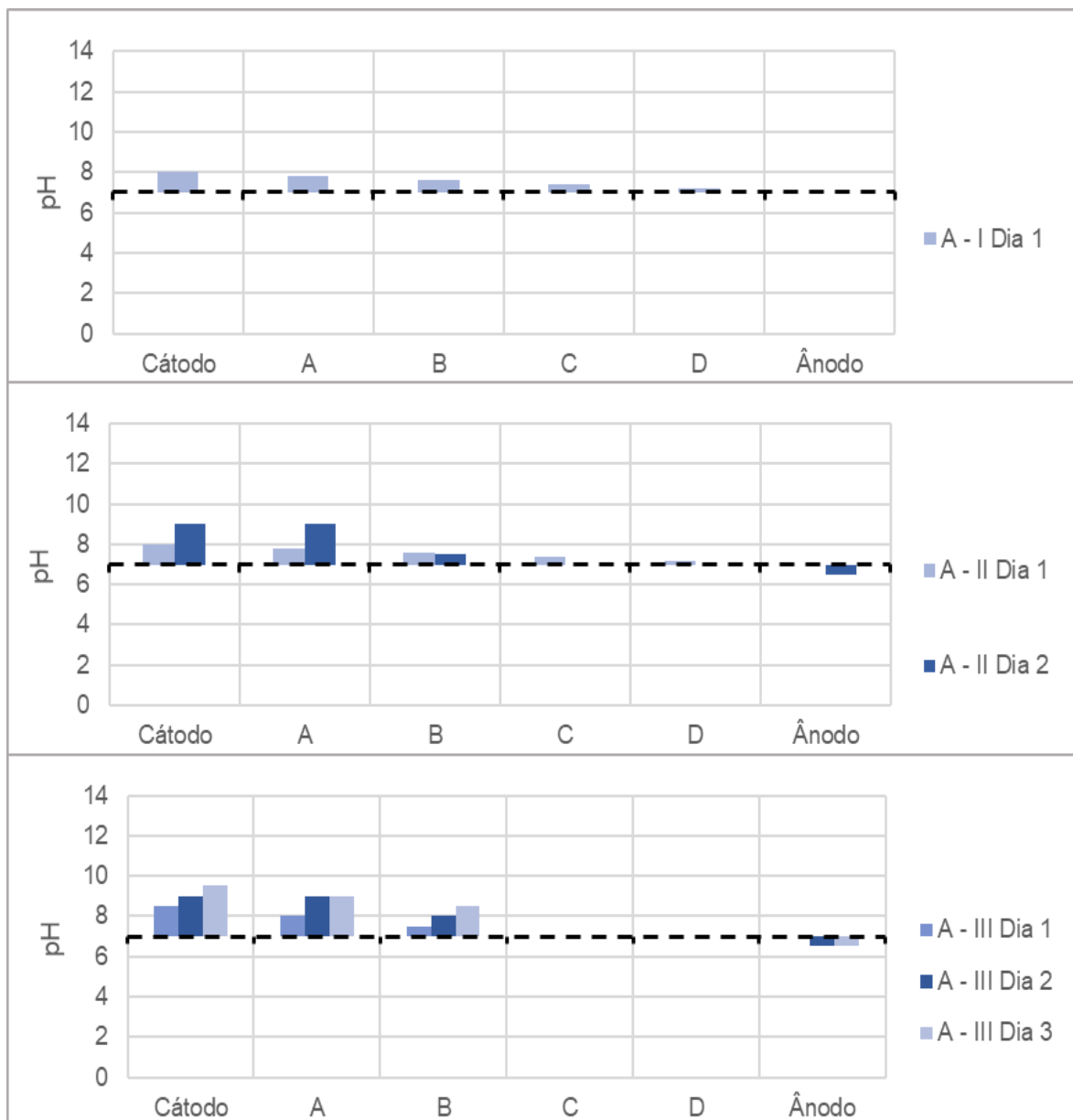


Figura 5.5 - pH ao longo da caixa para o teste A

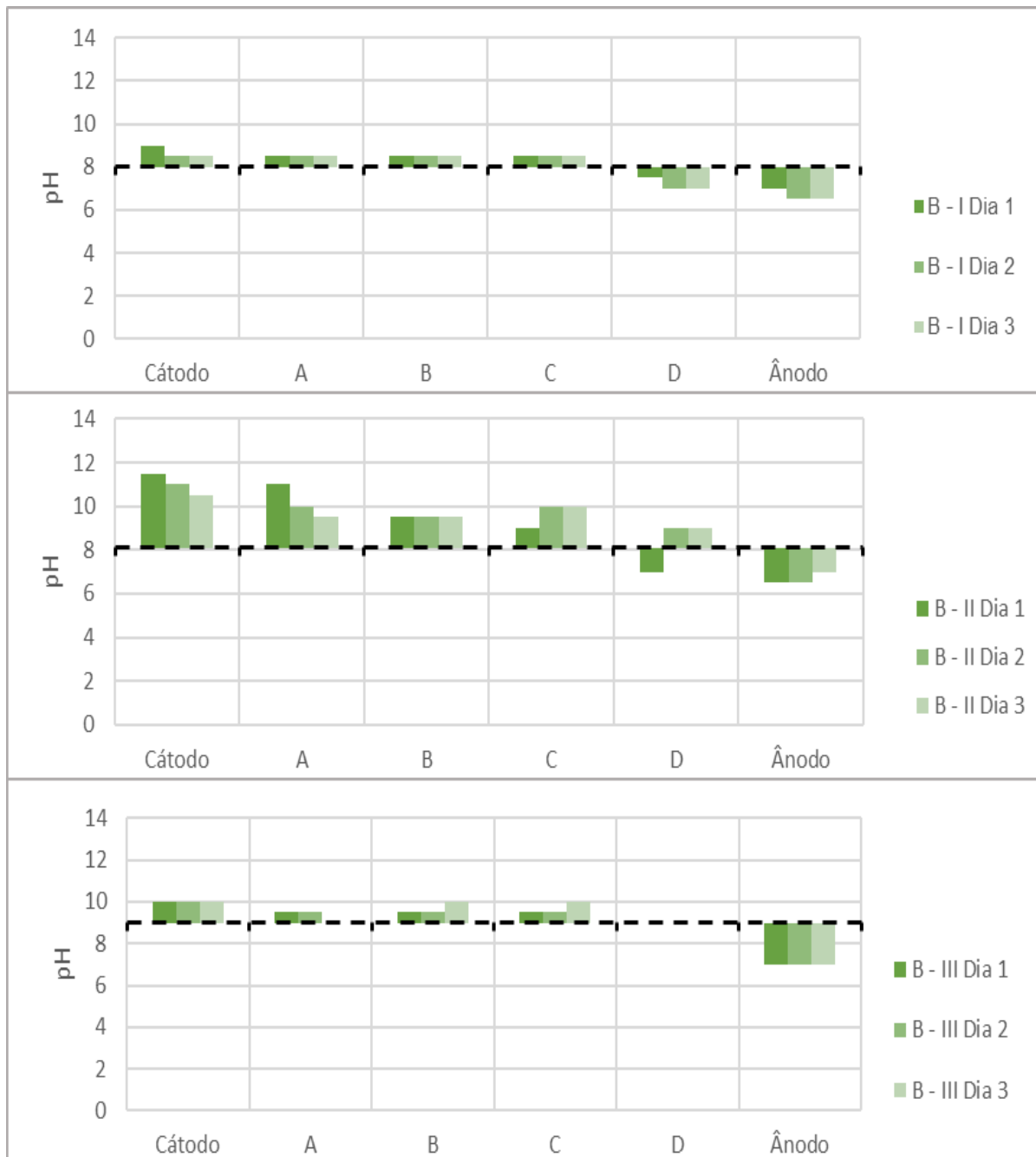


Figura 5.6 - pH ao longo da caixa para o teste B

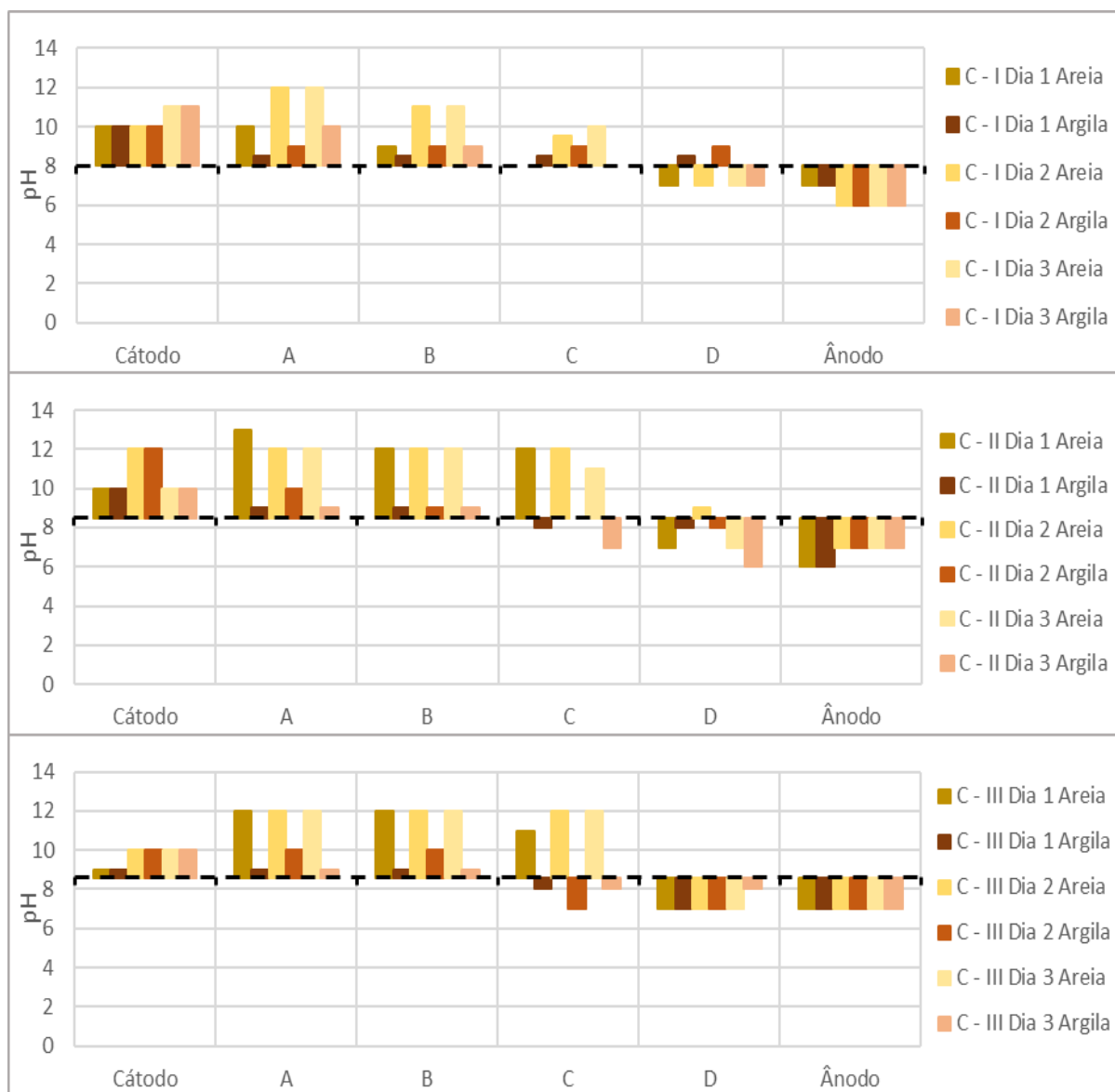


Figura 5.7 - pH ao longo da caixa para o teste C

### 5.3.3 Diferença de potencial elétrico

Durante o ensaio de EKT foi aplicada à caixa um gradiente de tensão elétrica contante e as leituras foram feitas diariamente para cada subteste. As medições foram realizadas de acordo com o processo descrito no capítulo 4. A diferença de potencial elétrico ao longo do tempo para cada zona da caixa de EKT estão representados na Figura 5.8 para o teste A, na Figura 5.9 para o teste B e na Figura 5.10 para o teste C.

Durante o teste A a diferença de potencial elétrica, ao longo do tempo e nas várias zonas, não se afastou muito da aplicada. Tal justifica-se pela baixa concentração de iões na água da torneira e na areia.

Nos subtestes B - I e B - II a inclinação do gráfico varia ao longo do solo, o que indica a ocorrência de reações químicas que vão afetando a resistividade do solo. A inclinação vai diminuindo da caixa para o ânodo, o que significa que a resistência na passagem vai diminuindo ao longo do teste. Em B - III tal não acontece porque não houve renovação do fluido nos reservatórios da caixa, o que justifica por isso, que esta diminuição pode dever-se à técnica de tratamento melhorado usada nestes dois subtestes e estar associada a fenómenos químicos.

No subteste B - III a diferença de potencial vai aumentando ao longo do teste entre a zona B e o cátodo. O facto de em B - III não ser usada a técnica de tratamento melhorado, a neutralização da água das câmaras não está a ser realizada e neste local podem estar a concentrar-se iões  $\text{OH}^-$  e outros aniões presentes no fluido, estes dificultam a passagem da corrente elétrica. O contrario acontece entre a zona B e o ânodo, uma maior concentração de iões  $\text{H}^+$  e outros catiões facilitam a passagem da corrente elétrica.

No subteste C - I o andamento da tensão elétrica ao longo das várias zonas da caixa é muito semelhante à tensão aplicada, o que significa que cada estrato é homogéneo.

Nos subtestes C - II e C - III existe uma grande queda de potencial elétrico na passagem do ânodo para a caixa. Em C-II esta queda vai diminuindo ao longo do tempo, provavelmente devido à técnica de tratamento melhorado, uma vez que esta diminuição não se verifica em C - III.

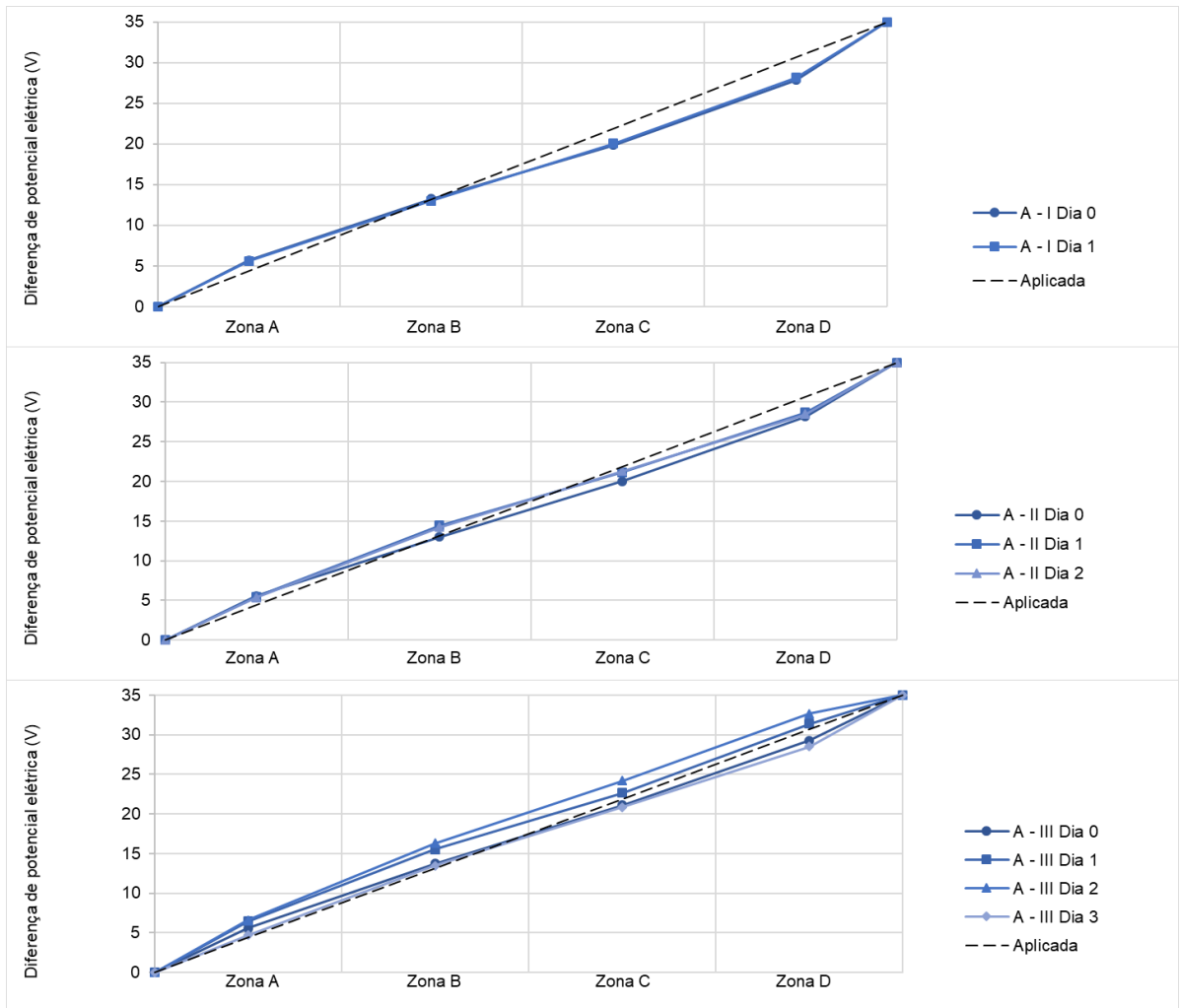


Figura 5.8 - Diferença de potencial elétrico ao longo do tempo para cada zona para o teste A



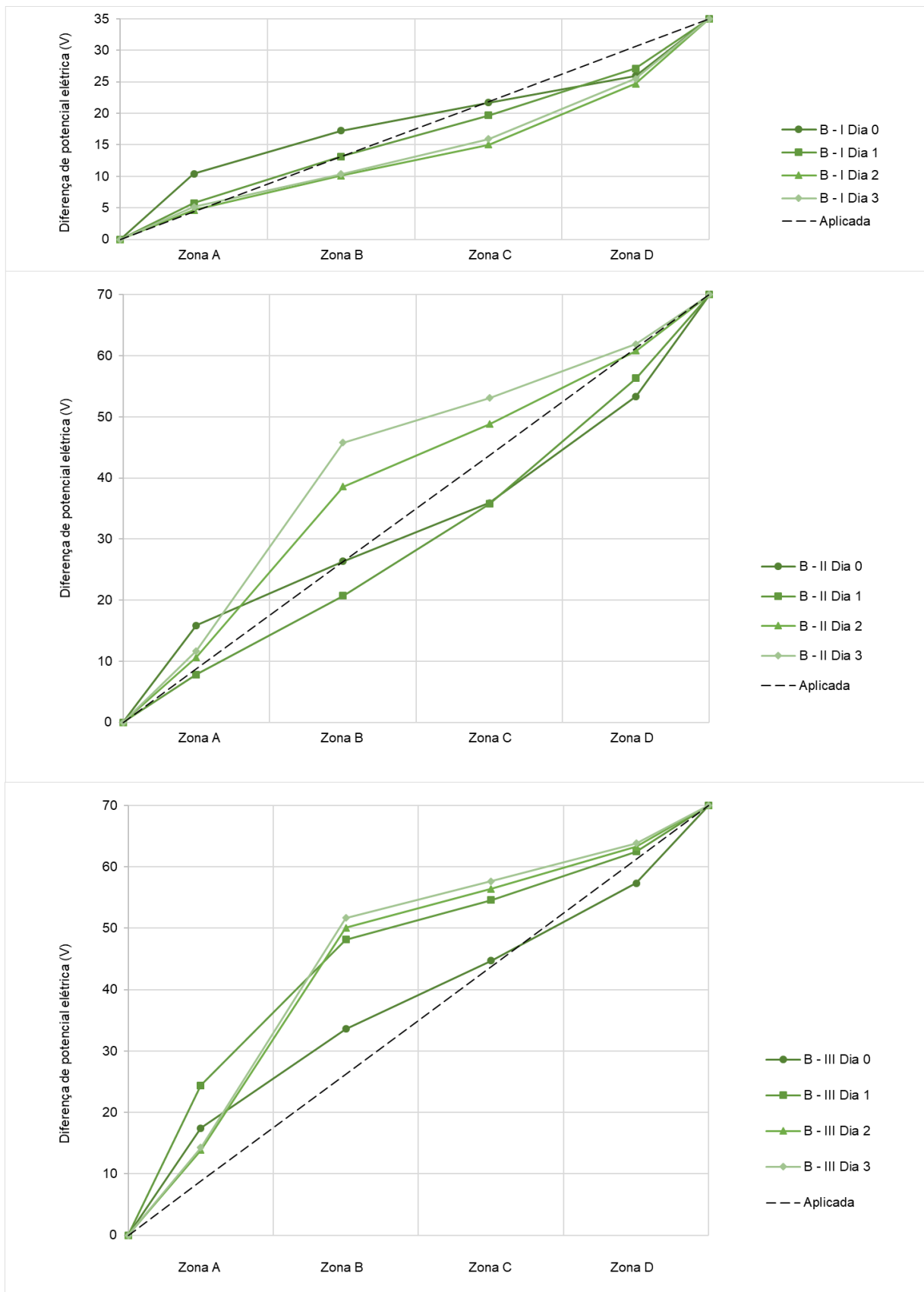


Figura 5.9 - Diferença de potencial eléctrico ao logo do tempo para cada zona para o teste B

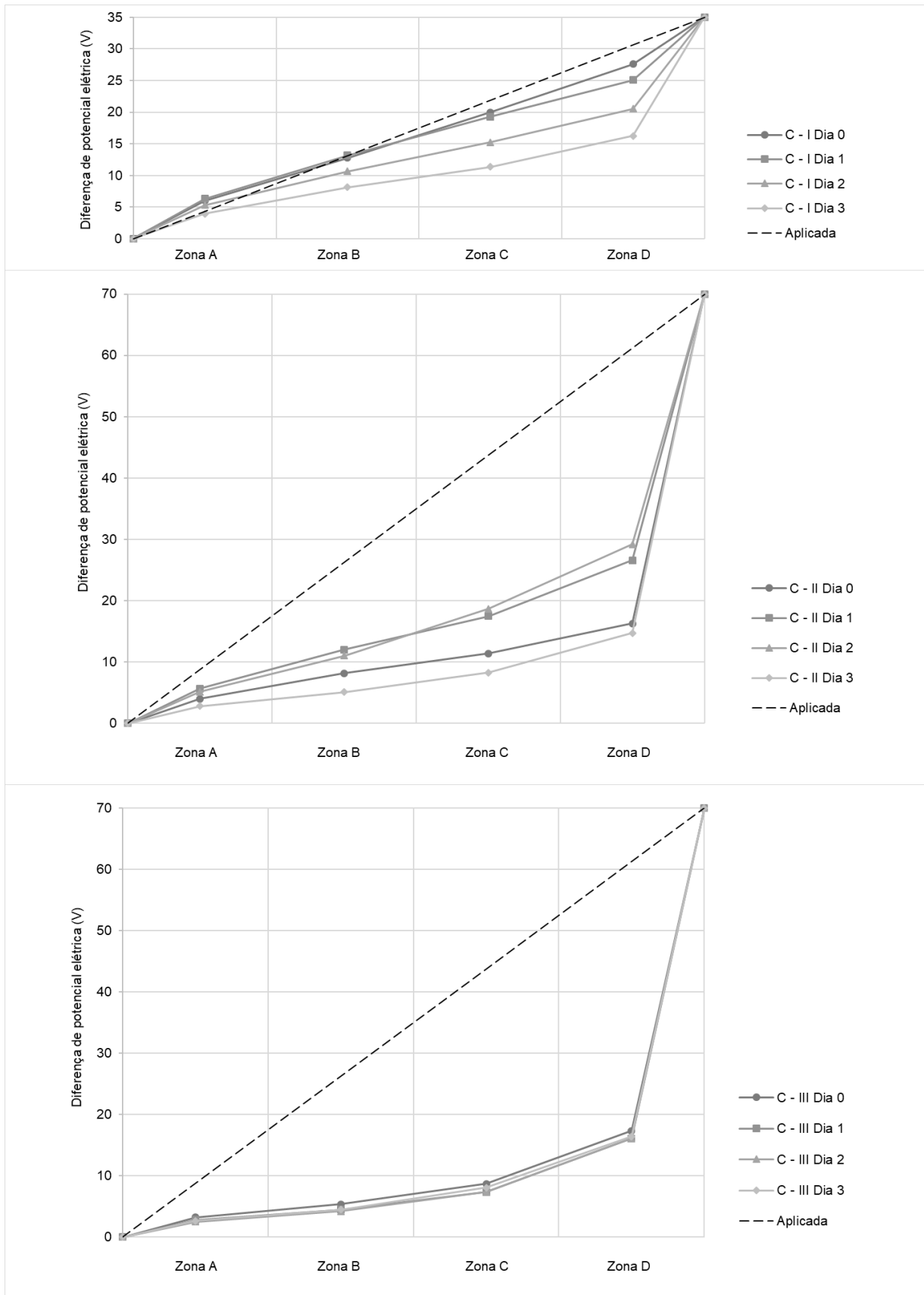


Figura 5.10 - Diferença de potencial elétrico ao longo do tempo para cada zona para o teste C

### 5.3.4 Intensidade da corrente elétrica

Durante o ensaio de EKT a intensidade da corrente elétrica foi registada de acordo com o processo descrito no capítulo 4. Esta é o fluxo de eletrões no solo. As leituras foram feitas diariamente para cada subtteste. A intensidade da corrente elétrica ao longo do tempo estão representados na Figura 5.11 para os testes A, B e C. Para o teste C apresentam-se os valores medidos na camada de areia, a média dos valores medidos na camada de argila e a intensidade da corrente elétrica total. As partículas de areia têm condutividade elétrica muito baixa, por isso as propriedades elétricas do fluido intersticial é que são as principais responsáveis por definir a intensidade da corrente elétrica quando o potencial elétrico é aplicado. Assim, ao longo do teste A a corrente elétrica manteve-se baixa e apenas oscilou entre os 5 e os 6 mA, isto porque a concentração de iões no fluido intersticial usado, água da torneira, é baixa e, em comparação com os outros testes, apenas foi aplicado um gradiente de potencial elétrico de 1 V/cm.

A corrente elétrica aumenta com o aumento do gradiente de tensão elétrica de 1 V/cm para 2 V/cm, este aumento é mais visível na transição do subtteste C - I para C - II. No teste C verifica-se que a corrente na camada argilosa é maior do que na camada de areia, o que se explica pelo facto de os minerais argilosos serem mais condutores do que as partículas de areia. Para além disso, o índice de vazios da camada de argila compactada é maior do que o da camada de areia, e por isso existe mais fluido intersticial na camada de argila, que é muito condutor.

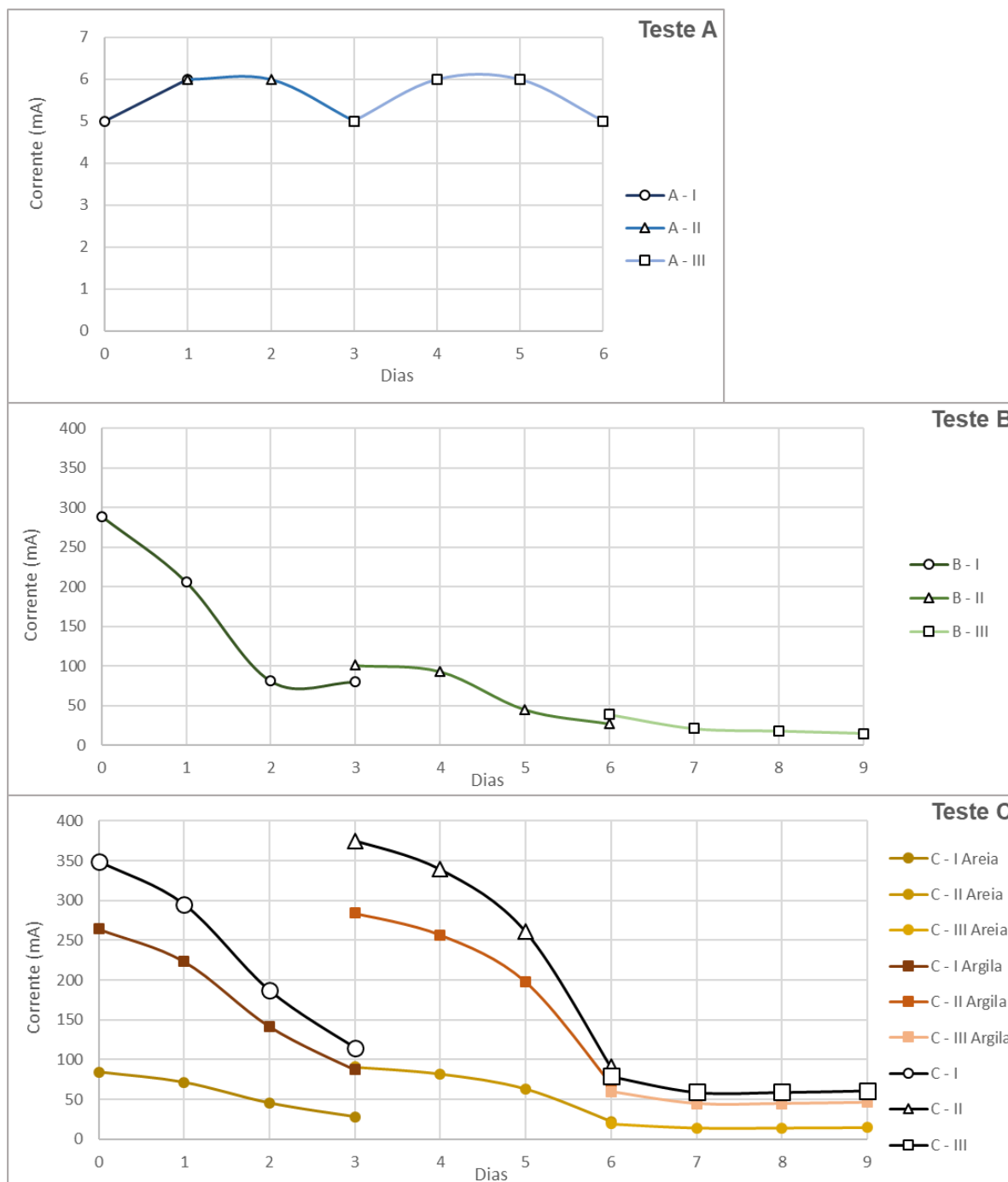


Figura 5.11 - Gráficos da corrente elétrica ao longo do tempo para os testes A, B e C

### 5.3.5 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica ao longo do ensaio de EKT foi calculada de acordo com o processo descrito no capítulo 4. A resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa estão representados na Figura 5.12 para o teste A, na Figura 5.13 para o teste B e na Figura 5.14 para o teste C, neste caso para cada estrato.

Como é possível verificar nas figuras, a resistividade elétrica não se alterou significativamente ao longo do teste A nas várias zonas, isto porque não existiram alterações significativas das propriedades químicas do fluido intersticial. No entanto, nos subtestes A - II e A - III houve um aumento da resistividade na zona A, provavelmente, causado pelo aumento de pH nesta zona, devido à formação de iões  $\text{OH}^-$ .

Durante o subteste B - I os valores da resistividade aumentaram uniformemente em todas as zonas da caixa. Isto pode significar que houve uma diminuição da concentração de água lixiviante idêntica em todas as zonas da caixa.

No subteste B - II a resistência elétrica continuou a aumentar, mas não de maneira uniforme como no subteste anterior. O aumento foi aproximadamente proporcional à distância da zona ao ânodo, ou seja, no final do subteste B-II a resistividade elétrica na zona D foi a mais elevada. Tal também corresponde a haver movimento de iões atraídos pelo polo de carga oposta, o que significa que está a começar a haver descontaminação. Nas zonas C e D a resistividade elétrica manteve-se constante ao longo do subteste B - III, exceto durante o primeiro dia, em que aumentou cerca de  $90 \Omega \cdot \text{m}$ . Nas zonas A e B a resistividade elétrica foi aumentando, por não ser usada a técnica de tratamento melhorado. Este aumento está associado à descontaminação do solo, porque a resistividade elétrica do solo descontaminado é maior do que do solo com lixiviante. Este resultado não resulta apenas das condições do teste III, mas também da evolução da descontaminação durante as fases I e II, onde o lixiviante foi progressivamente substituído por água da torneira.

Ao longo do teste C a resistividade elétrica vai aumentando nos dois solos. Tal como verificado no teste B, este aumento é provocado pela descontaminação. A resistividade no estrato de areia é muito superior à do estrato de argila, isto deve-se à alta condutividade elétrica do material argiloso.

O aumento da resistividade elétrica é bastante semelhante ao longo das zonas da caixa nos subtestes C - I e C - II, mas apenas nos dias 0 e 1. Nos dias 2 e 3 de C - II, e no subteste C - III, registou-se um aumento das zonas próximas do ânodo e nas zonas C e D, principalmente no estrato de areia. Tal explica-se também pela maior descontaminação desta camada, causada não só pelo tratamento EKT, mas também pela percolação de água devida ao gradiente hidráulico na caixa, facilitada pela permeabilidade elevada da areia.

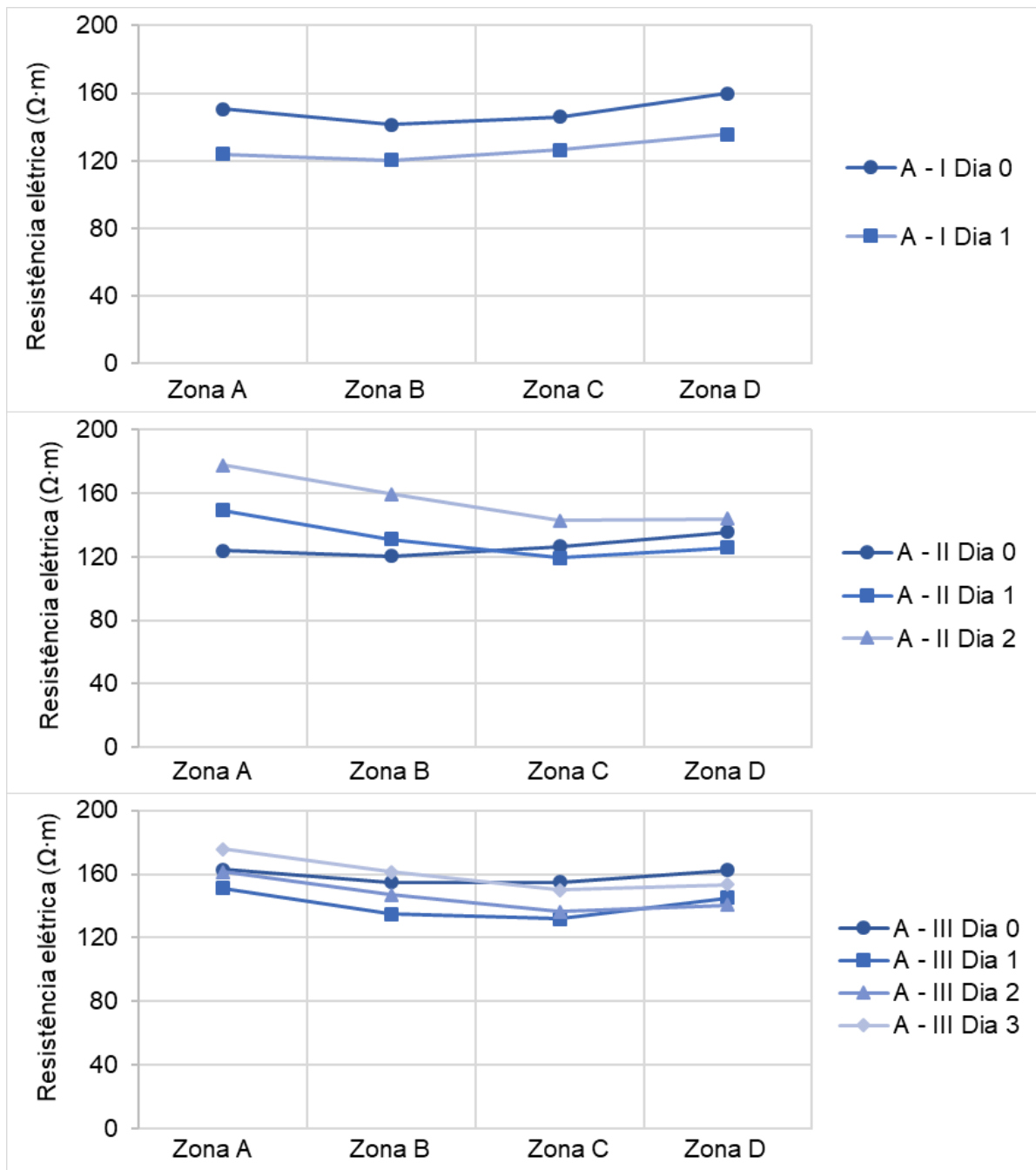


Figura 5.12 - Resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa para o teste A

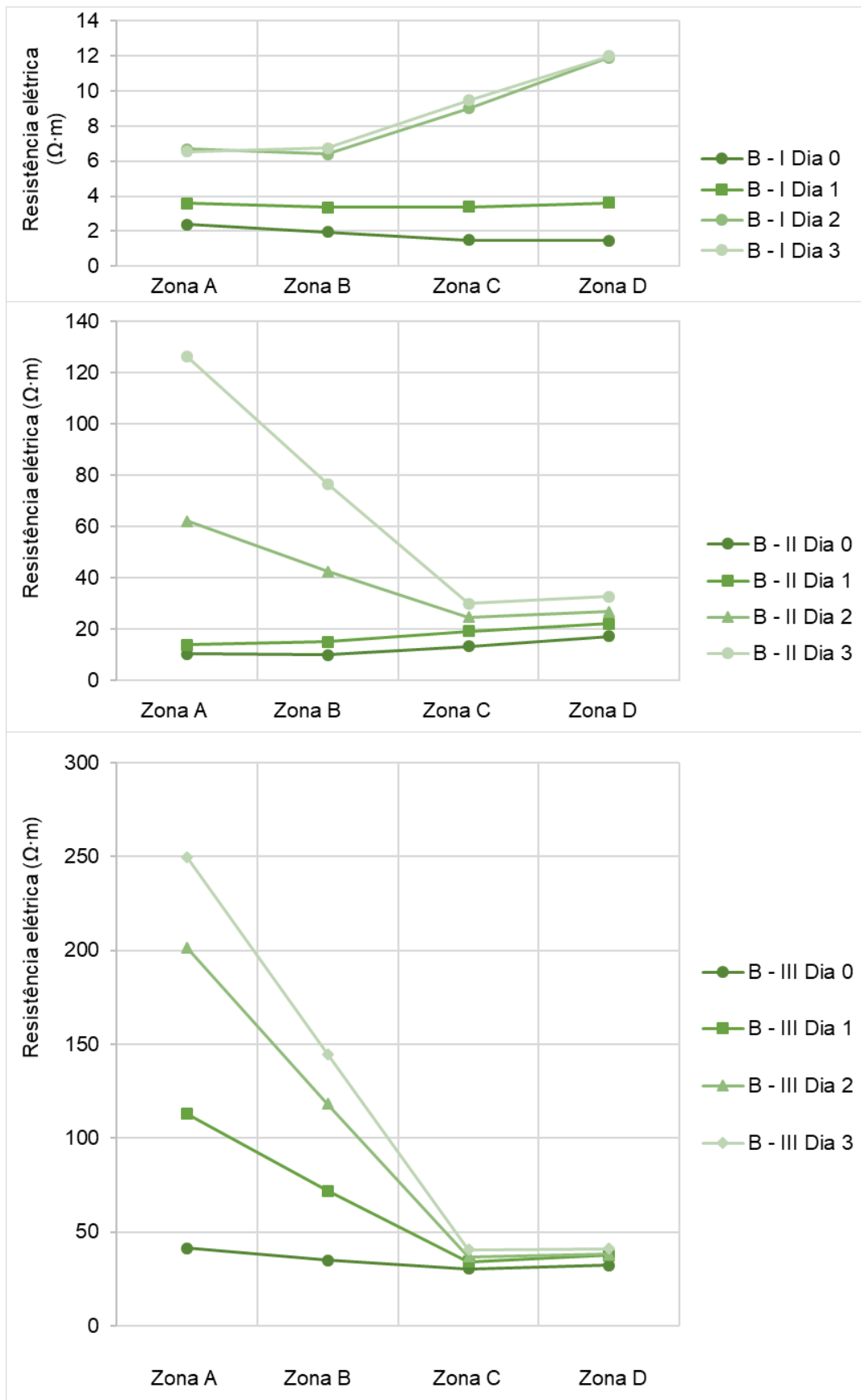


Figura 5.13 - Resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa para o teste B

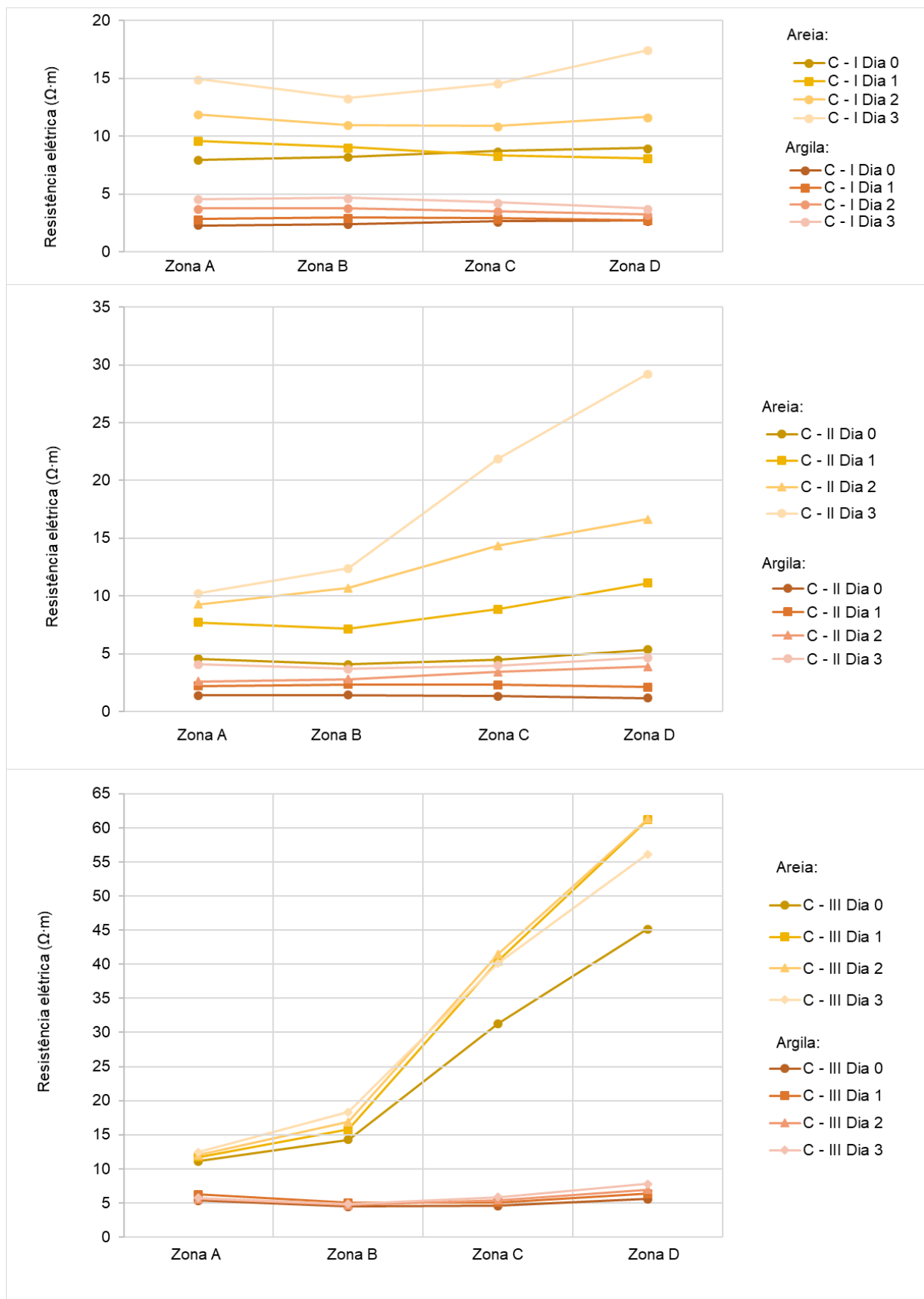


Figura 5.14 - Resistividade elétrica ao longo do tempo para cada zona da caixa para o teste C



## **5.4 Avaliação indireta da descontaminação**

### **5.4.1 Evolução da resistividade elétrica do solo**

Através das medições da resistividade elétrica do solo e do pH foi possível estimar a evolução da concentração de água lixiviante na célula de solo. Esta informação é fundamental para avaliar a eficiência da EKT para a descontaminação de solos.

A concentração de água lixiviante ao longo do ensaio de EKT foi calculada de acordo com o processo descrito no capítulo 4. A concentração de água lixiviante no final de cada subtteste e para cada zona da caixa estão representados na Figura 5.15.

Ao longo do teste B a diminuição da concentração aconteceu de forma bastante rápida. No final do subtteste B - I, a percentagem de lixiviante, %L, calculada em todas as zonas da célula de solo apresentou valores inferiores a 15%. Como se pode verificar no gráfico a partir deste subtteste, as %L desceram até valores à volta dos 0%.

No final do subtteste C - I no estrato de areia os valores de L% calculados foram superiores a 25%. Estes valores contrastam com os valores do final do subtteste B - I. Este contraste deve-se à presença do estrato de argila que, devido à sua grande condutividade elétrica em relação à areia, faz com que a intensidade de corrente elétrica diminua no estrato de areia para aumentar no de argila.

No final do teste C ambos os estratos apresentam %L bastante reduzidas. No estrato de argila as concentrações calculadas no final do ensaio foram inferiores a 10% e no estrato de areia inferiores a 5%. Estes valores mostram que este ensaio é uma opção viável para a descontaminação de terrenos estratificados.

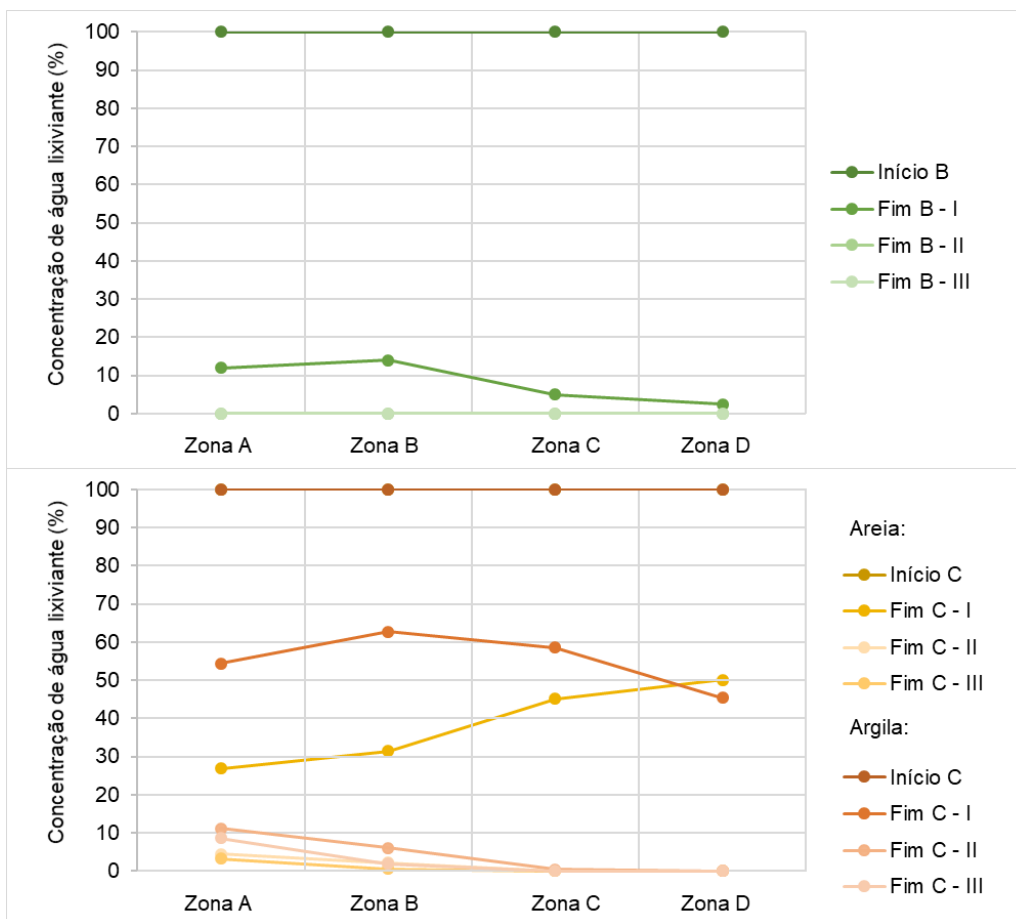


Figura 5.15 - Concentração de água lixiviante no final de cada subteste para cada zona da caixa para os testes B e C

## 5.4.2 Observação visual

Os solos apresentavam cor escura devido à presença do fluido lixiviante, pelo que uma medida indireta da descontaminação é através da alteração da cor. No final dos testes B e C foram realizados alguns ensaios em amostras de solo retiradas da caixa de EKT, onde foram realizados os testes com o propósito de verificar alguns resultados obtidos ao longo dos ensaios eletrocinéticos.

### 5.4.2.1 Teste B

No final do teste B a concentração de água lixiviante calculada foi inferior a 0,01% em todas zonas da célula de solo. A observação visual deste teste está de acordo com este resultado porque a cor da areia ia ficando cada vez mais clara, como se pode observar na Figura 5.16.

Apesar de se ter tentado garantir o valor do índice de vazios contante em toda a areia da caixa de EKT é muito provável que o adensamento da areia aumente com a profundidade, uma vez que o peso de solo nas camadas superiores contribui para este fenómeno. Os coeficientes de permeabilidade hidráulica e eletrosmótica são sensíveis ao índice de vazios, a diminuição do índice de vazios com a profundidade, devido ao adensamento, pode justificar a falta de homogeneidade ao logo da altura da

célula de solo na progressão da descontaminação. Pode ver-se na Figura 5.16 que na zona superior da célula de solo a descontaminação aconteceu mais cedo do que na zona inferior, pois a zona superior apresenta uma cor mais clara que a inferior.

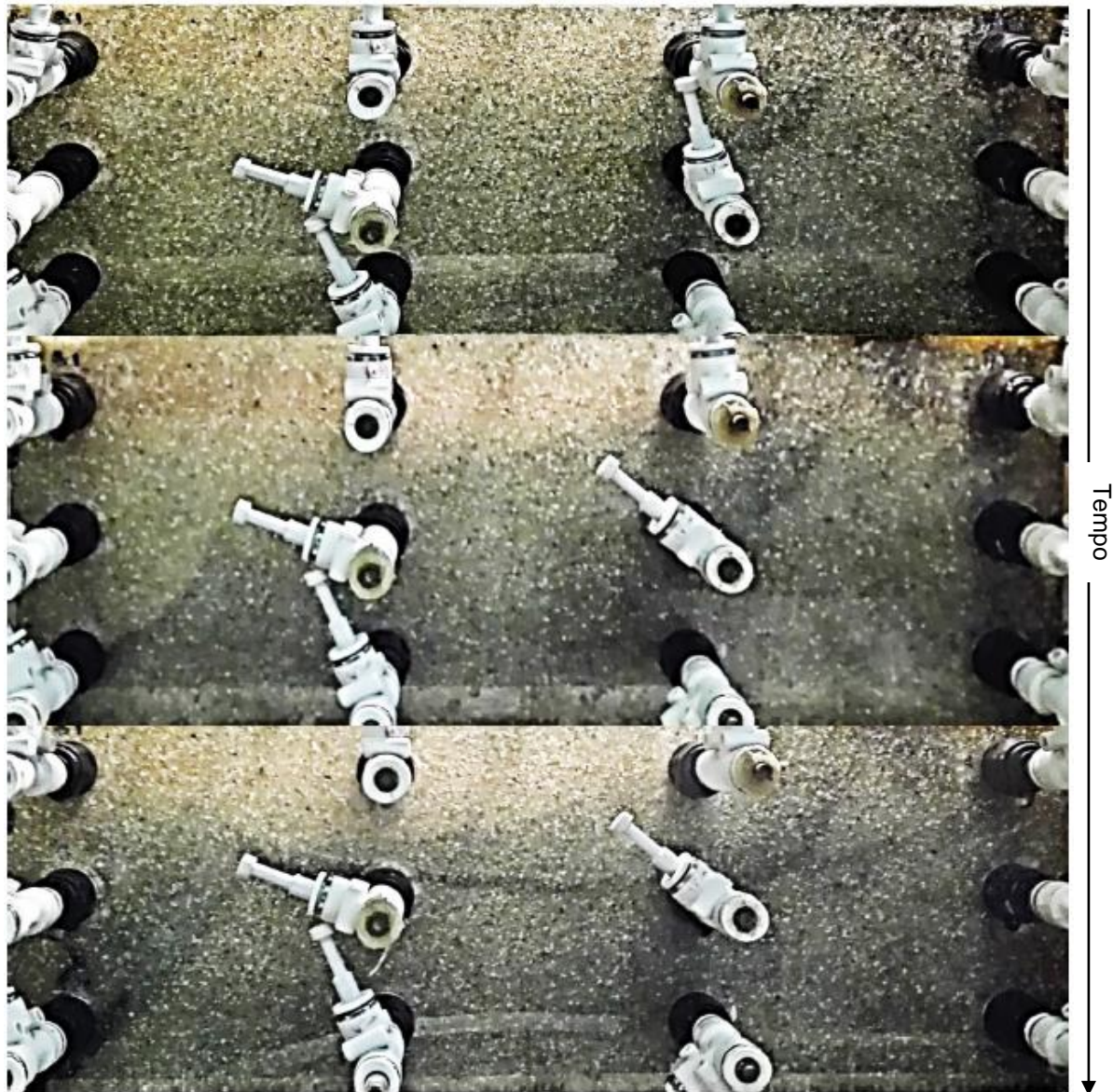


Figura 5.16 - Progressão ao longo do tempo do ensaio B

#### 5.4.2.2 Teste C

Com a observação do teste C, cujas fotografias se apresentam na Figura 5.16, é possível perceber que o estrato de areia apresentou uma evolução da descontaminação de acordo com os resultados que eram esperados e que a descontaminação neste estrato foi mais rápida do que no estrato de argila. A Figura 5.18 e a Figura 5.19 mostram cada um dos estratos separadamente.

Na camada arenosa a descontaminação ocorreu no sentido hidráulico (do cátodo para o ânodo). A zona junto ao ânodo apresenta uma tonalidade muito escura.

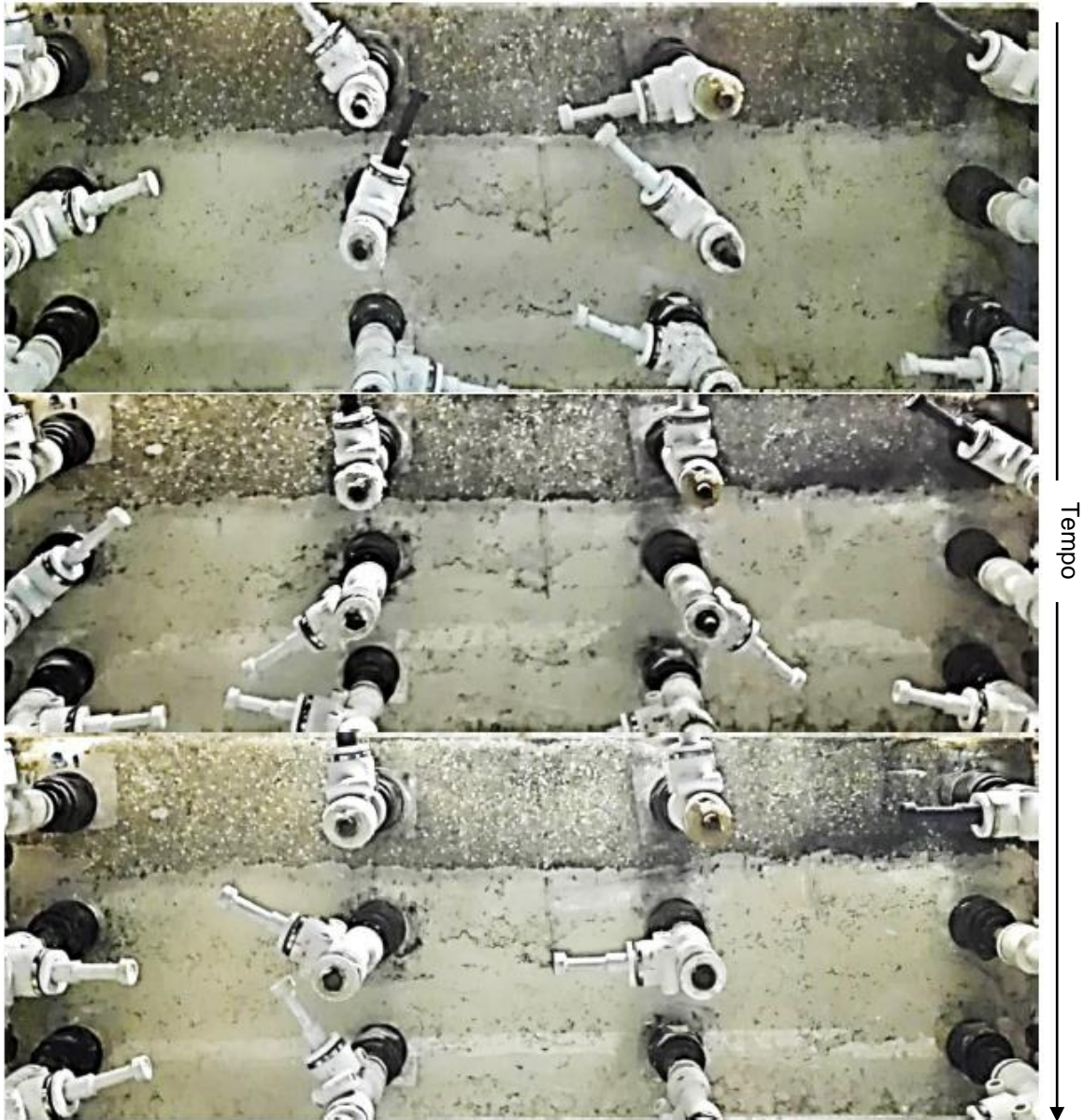


Figura 5.17 - Progressão ao longo do tempo do ensaio C



Figura 5.18 - Progressão ao longo do tempo no estrato de areia durante o teste C

Na análise visual das várias fases do teste C, consegue perceber-se que o estrato de argila apresenta uma tonalidade mais clara ao longo do tempo, isto observa-se na Figura 5.19. Ao contrário dos resultados esperados que seriam um avanço progressivo da cor escura do ânodo para o cátodo, esta progressão homogénea de cor em todas as zonas do estrato de argila pode ser provocada por uma descontaminação no sentido ascendente, ou seja, o fluido intersticial contaminado da argila passa para o estrato de areia, que neste caso passa a ter a função de dreno.

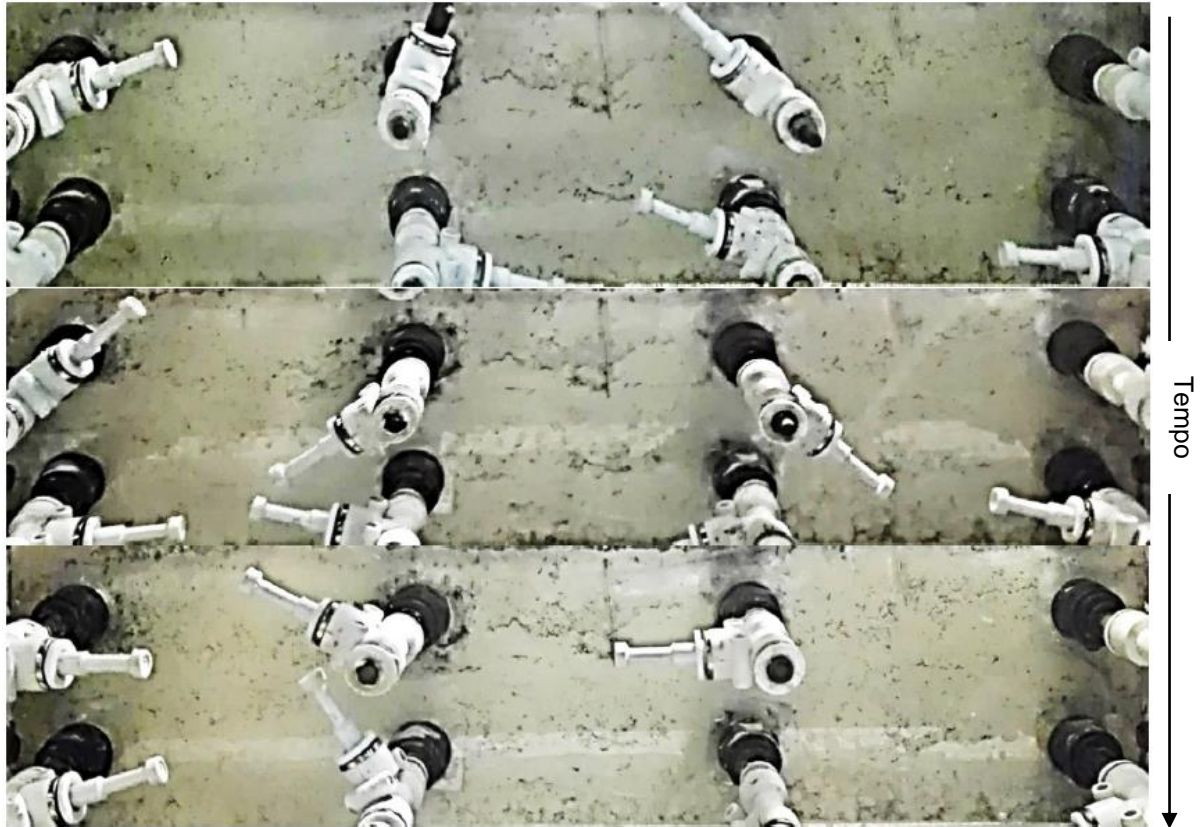


Figura 5.19 - *Progressão ao longo do tempo no estrato de argila durante o teste C*

No caso do teste C os resultados esperados não ocorreram porque não se teve em conta a interação entre os dois estratos. Analisando agora os dois estratos em conjunto a partir dos resultados obtidos. No final do subteste C - I Dia 1 o valor da concentração de água lixiviante baixou nas zonas A e B de 100% para cerca de 70% no estrato de areia e de 100% para cerca de 93% no estrato de argila. As diferenças de concentração entre estratos podem ter provocado a passagem de iões, por osmose, do estrato de argila para o de areia. Como o estrato de areia ao longo do teste C, nas zonas A e B apresenta concentrações de água lixiviante inferiores ao de argila este movimento osmótico acontece durante todo o teste C. Esta é a análise feita a partir dos resultados recolhidos, não foi feita nenhum tipo de monitorização específica para comprovar este fenómeno. O esquema da Figura 5.20 ilustra os três fenómenos que se supõem ter ocorrido.

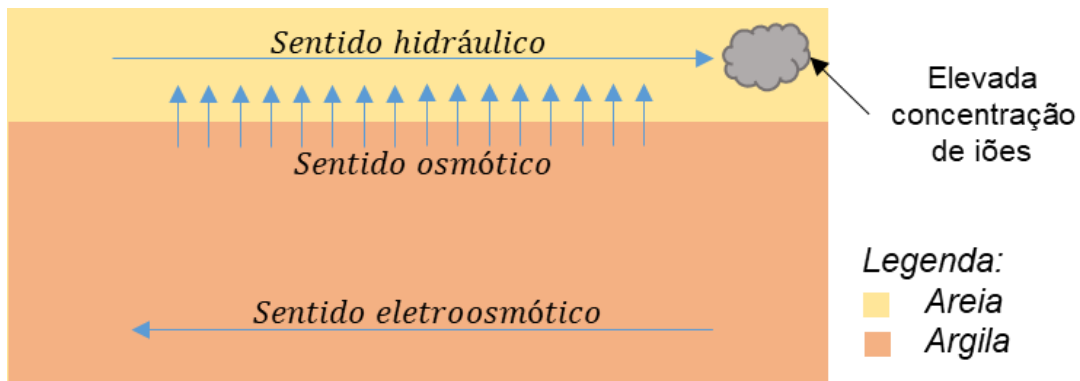


Figura 5.20 - Esquema do teste C com os vários sentidos do escamento

#### 5.4.2.3 Descoloração devido a lavagem ou a oxidação

Em 5.3.1 percebeu-se, através da lavagem, que com técnicas relacionadas com movimentações de água não seria possível descontaminar mais o solo. A cor escura pode ser causada pela precipitação de algumas substâncias que ficaram incrustadas nas zonas rugosas das faces dos grãos de areia. A Figura 5.21 mostra duas fotografias de microscópio, com diferentes escalas onde se consegue ver em detalhe as zonas rugosas onde poderia haver precipitação de contaminante.

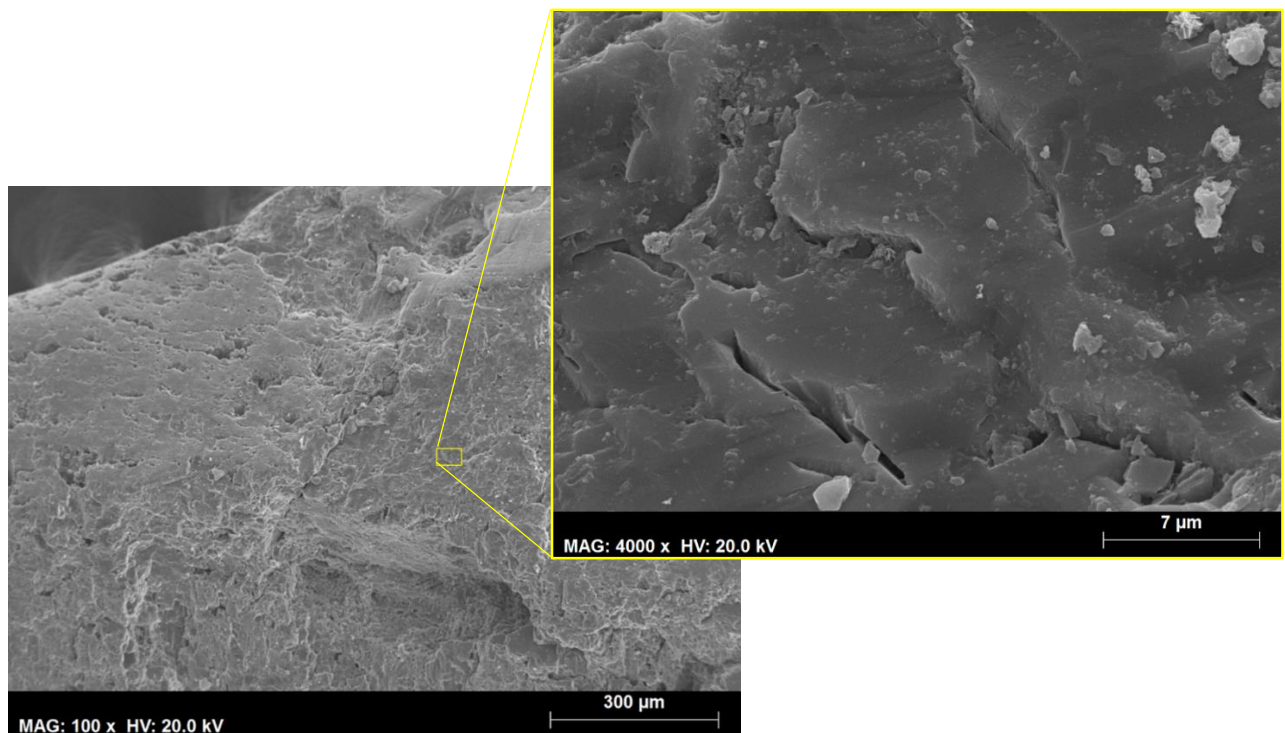


Figura 5.21 - Fotografias de microscópio da superfície exterior de um grão de areia

No final do teste B a areia retirada da caixa de EKT foi seca em estufa. Comparando-a visualmente com areia não contaminada, verificou-se que a amostra de areia apresentava uma tonalidade mais escura no fim do teste B. Esta tonalidade escura deve-se essencialmente à presença de matéria orgânica, e desaparece após oxidação, ou seja, junto ao ânodo (Equação (2), enunciada anteriormente

no capítulo 2) onde há produção de oxigénio. Gingine (2017) estudou este efeito detalhadamente, e mostrou que o lixiviante perdia a cor escura em contacto com água oxigenada e quando o pH era ácido.

Decidiu-se mergulhar amostras de areia do final do teste B em água da torneira e em água oxigenada, durante 24 horas para se compreender se a cor da areia se alterava apenas devido a oxidação (processo químico), ou se a sua lavagem através de percolação de água também teria influência (processo físico). A Figura 5.22 apresenta a areia após estes dois tratamentos, Não se observam melhorias muito significativas, no entanto verifica-se que a areia onde foi efetuada lavagem com água da torneira está ligeiramente mais escura do que a areia submersa em água oxigenada. Tal mostra que a oxigenação teve algum efeito na alteração de cor observada nos ensaios e discutida anteriormente.

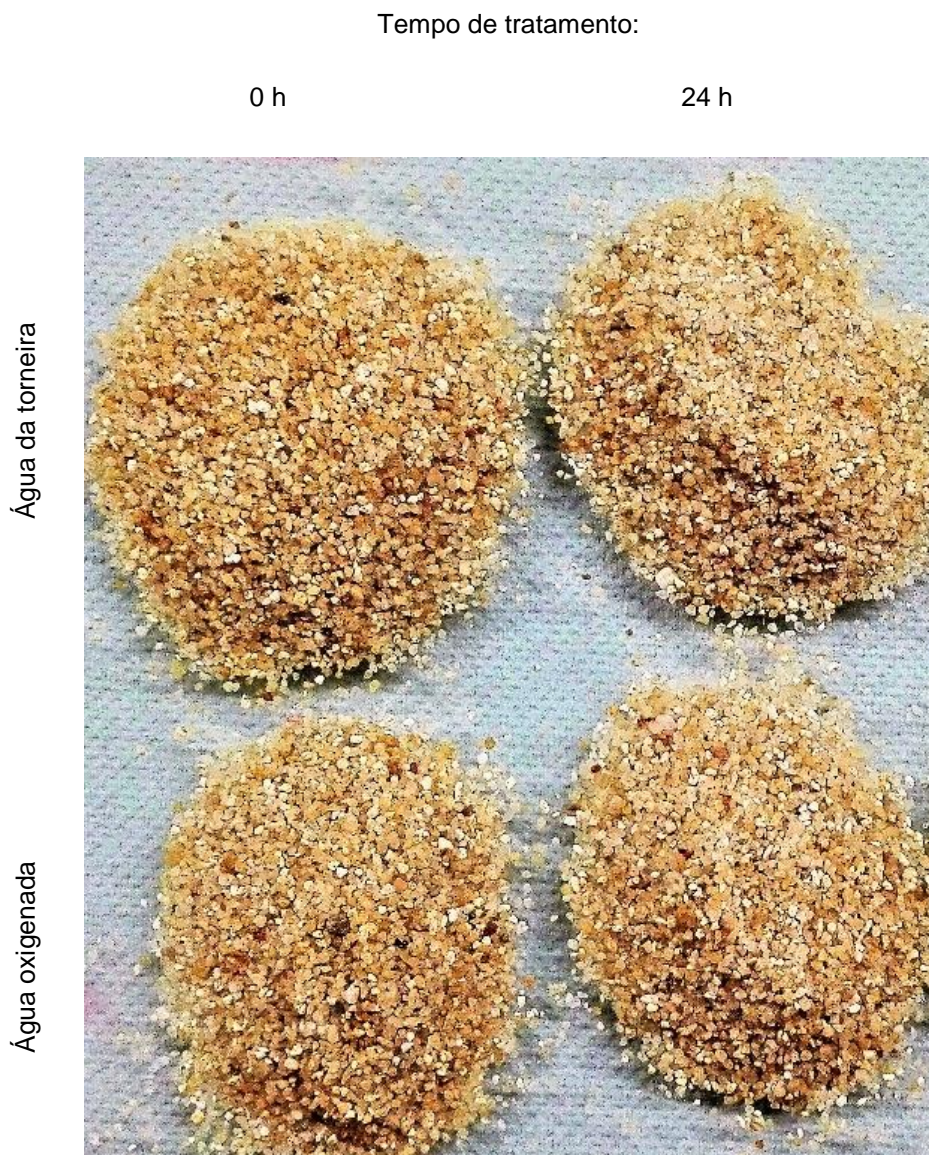


Figura 5.22 - Comparação entre areia no final do teste B com e sem lavagem de 24 horas

## 5.5 Verificação direta da descontaminação por análises químicas

Realizaram-se ensaios químicos para determinação das concentrações de alguns contaminantes no solo antes e após o tratamento, e assim avaliar se realmente este tinha sido eficaz. Trata-se essencialmente de um método direto de avaliação da descontaminação, enquanto que a avaliação através das alterações da resistividade elétrica do solo é um método indireto. As análises químicas às amostras de solo realizaram-se no Laboratório de Análises do IST, onde foram analisados os seguintes parâmetros: carência química de oxigénio (g(O<sub>2</sub>)/kg); potássio (g/kg); sódio (mg/kg); cobre (mg/kg); crómio (mg/kg) e ferro (mg/kg). Foram realizados ensaios de espectroscopia para detetar os metais, e por digestão ácida para a matéria orgânica.

Após a finalização do ensaio de EKT, no fim do teste C, recolheram-se amostras de areia e argila da caixa junto ao ânodo e ao cátodo. As análises químicas foram realizadas em amostras do teste C, por ser o que contem o estrato de argila. Para além destas, foram preparadas amostras de areia e argila saturadas com água lixiviante sem terem sido sujeitas a EKT. Estas amostras não tratadas serviram como referência inicial, para que fosse calculada a taxa de descontaminação (TD). Os resultados das análises às seis amostras foram comparados entre si e com os resultados das análises do trabalho de Gingine (2017), com o objetivo de compreender-se a contribuição do estrato de areia para a descontaminação de solos no ensaio de EKT.

A Equação (20) mostra como foi obtida a taxa de descontaminação (TD).

$$TD = \frac{\text{Valor do parâmetro inicial} - \text{Valor do parâmetro final}}{\text{Valor do parâmetro inicial}} \times 100\% \quad (20)$$

A Tabela 5.1 apresenta a taxa de descontaminação em cada material e zona, os valores positivos significam que houve uma diminuição do parâmetro em causa, por oposição o sinal negativo implica um aumento.



Tabela 5.1 - Taxa de descontaminação das amostras de solo

			<b>Carência Química de Oxigênio</b>	<b>Potássio</b>	<b>Sódio</b>	<b>Crômio</b>	<b>Ferro</b>
<b>Meio estratificado</b>	Areia	Ânodo	19%	-8119%	-12666%	0%	-255%
		Cátodo	72%	84%	-12666%	0%	-13%
	Argila	Ânodo	17%	85%	-9400%	52%	23%
		Cátodo	13%	33%	42%	57%	58%
<b>Gingine (2017)</b>	Argila	Ânodo	40%	6%	88%	-138%	-48%
		Cátodo	14%	44%	89%	10%	26%

Na Tabela 5.2 são comparadas as taxas de descontaminação entre o estrato de argila do teste em meio estratificado e a argila do teste realizado com apenas argila (Gingine, 2017). A comparação foi feita recorrendo à taxa de comparação (TC) apresentada na Equação (21). Na Tabela 5.2 o sinal positivo significa que o teste em meio estratificado foi mais eficiente na descontaminação do que no teste realizado com apenas argila, e vice-versa

e a Equação a taxa de comparação os valores apresentados no gráfico,  $TD_{\text{Teste C}}$  é a taxa de descontaminação de uma amostra do teste C,  $TD_{\text{Teste Gingine}}$  é a taxa de descontaminação de uma amostra do teste na caixa de EKT com argila e lixiviado do trabalho de Gingine (2017) e TC é a taxa de comparação.

Tabela 5.2 - Comparação das argilas

	<b>Carência Química de Oxigênio</b>	<b>Potássio</b>	<b>Sódio</b>	<b>Crômio</b>	<b>Ferro</b>
<b>Ânodo</b>	-14%	-31%	-114%	83%	55%
<b>Cátodo</b>	-143%	93%	101%	364%	310%

$$TC = TD_{\text{Argila (meio estratificado)}} - TD_{\text{Argila (apenas argila)}} \quad (21)$$

Ao comparar os resultados do estrato de argila, do teste C deste trabalho, com os resultados da argila, do teste realizado com apenas argila do trabalho de Gingine (2017), conclui-se que:

- O parâmetro da carência de oxigênio apresentou melhorias mais significativas de descontaminação no caso do teste realizado com apenas argila;
- A concentração de íons potássio e sódio diminuiu mais significativas junto ao ânodo no teste de realizado com apenas argila, no entanto junto ao cátodo a diminuição da concentração destes parâmetros foi mais significativa no teste em meio estratificado;
- O teste em meio estratificado apresentou melhorias mais significativas na descontaminação de íons crómio e ferro.

Em anexo encontram-se os boletins de análise realizados pelo Laboratório de Análises do IST.

## **5.6 Observações finais**

Foi possível observar a descontaminação do solo devido a EKT, apesar de haver sobreposição entre um processo hidráulico e eletroquímico devido á elevada permeabilidade da areia. A presença da camada de areia funcionou, por isso, como um dreno, o que permitiu uma descontaminação mais eficiente da camada de argila quando comparada com a descontaminação observada na argila por Gingine (2017).

## Capítulo 6

### Conclusões e estudos futuros

#### 6.1 Conclusões

Nesta tese foram utilizados dois métodos da observação da descontaminação, nomeadamente métodos indiretos e diretos. Os métodos indiretos da observação da descontaminação utilizados foram:

- Evolução da resistividade elétrica: Através das medições da resistividade eléctrica do solo e do pH foi possível estimar a evolução da concentração de água lixiviante na célula de solo. Este método pode ser usado *in situ*, posteriormente a uma calibração das funções que relacionam a concentração de solução aquosa de água lixiviante e o valor de resistividade eléctrica do solo ( $L\%(\rho)$ ). A calibração das funções é feita em laboratório e para maior rigor é feita para mais do que um valor de pH. Para a utilização *in situ*, deve ser medida no local a resistividade e o pH. No presente trabalho as funções  $L\%(\rho)$  foram definidas para a areia APAS 20 e para a argila Caulinite.
- Observação visual: A água lixiviante utilizada nos ensaios desta tese tem uma cor muito característica e de fácil identificação. Visualmente foi possível verificar-se, ao longo do ensaio o solo a esbranquiçar.
- Descoloração devido a lavagem ou a oxidação: Este método consiste em lavar o solo no fim do ensaio de EKT com água de torneira e oxigenada, respetivamente. Caso o método apresente resultados pouco distintos então conclui-se que a descontaminação eletrocinética foi eficaz. Os resultados deste método são obtidos através de observação visual.

O método direto da observação da descontaminação utilizado foi a análise química. Este método consiste em analisar quimicamente amostras de solo antes e depois da realização do ensaio de EKT. Neste estudo foram realizados ensaios de espectroscopia para detetar os metais, e por digestão ácida para a matéria orgânica. Através da comparação entre as análises químicas realizadas antes e depois do ensaio de EKT é possível quantificar a eficácia do tratamento eletrocinético.

Os quatro métodos apresentados mostraram resultados bastante coerentes entre si, em todos se conseguiu concluir que o tratamento eletrocinético foi eficaz. Num panorama geral é possível utilizar técnicas de eletrocinese para descontaminação de terrenos estratificados, pois os resultados apresentaram uma diminuição significativa da concentração de água lixiviante.

No final dos ensaios realizados na caixa de EKT, com o fluido intersticial água lixiviante, foram realizadas análises químicas a amostras de solo junto ao ânodo e ao cátodo. Ao comparar os resultados do estrato de argila, deste trabalho, teste C, com a argila do trabalho de Gingine (2017), o parâmetro da carência de oxigênio mostrou ser melhor na presença da camada de areia. A concentração de íons potássio e sódio apresentou melhorias mais significativas junto ao cátodo no teste 4, mas junto ao ânodo no teste C e o teste C apresentou melhorias mais significativas para a concentração de íons crômio e ferro.

A eletrocinese estabelece a relação entre o potencial elétrico e o movimento da água e íons. Quando é aplicado um potencial elétrico a uma massa de solo saturada, a água move-se do ânodo (+) para o cátodo (-) podendo ocorrer eletrólise da água. A eficiência da eletrosmose é definida pela quantidade de água movida por unidade de corrente elétrica, ou seja, pelo coeficiente de permeabilidade eletrosmótica. Em argilas este tratamento é bastante eficaz devido às suas características, pois são materiais com uma grande densidade de carga de superfície e uma grande área de superfície específica. Com a introdução da estratificação, uma camada de areia, a complexidade aumenta porque também têm que se considerar os fenômenos hidráulicos. Neste caso é necessário compreender que tipo de interação existe entre estratos, ou seja, entre fenômenos eletrocinéticos e hidráulicos.

## **6.2 Estudos futuros**

Com o objetivo de completar o presente trabalho sugere-se que sejam realizados ensaios:

- Ensaios de eletrocinese com diferentes configurações de solo. Por exemplo estratos verticais (perpendiculares ao escoamento) e estratos de argila com um estrato de areia entre estes, para se entender a eficácia desta técnica em terrenos estratificados distintos do estudado;
- Ensaios de eletrocinese semelhantes onde seja monitorizada a movimentação de fluido por osmose do estrato de argila para o de areia, para que possa ser confirmada a interação entre estratos proposta no presente trabalho;
- Estudo de técnicas de descontaminação alternativas, por exemplo com recurso a bactérias, para se poder comparar a técnica eletrocinética com outras técnicas alternativas;
- Análise de custos envolvidos no processo de descontaminação através da técnica de eletrosmose, para avaliar se a sua implementação na prática é viável.

Falta também fazer uma análise aos custos envolvidos no processo de descontaminação por eletrosmose, para avaliar se a sua implementação na prática é viável.

É importante também comparar esta técnica com outras alternativas que possam ser usadas para a mesma finalidade. Para tal, também é importante o estudo de técnicas de descontaminação alternativas, por exemplo com recurso a bactérias.

A fim de se poder prever custos do uso da técnica, é necessário quantificar o aumento de eficiência devido à presença de estratos arenosos. Com os custos quantificados é possível comparar esta técnica economicamente com outras, por exemplo acelerar a drenagem pela areia com vácuo.



# Referências Bibliográficas

## Livros

Chang, R. Química, 8ª edição, McGraw-Hill, Portugal, 2005, ISBN 84-481-4527-5

Quintela, A. F. C. Hidráulica, 11ª edição, Fundação Calouste Goulbenkian, Lisboa, 2013, ISBN 978-972-31-0775-3

## Artigos

Acar, Y., Alshawabkeh, A. (1993). Principles of Electrokinetic Remediation, Environ. Sci. Technol. 27, 2638-2647.

Adamson, L.G., Chilingar, G., Beeson, C., Armstrong, R., (1966). Electrokinetic dewatering, consolidation and stabilization of soils, Eng. Geol. 1, 291–304.

Almeira O., J., Peng, C.S., Abou-Shady, A., 2012. Simultaneous removal of cadmium from kaolin and catholyte during soil electrokinetic remediation. Desalination 300, 1–11.

Esrig, M., (1968). Pore pressures, consolidation, and electrokinetics. J. Soil Mech. Found. Eng. Div., ASCE 94(SM4), 899–921.

Fourie, A.B., Johns, D.G., Jones, C.J.F.P. (2007). Dewatering of mine tailings using electrokinetic geosynthetics. Can. Geotech. J. 172, 160–172.

Gabrieli, L., Jommi, C., Musso, G., Romero, E., (2008). Influence of electroosmotic treatment on the hydro-mechanical behaviour of clayey silts: preliminary experimental results. J. Appl. Electrochem. 38, 1043–1051.

Gingine, V. (2017). Consolidation and decontamination of clayey soils using electrokinetic treatment, PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon University.

Glendinning, S., Lamont-Black, J., Jones, C.J.F.P. (2007). Treatment of sewage sludge using electrokinetic geosynthetics. J. Hazard. Mater. 139, 491–499.

Gomes, H.I., Dias-Ferreira, C., Ribeiro, A.B., 2012. Electrokinetic remediation of organochlorines in soil: Enhancement techniques and integration with other remediation technologies. Chemosphere 87, 1077–1090.

Greenhouse, J. P., Monier-Williams, M. (1985). Geophysical Monitoring of ground water contamination around wastw disposal sites, Fall 1985, 63-69.

Hamed, J.T., Bhadra, A. (1997). Influence of current density and pH on electrokinetics, J. Hazard. Mater. 55, 279–294.

Hansen, H.K., Lamas, V., Gutierrez, C., Nuñez, P., Rojo, A., Cameselle, C., Ottosen, L.M., 2013. Electro-remediation of copper mine tailings. Comparing copper removal efficiencies for two tailings of different age. Miner. Eng. 41, 1–8.

Hansen, H.K., Rojo, A., Ottosen, L.M., 2012. Electrodialytic remediation of copper mine tailings. Procedia Eng. 44, 2053–2055.

HU, L., WU, W., Wu, H.,(2012). Numerical model of electro-osmotic consolidation in clay. Geotechnique 62, 537–541.

- Kim, G.-N., Kim, S., Moon, J.-K., Hyun, J., 2015a. Removal of uranium from soil using full-sized washing electrokinetic separation equipment. *Ann. Nucl. Energy* 81, 188–195. doi:10.1016/j.anucene.2015.01.046
- Kim, G.-N., Kim, S.-S., Park, U.-R., Moon, J.-K., 2015b. Decontamination of Soil Contaminated with Cesium using Electrokinetic-electrodialytic Method. *Electrochim. Acta* 3–7. doi:10.1016/j.electacta.2015.03.208
- Lysenko, L.L., 2014. Enhancement of the electrokinetic remediation method of fine-dispersed clay soils. *Russ. J. Gen. Chem.* 84, 2532–2538. doi:10.1134/S1070363214130076
- Machete, I. F. (2015). *Quimismo de Águas Portuguesas para Consumo e Potenciais Benefícios para a Saúde Humana*, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisbon University, 31-35.
- Micic, S., Shang, J.Q., Lo, K.Y. (2003). Electrocementation of a marine clay induced by electrokinetics. *Int. J. Offshore Polar Eng.* 13, 308–315.
- Mitchell, J.K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published.
- Mota, R., et al, (2004). Granite fracturing and incipient pollution beneath a recent landfill facility as detected by geoelectrical surveys, *Journal of Applied Geophysics* 57 (2004) 11 –22.
- Ottosen, L.M., Jensen, P.E., Kirkelund, G.M., Dias-Ferreira, C., Hansen, H.K., 2012. Electrodialytic remediation of heavy metal polluted soil - Treatment of water saturated or suspended soil. *Chem. Eng. Trans.* 28, 103–108. doi:10.3303/CET1228018
- Reddy, K.R. (2010). Technical challenges to in-situ remediation of polluted sites. *Geotech. Geol. Eng.* 28, 211–221.
- Saichek, R.E., Reddy, K.R. (2003). Effect of pH control at the anode for the electrokinetic removal of phenanthrene from kaolin soil. *Chemosphere* 51, 273–287. doi:10.1016/S0045-6535(02)00849-4
- Santamarina, J., Klein, K. and Fam, M. (2001). *Soils and Waves*. John Wiley & Sons, pp. 336-341.
- Santos, J (2012). *Uso de métodos eléctricos para aceleração da consolidação em solos finos argilosos*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisbon University.
- Segall, B., Bruell, C. (1992). Electroosmotic contaminant-removal processes. *J. Environ. Eng.* 118, 84–100.
- Tamagnini, C., Jommi, C., Cattaneo, F. (2010). A model for coupled electro-hydro-mechanical processes in fine grained soils accounting for gas generation and transport. *An. Acad. Bras. Cienc.* 82, 169–193. doi:10.1590/S0001-37652010000100014
- Wang, L.J., Liu, S.H. (2012). Numerical Simulation of Deformation and Fluid Flow of Marine Sediment under Electro-Osmosis Consolidation. *Earth Sp.* 2012 927–938. doi:10.1061/9780784412190.099
- Yeung, A.T., Hsu, C., Menon, R.M. (1997). Physicochemical soil-contaminant interactions during electrokinetic extraction. *J. Hazard. Mater.* 55, 221–237. doi:10.1016/S0304-3894(97)00017-4
- Youd, T. L. (1973). Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sand, *Spec. Tech. Pub.* 523, ASTM, pp. 98–122.
- Yuan, J. and Hicks, M.A. (2013). Large deformation elastic electro-osmosis consolidation of clays. *Computers and Geotechnics* 54, 60–68.



Zhang, P., Jin, C., Sun, Z., Huang, G., She, Z., 2016. Assessment of Acid Enhancement Schemes for Electrokinetic Remediation of Cd/Pb Contaminated Soil. *Water, Air, Soil Pollut.* 227, 217. doi:10.1007/s11270-016-2879-y.



## **Anexos**

Anexo I: Análise Granulométrica à areia APAS 20

Anexo II: Certificação da areia APAS 20

Anexo III: Boletins de análises químicas



**DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO**

Nº 10/2013

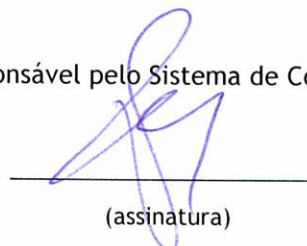
1. Código de identificação único do produto-tipo: **Agregado 0/2**
2. Número do tipo, do lote ou da série, ou quaisquer outros elementos que permitam a identificação do produto de construção, nos termos do nº 4 do artigo 11º: **Refª APAS 20 (registo na guia de remessa)**
3. Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, de acordo com a especificação técnica harmonizada aplicável, tal como previsto pelo fabricante: **NP EN 13139:2005; NP EN 13139:2005/AC:2010 (agregado para argamassas).**
4. Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante, nos termos do nº 5 do artigo 11º: **Areipor - Areias Portuguesas, Lda. Rua da Alameda, Ap 755 - 2671-601 Bucelas**  
**E-mail: [geral@areipor.mail.pt](mailto:geral@areipor.mail.pt) Telefone: 21 968 80 10 Fax: 21 968 80 19**
5. Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V: **Sistema de avaliação 2+**
6. No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada: **E.I.C. - Empresa Internacional de Certificação, organismo notificado, nº 1515, realizou a inspeção inicial e o acompanhamento, apreciação e aprovação contínuos do controlo da produção em fábrica, no âmbito do sistema 2+, e emitiu o certificado de conformidade do controlo da produção em fábrica, nº 1515-CPD-0205 de 30 de maio de 2013 e válido desde que não se alterem significativamente as condições definidas nas normas harmonizadas ou as condições de fabrico e do controlo de produção em fábrica.**
7. Desempenho declarado

Características	Desempenho	Norma harmonizada
Dimensão Nominal - Tamanho das partículas	0/2	NP EN 13139:2005 NP EN 13139:2005/AC:2010
Descrição petrográfica	Areia quartzosa com dureza elevada. Elemento rolado de forma alongada, textura granoblástica, poligonal e heterogranular constituída por Quartzo, Zircão e Turmalina.	
Teor de finos	Categoria 1	
Massa Volúmica	$\rho_a = 2,69$ ; $\rho_{rd} = 2,67$ ; $\rho_{ssd} = 2,68$	
Absorção de água	0,3%	
Teor de cloretos	< 0,01%	
Teor de enxofre total	< 0,1%	
Teor de húmus	Mais claro que padrão	

Notas: Resultados que não constam, não foram realizados ou não solicitados.  
 A origem dos valores dos ensaios químicos são da responsabilidade do produtor da matéria-prima.

8. O desempenho do produto identificado nos pontos 1 e 2 é conforme com o desempenho declarado no ponto 7.
- A presente declaração de desempenho é emitida sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado no ponto 4.  
 Assinado por e em nome do fabricante por:

Vítor Mordido, Responsável pelo Sistema de Controlo em Fábrica



(assinatura)

Bucelas, 17 fevereiro 2014





## LABORATÓRIO DE GEOTECNIA

### ANÁLISE GRANULOMÉTRICA LNEC - E 239

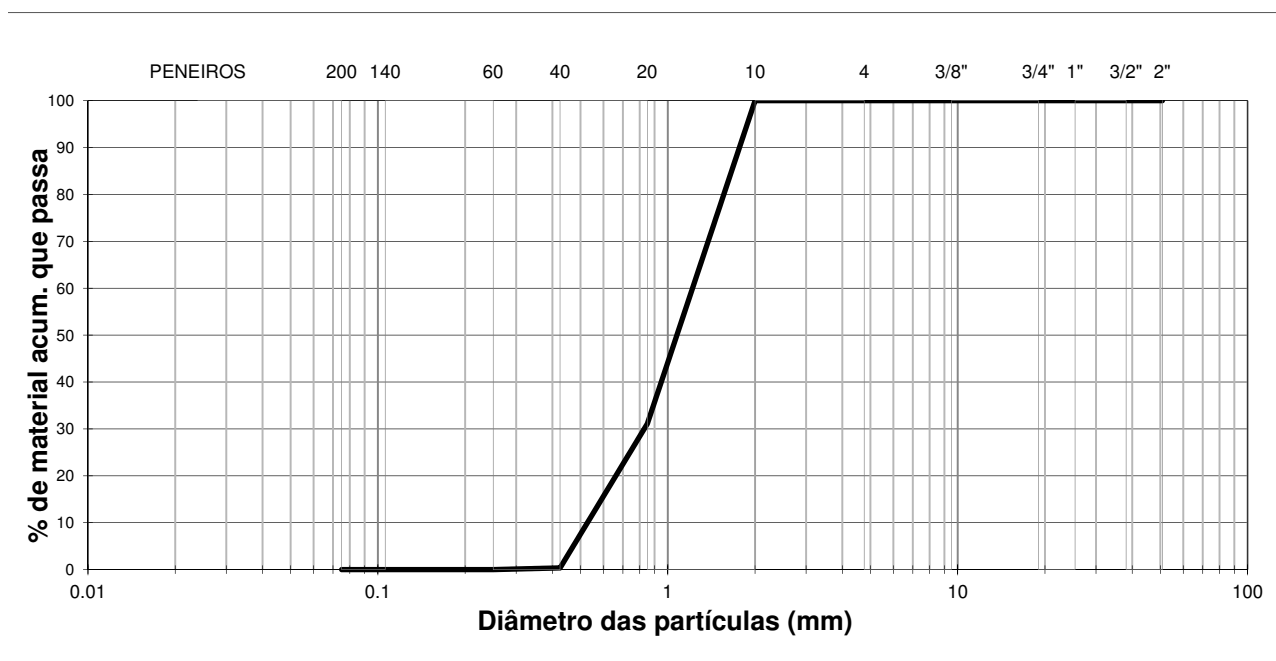
REFERÊNCIA: APAS 20 DATA: Março 2014

AMOSTRA: Fornecida ao Laboratório de Geotecnia PROFUNDIDADE: \_\_\_\_\_

Massa total da amostra mt (g)= 100.00  
Massa retida no peneiro de 2.00 mm (# 10) m10 (g)= 0.00  
Massa passada no peneiro de 2.00 mm (# 10) m'10 (g)= 100.00

#### FRACÇÃO RETIDA NO PENEIRO DE 2.00 mm (# 10)

PENEIROS	MASSA RETIDA (g) mx	% RETIDA Nx=100 mx / mt	%ACU. RETIDA N'x	%ACU. PASSA N''x=100 - N'x
2"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/2"	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00
# 4	0.00	0.00	0.00	100.00
# 10	0.00	0.00	0.00	100.00
#20	68.90	68.90	68.90	31.10
#40	30.74	30.74	99.64	0.36
#60	0.36	0.36	100.00	0.00
#140	0.00	0.00	100.00	0.00
#200	0.00	0.00	100.00	0.00









### Análise Química de Árgila cátodo

**Requisição nº** 03901 de 2017-08-22  
**Início da Análise em:** 2017-08-22  
**Conclusão da Análise em:** 2017-09-11

### Dados da Amostra

**Origem:** ---

### Colheita

Colhida por: Cliente  
Ponto de Colheita:  
Efectuada em:

**Obs:** ---

**Rótulo:** W=40,85%

### Resultados

Parâmetro		Resultado	Método
Carência Química de Oxigénio	(*)	2,0 g(O <sub>2</sub> )/Kg	SMEWW 5220 B
Potássio	(a)	0,27 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Sódio	(a)	57 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Cobre	(a)	< 10 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Crómio	(a)	20 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Ferro	(a)	4,4 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007

### Observações

m.s. - matéria seca  
(a) Digestão da amostra: M.M. 10.1 (2005-05-16) (Microondas).

Lisboa, 2017-09-12

O Laboratório de Análises

Mário Dias  
(Responsável de Núcleo)

**O ensaio assinalado com (\*) não está incluído no âmbito da acreditação do LAIST**

Os resultados constantes neste Boletim referem-se exclusivamente à amostra e parâmetros analisados. Este Boletim só pode ser reproduzido na totalidade.  
A apresentação de um resultado incluindo o símbolo < (menor), representa o limite de quantificação para esse parâmetro pelo método indicado. Lista de Métodos/Técnicas fornecida mediante solicitação.





**Análise Química de Árgila ânodo**

**Requisição nº** 03901 de 2017-08-22  
**Início da Análise em:** 2017-08-22  
**Conclusão da Análise em:** 2017-09-11

**Dados da Amostra**

**Origem:** ---

**Colheita**

Colhida por: Cliente  
Ponto de Colheita:  
Efectuada em:

**Obs:** ---

**Rótulo:** W=44,33%

**Resultados**

**Cliente:**

FUNDEC - IST - DECivil  
Avenida Rovisco Pais  
1049-001 Lisboa

**Matriz:** Amostra Sólida

Parâmetro		Resultado	Método
Carência Química de Oxigénio	(*)	2,1 g(O <sub>2</sub> )/Kg	SMEWW 5220 B
Potássio	(a)	1,2 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Sódio	(a)	0,35 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Cobre	(a)	< 10 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Crómio	(a)	18 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Ferro	(a)	2,4 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007

**Observações**

m.s. - matéria seca  
(a) Digestão da amostra: M.M. 10.1 (2005-05-16) (Microondas).

Lisboa, 2017-09-12

O Laboratório de Análises

Mário Dias  
(Responsável de Núcleo)

**O ensaio assinalado com (\*) não está incluído no âmbito da acreditação do LAIST**

Os resultados constantes neste Boletim referem-se exclusivamente à amostra e parâmetros analisados. Este Boletim só pode ser reproduzido na totalidade.  
A apresentação de um resultado incluindo o símbolo < (menor), representa o limite de quantificação para esse parâmetro pelo método indicado. Lista de Métodos/Técnicas fornecida mediante solicitação.





Av. Rovisco Pais - 1049-001 Lisboa  
Tel: 21.8417954 Fax: 21.8417952 email: LabAnalises@ist.utl.pt  
NIF: 501507930 http://la.ist.utl.pt/

**Cliente:**

FUNDEC - IST - DECivil

Avenida Rovisco Pais

1049-001 Lisboa

**Análise Química de Argila não Tratada**

**Requisição nº** 03901 de 2017-08-22

**Início da Análise em:** 2017-08-22

**Conclusão da Análise em:** 2017-09-11

**Dados da Amostra**

**Origem:** ---

**Matriz:** Amostra Sólida

**Colheita**

Colhida por: Cliente

Ponto de Colheita:

Efectuada em:

**Obs:** ---

**Rótulo:** W=35,11%

**Resultados**

Parâmetro		Resultado	Método
Carência Química de Oxigénio	(*)	2,4 g(O <sub>2</sub> )/Kg	SMEWW 5220 B
Potássio	(a)	1,8 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Sódio	(a)	0,60 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Cobre	(a)	< 10 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Crómio	(a)	42 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Ferro	(a)	5,7 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007

**Observações**

m.s. - matéria seca

(a) Digestão da amostra: M.M. 10.1 (2005-05-16) (Microondas).

Lisboa, 2017-09-12

O Laboratório de Análises

Mário Dias  
(Responsável de Núcleo)

**O ensaio assinalado com (\*) não está incluído no âmbito da acreditação do LAIST**

Os resultados constantes neste Boletim referem-se exclusivamente à amostra e parâmetros analisados. Este Boletim só pode ser reproduzido na totalidade.  
A apresentação de um resultado incluindo o símbolo < (menor), representa o limite de quantificação para esse parâmetro pelo método indicado. Lista de Métodos/Técnicas fornecida mediante solicitação.





Av. Rovisco Pais - 1049-001 Lisboa  
Tel: 21.8417954 Fax: 21.8417952 email: LabAnalises@ist.utl.pt  
NIF: 501507930 http://la.ist.utl.pt/

**Cliente:**

FUNDEC - IST - DECivil

Avenida Rovisco Pais

1049-001 Lisboa

**Análise Química de Areia cátodo**

**Requisição nº** 03901 de 2017-08-22

**Início da Análise em:** 2017-08-22

**Conclusão da Análise em:** 2017-09-11

**Dados da Amostra**

**Origem:** ---

**Matriz:** Amostra Sólida

**Colheita**

Colhida por: Cliente

Ponto de Colheita:

Efectuada em:

**Obs:** ---

**Rótulo:** W=30,40%

**Resultados**

Parâmetro		Resultado	Método
Carência Química de Oxigénio	(*)	0,77 g(O <sub>2</sub> )/Kg	SMEWW 5220 B
Potássio	(a)	60 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Sódio	(a)	< 60 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Cobre	(a)	< 10 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Crómio	(a)	< 5 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Ferro	(a)	1,1 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007

**Observações**

m.s. - matéria seca

(a) Digestão da amostra: M.M. 10.1 (2005-05-16) (Microondas).

Lisboa, 2017-09-12

O Laboratório de Análises

Mário Dias  
(Responsável de Núcleo)

**O ensaio assinalado com (\*) não está incluído no âmbito da acreditação do LAIST**

Os resultados constantes neste Boletim referem-se exclusivamente à amostra e parâmetros analisados. Este Boletim só pode ser reproduzido na totalidade.  
A apresentação de um resultado incluindo o símbolo < (menor), representa o limite de quantificação para esse parâmetro pelo método indicado. Lista de Métodos/Técnicas fornecida mediante solicitação.







Av. Rovisco Pais - 1049-001 Lisboa  
Tel: 21.8417954 Fax: 21.8417952 email: LabAnalises@ist.utl.pt  
NIF: 501507930 http://la.ist.utl.pt/

**Cliente:**

FUNDEC - IST - DECivil

Avenida Rovisco Pais

1049-001 Lisboa

**Análise Química de Areia ânodo**

**Requisição nº** 03901 de 2017-08-22

**Início da Análise em:** 2017-08-22

**Conclusão da Análise em:** 2017-09-11

**Dados da Amostra**

**Origem:** ---

**Matriz:** Amostra Sólida

**Colheita**

Colhida por: Cliente

Ponto de Colheita:

Efectuada em:

**Obs:** ---

**Rótulo:** W=31,22%

**Resultados**

Parâmetro		Resultado	Método
Carência Química de Oxigénio	(*)	0,27 g(O <sub>2</sub> )/Kg	SMEWW 5220 B
Potássio	(a)	0,12 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Sódio	(a)	< 60 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Cobre	(a)	< 10 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Crómio	(a)	< 5 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Ferro	(a)	0,35 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007

**Observações**

m.s. - matéria seca

(a) Digestão da amostra: M.M. 10.1 (2005-05-16) (Microondas).

Lisboa, 2017-09-12

O Laboratório de Análises

Mário Dias  
(Responsável de Núcleo)

**O ensaio assinalado com (\*) não está incluído no âmbito da acreditação do LAIST**

Os resultados constantes neste Boletim referem-se exclusivamente à amostra e parâmetros analisados. Este Boletim só pode ser reproduzido na totalidade.  
A apresentação de um resultado incluindo o símbolo < (menor), representa o limite de quantificação para esse parâmetro pelo método indicado. Lista de Métodos/Técnicas fornecida mediante solicitação.





Av. Rovisco Pais - 1049-001 Lisboa  
Tel: 21.8417954 Fax: 21.8417952 email: LabAnalises@ist.utl.pt  
NIF: 501507930 http://la.ist.utl.pt/

**Cliente:**

FUNDEC - IST - DECivil

Avenida Rovisco Pais

1049-001 Lisboa

**Análise Química de Areia não Tratada**

**Requisição nº** 03901 de 2017-08-22

**Início da Análise em:** 2017-08-22

**Conclusão da Análise em:** 2017-09-11

**Dados da Amostra**

**Origem:** ---

**Matriz:** Amostra Sólida

**Colheita**

Colhida por: Cliente

Ponto de Colheita:

Efectuada em:

**Obs:** ---

**Rótulo:** W=20,87%

**Resultados**

Parâmetro		Resultado	Método
Carência Química de Oxigénio	(*)	0,95 g(O <sub>2</sub> )/Kg	SMEWW 5220 B
Potássio	(a)	0,73 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Sódio	(a)	0,47 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Cobre	(a)	< 10 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Crómio	(a)	< 5 mg/kg (m.s.)	ISO 11885:2007
Ferro	(a)	0,31 g/kg (m.s.)	ISO 11885:2007

**Observações**

m.s. - matéria seca

(a) Digestão da amostra: M.M. 10.1 (2005-05-16) (Microondas).

Lisboa, 2017-09-12

O Laboratório de Análises

Mário Dias  
(Responsável de Núcleo)

**O ensaio assinalado com (\*) não está incluído no âmbito da acreditação do LAIST**

Os resultados constantes neste Boletim referem-se exclusivamente à amostra e parâmetros analisados. Este Boletim só pode ser reproduzido na totalidade.  
A apresentação de um resultado incluindo o símbolo < (menor), representa o limite de quantificação para esse parâmetro pelo método indicado. Lista de Métodos/Técnicas fornecida mediante solicitação.

