



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DEYVID DE SOUZA ELIAS**

**CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL E SUA APLICAÇÃO**  
**COMO BARREIRA IMPERMEABILIZANTE**

**FORTALEZA**

**2018**

DEYVID DE SOUZA ELIAS

CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL E SUA APLICAÇÃO COMO  
BARREIRA IMPERMEABILIZANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

E41c Elias, Deyvid de Souza.  
Caracterização de cinzas de carvão mineral e sua aplicação como barreira impermeabilizante / Deyvid de Souza Elias. – 2018.  
231 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares.

1. Cinzas. 2. Geotecnia. 3. Barreira impermeabilizante. 4. Permeabilidade. I. Título.

CDD 624.15

---

DEYVID DE SOUZA ELIAS

CARACTERIZAÇÃO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL E SUA APLICAÇÃO COMO  
BARREIRA IMPERMEABILIZANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 09/08/2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dra. Suelly Helena de Araújo Barroso  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profª. Dra. Maria Claudia Barbosa  
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

*Dedico este trabalho aos meus pais, Francisco Elias Junior e Nilsa de Souza Elias, por todo o apoio, cumplicidade, amor e carinho.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria, ao final de mais esta etapa da minha vida, prestar meus sinceros agradecimentos a todos, pessoas e instituições, que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Agradeço a Deus, por me guiar nessa jornada, me proporcionando tantas coisas boas durante o percurso, e por me dá forças para ultrapassar os obstáculos e alcançar mais esta vitória.

Aos meus pais, Francisco Elias Junior e Nilsa de Souza Elias, por serem meus melhores amigos, me apoiando em todos os momentos, sempre com muito amor e carinho.

As minhas avós Marta Maria Cardoso de Oliveira e Nelcina Pinheiro de Souza, pelo amor e carinho, que sempre me deram.

A minha noiva, Jocelma Freitas da Silva, pelo amor, cumplicidade e incentivo que sempre me deu, estando sempre ao meu lado.

Ao meu amigo Pedro Henrique Freitas, pela sincera amizade

Aos meus tios e tias, primos e primas e todos familiares pelo apoio, carinho e respeito com que sempre me trataram, sendo indispensáveis para que eu pudesse seguir em frente.

Agradeço ao meu primo Cleidson Bastos da Silva, pela parceria em todos os momentos, sendo mais do que um primo, um grande irmão.

Aos colegas Anaksmano Magalhães da Silva e Vinícius Ferraz Reis, pela sincera amizade e apoio que sempre me deram.

Ao meu amigo de jornada, presente em momentos difíceis e grande colaborador deste trabalho, Henrique Petisco de Souza pelo apoio e amizade.

Agradeço ao meu orientador, Anderson Borghetti Soares, por sua valiosa contribuição, me orientando com empenho e dedicação. Obrigado pelo interesse, disponibilidade, incentivo e principalmente pela confiança em mim depositada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos técnicos de laboratório, Anselmo de Oliveira Clemente, Roberto Antônio Cordeiro da Silva e Joel Pedrosa Sousa pelo apoio, amizade e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a toda a equipe do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, do Laboratório de Microscopia Eletrônica, do Laboratório de Raios-X, do Laboratório Análise de Águas e do Laboratório de Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará (UFC).

As empresas Energia Pecém e a ENEVA pelo apoio e incentivo a pesquisa, mostrando-se serem empresas com responsabilidade socioambiental, compromissadas com o bem-estar social, e alinhadas com as perspectivas e demandas da sociedade moderna.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida, pelo apoio e incentivo a pesquisa, sendo responsável direta pelo desenvolvimento educacional, científico e tecnológico no Brasil.

A todos os professores da Universidade Federal do Ceará (UFC), em particular aos professores de Geotecnia do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, que com maestria e dedicação me proporcionaram momentos de valiosos aprendizados. Também, a todos os funcionários dessas instituições pelo honra e privilégio de tê-los conhecido e compartilhado importantes momentos da minha vida com todos.

A todos os colegas que sempre estiveram ao meu lado, trocando boas ideias, dando boas risadas e compartilhando de momentos ímpares.

A todos, Muito Obrigado!

## RESUMO

A engenharia moderna em consonância com a sociedade contemporânea deve prever em qualquer processo produtivo a correta destinação dos resíduos gerados por suas atividades. A responsabilidade socioambiental torna obrigatório a elaboração de planos de gerenciamento de resíduos, para que sejam dadas aos mesmos as corretas destinações e esses não venham causar danos ao meio ambiente e a saúde do homem. Na geração de energia elétrica, as Usinas Termoelétricas (UTE's) geram enormes quantidades de resíduos oriundos da queima do carvão mineral (cinzas leves, cinzas grossas, escórias e resíduos de dessulfuração). Uma parte desses resíduos é utilizado na indústria cimenteira, contudo, há volumes consideráveis que não são aproveitados. Esse fato estimulou o desenvolvimento de diversos estudos com o intuito de encontrar alternativas técnicas, econômicas e ambientalmente viáveis para a utilização das cinzas de carvão mineral. Nesse contexto as empresas Energia Pecém e ENEVA em parceria com a Universidade Federal do Ceará desenvolveram projeto de pesquisa que buscou alternativas para o reaproveitamento das cinzas geradas pelas UTE's Porto Pecém I e II, sendo o presente estudo parte desse projeto. Neste trabalho, realizou-se a caracterização mineralógica, morfológica, físico-química e geotécnica de cinzas de carvão mineral, para que a partir das suas características fosse proposta uma destinação adequada. O objetivo do estudo foi avaliar a utilização das cinzas de carvão como material geotécnico, especificamente como barreiras impermeabilizantes de fundo de aterros de resíduos (*liners*), verificando se as mesmas reúnem as condições necessárias para tal aplicação. Com base nas análises realizadas observou-se que as cinzas coletadas, em uma bacia de armazenamento da empresa Energia Pecém, eram bastante heterogêneas, apresentando variabilidade significativa para diversos parâmetros. Isso motivou a proposição de um material compósito constituído pela mistura de todas as amostras de cinzas individuais, denominada cinzas compostas, que fossem mais representativas de todo o volume de resíduos e apresentasse valores próximos à média das amostras individuais. Todavia, observou-se que as cinzas compostas não apresentavam a condutividade hidráulica necessária para sua aplicação como *liners* (na ordem de  $10^{-7}$  cm/s), o que levou à necessidade de avaliar misturas de um solo da região com cinzas em diferentes proporções. Foram propostas três misturas, das quais a mistura S70C30 (70% de massa de solo e 30% em massa de cinza), foi a única a atender os requisitos mínimos para emprego do material como liner, apresentando um coeficiente de permeabilidade saturada de  $4,26 \times 10^{-7}$  cm/s, que juntamente com outras características geotécnicas, mostrou-se adequada para o uso proposto.

**Palavras-chave:** Cinzas. Geotecnia. Barreira impermeabilizante. Permeabilidade



## ABSTRACT

Modern engineering in consonance with the contemporary society must foresee in any productive process the correct destination of the residues generated by its activities. Socio-environmental responsibility makes it mandatory to prepare waste management plans, so that they are given the correct destinations, and these do not cause harm to the environment and to human health. In the generation of electric energy, the Thermoelectric Power Plants (TPP's) generate enormous amounts of waste from the burning of the coal (light ashes, coarse ash, slag and desulphurisation residues). Some of this waste is used in the cement industry, however, there are considerable volumes that are not used. This fact stimulated the development of several studies with the aim of finding technical, economical and environmentally viable alternatives for the use of coal ash. In this context, the companies Energia Pecém and ENEVA, in partnership with the Federal University of Ceará, developed a research project that sought alternatives for the reuse of the ashes generated by Porto Pecém I and II UTE's, the present study being part of this project. In this work the mineralogical, morphological, physical-chemical and geotechnical characterization of coal ash was performed, so that from its characteristics a suitable destination was proposed. The objective of the study was to evaluate the use of coal ash as a geotechnical material, specifically as waterproofing bottom barriers of waste landfills (liners), verifying if they meet the necessary conditions for such application. Based on the analyzes carried out, it was observed that the ash collected in a storage basin of the company Energia Pecém were quite heterogeneous, presenting significant variability for several parameters. This led to the proposition of a composite material consisting of the mixture of all the individual ash samples, called composite ashes, which were more representative of the whole volume of residues and had values close to the average of the individual samples. However, it was observed that the composite ashes did not present the hydraulic conductivity required for their application as liners (in the order of  $10^{-7}$  cm/s), which led to the need to evaluate mixtures of a soil of the region with ashes in different proportions. Three mixtures were proposed, of which the S70C30 mixture (70% of soil mass and 30% in mass of ash) was the only one to meet the minimum requirements for use of the material as a liner, having a saturated permeability coefficient of  $4,26 \times 10^{-7}$  cm/s, which together with other geotechnical characteristics, proved adequate for the proposed use.

**Keywords:** Ashes; Geotechnical; Liners; Permeability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação do carvão mineral. ....	26
Figura 2 - Estágios de carbonificação. ....	27
Figura 3 - Reservas de carvão mineral. ....	28
Figura 4 - Mecanismos de formação das cinzas. ....	30
Figura 5 - Classificações granulométrica de diferentes órgãos. ....	33
Figura 6 - Forma das partículas de Solo: (a) característico de materiais granulares; (b) característico de argilas. ....	34
Figura 7 - Arranjo de partículas: (a) interação entre placas de argila; (b) interação entre partículas de silte ou areia; (c) interação entre grupos de placas de argila; (d) interação entre partículas de silte ou areia envoltos em argila; e (e) interação entre partículas pouco distinguível. ....	35
Figura 8 - Representação de aglomerados de partículas: (a), (b) e (c) conectores; d) agregações irregulares conectadas por aglomerados; e) agregações irregulares em formato de colmeia (honeycomb), f) agregações irregulares interagindo com matriz de partículas; g) filamentos de partículas de argila entrelaçados; h) filamentos de partículas de argila entrelaçados com intrusões de silte; i) matriz argilosa; j) matriz granular. ....	36
Figura 9 - Argilominerais: (a) unidade estrutural octaédrica; (b) unidade estrutural tetraédrica; (c) estrutura básica das caulinitas; (d) estrutura básica das montmorilonitas; (e) estrutura básica das ilitas. ....	39
Figura 10 - Tipos de formação porosa. ....	45
Figura 11 - Classificação do tamanho de poros: (a) microporos - característicos das argilas; (b) macroporos - característico de materiais granulares. ....	46
Figura 12 - Arranjos de partículas. ....	49
Figura 13 - Área Superficial Específica. ....	50
Figura 14 - Regime hidrogeológico e dinâmica da água nos solos. ....	54
Figura 15 - Experimento de Darcy. ....	56
Figura 16 - Tipos de Porosidade. ....	59
Figura 17 - Dupla camada de íons e o seu efeito na condutividade hidráulica. ....	60
Figura 21 - Princípio da técnica analítica de fluorescência de raios-x. ....	77
Figura 22 - Módulo I (completamente preenchido). ....	82
Figura 23 - Módulo II (parcialmente preenchido). ....	83

Figura 24 - Plano de amostragem: (a) pontos de superfície; (b) pontos em profundidade. ....	84
Figura 25 - Configuração final dos pontos de coleta. ....	85
Figura 26 - (a) Mini escavadeira (Fab. <i>Case Construcion</i> / Mod. <i>CX55B</i> ); (b) Escavadeira Hidráulica (Fab. <i>Case Construcion</i> / Mod. <i>CX350B</i> ). ....	86
Figura 27 - Localização dos Módulos do ASMOC e dos pontos de coleta de solo. ....	88
Figura 28 - Fluxograma do programa experimental. ....	89
Figura 29 - Britador empregado no processo de cominuição das cinzas. ....	97
Figura 30 - Célula do Triaxial. ....	102
Figura 31 - Espectrômetro de Raios-X. ....	110
Figura 32 - Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian AA240FS. ....	111
Figura 33 - Difratômetro para amostras policristalinas. ....	115
Figura 34 - Microscópio eletrônico de varredura com detector de EDS. ....	116
Figura 35 - MEV Cinza Composta (Amostra Compactada): (a) Micrografia ampliada x100 (Continua). ....	120
Figura 36 - MEV Cinza Leve (Amostra Compactada): (a) Micrografia x100; (b) Micrografia x1.5k. ....	122
Figura 37 - MEV S70C30 (Amostra Compactada): (a) Micrografia x100; (b) Micrografia x1,0k. ....	123
Figura 38 - MEV: (a) Micrografia CC x100; (b) Micrografia ASMOC x50; (c) Micrografia S50C50 x100; (d) Micrografia S70C30 x100. ....	124
Figura 39 - Curvas granulométricas das amostras de cinza composta (CC), solo (ASMOC) e misturas. ....	138
Figura 40 - Curvas de compactação das amostras selecionadas de cinzas individuais e de cinzas compostas. ....	144
Figura 41 - Curvas de compactação obtidas por diferentes autores: (a) cinzas leves (UBALDO, 2005); (b) cinzas grossas (UBALDO, 2005); (c) cinzas sem distinção (NIESHIKAWA <i>et al.</i> , 2002); (d) cinzas (ELIAS, 2018). ....	145
Figura 42 - Curvas polinomiais de 3º grau ajustadas aos pontos obtidos no ensaio de compactação para diferentes amostras: (a) cinza composta; (b) PA-7; (c) PP-1 (5,00-5,25m); e (d) curva de compactação obtida por Heineck (2002). ....	146
Figura 43 - Aspectos táteis e visuais observados nos pontos de umidade ótima das amostras de cinzas ensaiadas. ....	147
Figura 44 - Curvas de compactação da cinza composta, do solo ASMOC e das misturas. ....	148
Figura 45 - Variação do coeficiente de permeabilidade de acordo com o índice de vazios. .	151

Figura 46 - (a) Curva tensão desvio x deformação axial – ensaio triaxial; (b) envoltória de ruptura – ensaio triaxial; (c) Curva tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal – ensaio cisalhamento direto; (d) tensão cisalhante x tensão normal – ensaio cisalhamento direto. .... 158

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - CTC de materiais argilosos e não argilosos.....	44
Tabela 2 - Características e Funções de acordo com a classe de poros. ....	46
Tabela 3 - Densidade das partículas.....	48
Tabela 4 - Valores característicos de superfície específica.....	51
Tabela 5 - Principais características de barreiras impermeabilizantes por diferentes autores.	63
Tabela 6 - Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química. ....	72
Tabela 7 - Simbologia dos materiais e misturas usadas no presente trabalho.....	90
Tabela 8 - Ensaio de caracterização realizados com amostras coletadas de todos os pontos.	90
Tabela 9 - Amostras selecionadas.....	91
Tabela 10 - Resumo dos ensaios, método, quantidade de amostra (por ensaio) e pré-tratamento das amostras.....	92
Tabela 11 - Resumo dos ensaios realizados com as cinzas individuais selecionadas. ....	93
Tabela 12 - Resumo dos ensaios realizados com solo e as misturas. ....	93
Tabela 13 - Resumo dos ensaios realizados por laboratório e departamento (Continua).....	94
Tabela 14 - Resultados da difração de raios-X.....	119
Tabela 15 - Superfície específica, volume de poros, diâmetro médio dos poros das amostras selecionadas. ....	126
Tabela 16 - Composição em % de massa dos óxidos presentes nas amostras analisadas ....	127
Tabela 17 - Composição química de cinzas de diferentes termelétricas.....	129
Tabela 18 - Análise química – pH, CE, C, N e MO .....	130
Tabela 19 - Complexo Sortivo e CTC das amostras analisadas.....	132
Tabela 20 - Valores de Gs para cinzas de carvão mineral obtidos por outros autores. ....	134
Tabela 21 - Valores de Gs, para os materiais e misturas. ....	135
Tabela 22 - Distribuição granulométrica das amostras individuais de cinzas.....	136
Tabela 23 - Faixas Granulométricas e amostras de cinzas selecionadas. ....	137
Tabela 24 - Distribuição granulométrica da CC, solo e misturas.....	138
Tabela 25 - Limites de Atterberg (Continua). ....	139
Tabela 26 - Classificação SUCS das amostras de CC, solo e misturas. ....	140
Tabela 27 - Valores médios de $\omega_{ot}$ e $\gamma_d$ da CC, solo ASMOC e misturas.....	148
Tabela 28 - Coeficientes de permeabilidade saturada de cinzas obtidos em outros estudos.	150
Tabela 29 - Coeficientes de permeabilidade saturada das amostras de CC, solo e misturas.	151

Tabela 30 - Valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo para as amostras de CC, solo e misturas.....	156
Tabela 31 - Parâmetros de resistência ( $\varphi$ e $c$ ) encontrados através do ensaio de compressão triaxial e cisalhamento direto. ....	157
Tabela 32 - Concentração ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) de parâmetros inorgânicos (ânions) de extratos lixiviados solubilizado e percolados das amostras analisadas. ....	160
Tabela 33 - Concentração ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) de parâmetros inorgânicos (cátions) de extratos lixiviados solubilizado e percolados das amostras analisadas. ....	161
Tabela 34 - Perfil das Cinzas Compostas (características e propriedades). (Continua) .....	173

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características de acordo com textura.....	53
Quadro 2 - Tipos de Geossintéticos e suas principais características. ....	66
Quadro 3 - Valores de Gs. ....	133
Quadro 4 - Análise estatística – massa específica real dos grãos (Gs). ....	134
Quadro 5 - Valores de umidade ótima determinados para as amostras ensaiadas. ....	142
Quadro 6 - Valores de peso específico aparente seco máximo determinados para as amostras ensaiadas. ....	142
Quadro 7 - Análise estatística – umidade ótima ( $\omega_{ot}$ ). ....	143
Quadro 8 - Análise estatística – peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ). ....	143
Quadro 9 - Valores do coeficiente de permeabilidade saturada das amostras ensaiadas.....	149
Quadro 10 - Análise estatística – coeficiente de permeabilidade saturada. ....	150
Quadro 11 - Valores de intercepto coesivo das amostras ensaiadas.....	153
Quadro 12 - Análise estatística – intercepto coesivo.....	154
Quadro 13 - Valores de ângulo de atrito das amostras ensaiadas.....	154
Quadro 14 - Análise estatística – ângulo de atrito.....	155
Quadro 15 - Boxplot's dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) analisados nas amostras (Continua).....	162
Quadro 16 - Concentração dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) nos extratos lixiviados, solubilizados e percolados nas amostras analisadas. (Continua).....	164
Quadro 17 - Concentração de parâmetros inorgânicos (ânions) nas amostras de CC. ....	167
Quadro 18 - Concentração de parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) das amostras S30C70 e S30C70Ca5. (Continua).....	168
Quadro 19 - Concentração de parâmetros inorgânicos (cátions) para as amostras analisadas. (Continua).....	171

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemas e perguntas de pesquisa</b> .....	<b>22</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>22</b>
<b>1.2.1</b>	<b><i>Objetivo Geral</i></b> .....	<b>22</b>
<b>1.2.2</b>	<b><i>Objetivos específicos</i></b> .....	<b>23</b>
<b>1.3</b>	<b>Relevância do trabalho</b> .....	<b>23</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	<b>24</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1</b>	<b>Cinzas de carvão mineral</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Mecanismo de formação das cinzas e classificação das cinzas</i></b> .....	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Propriedades do Solo</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Textura e Estrutura dos Solos</i></b> .....	<b>32</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Mineralogia</i></b> .....	<b>36</b>
<b>2.2.2.1</b>	<b><i>Argilominerais</i></b> .....	<b>37</b>
<b>2.2.3</b>	<b><i>Carga Elétrica no Solo</i></b> .....	<b>40</b>
<b>2.2.3.1</b>	<b><i>Capacidade de Troca Catiônica (CTC)</i></b> .....	<b>42</b>
<b>2.2.4</b>	<b><i>Porosidade e densidade</i></b> .....	<b>44</b>
<b>2.2.4.1</b>	<b><i>Densidade dos Solos</i></b> .....	<b>47</b>
<b>2.2.5</b>	<b><i>Área Superficial Específica (ASE)</i></b> .....	<b>49</b>
<b>2.2.6</b>	<b><i>Propriedades físicas da areia, silte e argila</i></b> .....	<b>51</b>
<b>2.3</b>	<b>Condutividade Hidráulica nos Solos</b> .....	<b>53</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>Fatores que afetam a condutividade hidráulica</i></b> .....	<b>56</b>
<b>2.4</b>	<b>Barreiras Impermeabilizantes</b> .....	<b>61</b>
<b>2.4.1</b>	<b><i>Tipos de Barreiras Argilosas</i></b> .....	<b>62</b>
<b>2.4.1.1</b>	<b><i>Argilosas Naturais</i></b> .....	<b>62</b>
<b>2.4.1.2</b>	<b><i>Argilas Compactadas</i></b> .....	<b>62</b>
<b>2.4.1.3</b>	<b><i>Geossintéticos argilosos (GCL's) e geomembranas</i></b> .....	<b>65</b>
<b>2.5</b>	<b>Análises Ambientais</b> .....	<b>67</b>
<b>2.5.1</b>	<b><i>Ensaio Ambientais</i></b> .....	<b>68</b>
<b>2.6</b>	<b>Fundamentos físicos e químicos das análises laboratoriais</b> .....	<b>69</b>
<b>2.6.1</b>	<b><i>Capacidade de Troca Catiônica (CTC)</i></b> .....	<b>69</b>
<b>2.6.2</b>	<b><i>Superfície Específica</i></b> .....	<b>70</b>



2.6.2.1	<i>Modelo BET</i> .....	74
2.6.3	<i>Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX)</i> .....	76
2.6.4	<i>Difração de raios-X (DFRX)</i> .....	78
2.6.5	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	78
2.6.6	<i>Lixiviação</i> .....	79
2.6.7	<i>Solubilização</i> .....	80
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>81</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b> .....	<b>81</b>
3.1.1	<i>Cinzas</i> .....	82
3.1.2	<i>Solo</i> .....	87
3.1.3	<i>Misturas</i> .....	88
<b>3.2</b>	<b>Programa Experimental</b> .....	<b>88</b>
<b>3.3</b>	<b>Métodos e Procedimentos de Ensaio</b> .....	<b>95</b>
3.3.1	<i>Preparação das amostras</i> .....	95
3.3.2	<i>Caracterização Geotécnica</i> .....	97
3.3.2.1	<i>Determinação dos teores de umidade</i> .....	97
3.3.2.2	<i>Massa específica real dos grãos</i> .....	98
3.3.2.3	<i>Análise granulométrica</i> .....	98
3.3.2.4	<i>Limites de Atterberg (LL e LP)</i> .....	99
3.3.2.5	<i>Ensaio de compactação</i> .....	99
3.3.2.6	<i>Ensaio de permeabilidade a carga variável</i> .....	100
3.3.2.7	<i>Resistência - Cisalhamento Direto</i> .....	100
3.3.2.8	<i>Resistência – Ensaio de Compressão Triaxial</i> .....	101
3.3.3	<i>Caracterização físico-química</i> .....	102
3.3.3.1	<i>pH e C.E.</i> .....	104
3.3.3.2	<i>Complexo Sortivo (S, CTC-T, PST)</i> .....	105
3.3.3.3	<i>Análises de Matéria Orgânica (C, N, M.O.)</i> .....	106
3.3.3.4	<i>Superfície Específica e Porosidade</i> .....	108
3.3.3.5	<i>Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX)</i> .....	109
3.3.3.6	<i>Ensaio de lixiviação</i> .....	110
3.3.3.7	<i>Ensaio de solubilização</i> .....	112
3.3.3.8	<i>Ensaio Ambiental (Adaptado) – Metodologia para obtenção de extrato percolado</i> .....	112
3.3.4	<i>Caracterização mineralógica</i> .....	114
3.3.4.1	<i>Difração de raios-X</i> .....	115

3.3.4.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)</i> .....	116
4	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	118
4.1	<b>Difração de raios-X</b> .....	118
4.2	<b>Microscopia Eletrônica de Varredura</b> .....	120
4.3	<b>Superfície Específica</b> .....	125
4.4	<b>Fluorescência de raios-X</b> .....	126
4.5	<b>Análise Química (pH, CE, Complexo Sortivo, CTC e Matéria Orgânica)</b> .....	129
4.6	<b>Massa Específica Real dos Grãos</b> .....	133
4.7	<b>Análise Granulométrica</b> .....	135
4.8	<b>Limites de Atterberg (LL &amp; LP)</b> .....	139
4.9	<b>Classificação SUCS</b> .....	140
4.10	<b>Compactação</b> .....	141
4.11	<b>Condutividade Hidráulica</b> .....	148
4.12	<b>Cisalhamento Direto</b> .....	152
4.13	<b>Compressão Triaxial</b> .....	157
4.14	<b>Lixiviação, solubilização e ensaio ambiental adaptado</b> .....	158
4.15	<b>Características e Propriedades da Cinza Composta (CC)</b> .....	173
5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	176
5.1	<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	178
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	179
	<b>APÊNDICE A - COORDENADAS</b> .....	186
	<b>APÊNDICE B – ADSORÇÃO</b> .....	189
	<b>APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMETRICA</b> .....	201
	<b>APÊNDICE D – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X</b> .....	207
	<b>APÊNDICE E – TRIAXIAL</b> .....	217
	<b>ANEXO A – ANÁLISES AMBIENTAIS (LINHA DE PESQUISA 3)</b> .....	221
	<b>ANEXO B – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (LINHA DE PESQUISA 1)</b> . 227	

## 1 INTRODUÇÃO

Não há intervenção do homem no espaço no qual está inserido sem que tal ação gere ao meio ambiente algum impacto negativo por menor que seja. A sociedade contemporânea demanda avidamente por ações em que os impactos ambientais sejam mínimos, sendo necessário uma abordagem profissional e racional, que respeite os riscos que as atividades e obras civis podem causar ao meio ambiente. Contudo, apesar da grande pressão exercida por veículos de comunicação, governos, ONG's e a sociedade em geral, ainda é muito comum atividades industriais e comerciais que geram um volume muito grande de resíduos e rejeitos, que não são devidamente tratados ou tenham uma destinação adequada.

Uma alternativa bastante explorada é o reaproveitamento dos mesmos em outros processos produtivos, seja indiretamente como matéria prima para fabricação de novos produtos, ou diretamente, substituindo integralmente ou parcialmente determinado material. De uma forma ou de outra, há um consenso de que toda e qualquer intervenção humana no meio ambiente deve ser planejada de modo que sua nocividade a esse seja a menor possível. Portanto, torna-se indispensável que antes da execução de qualquer obra, seja contemplado em seu planejamento a correta destinação dos resíduos oriundos de tal atividade.

Muitos estados e municípios brasileiros contam com legislações específicas que tratam exatamente dessa necessidade, exigindo como pré-requisito básico para aprovação do projeto ou de licença para determinada atividade, a elaboração de um plano geral de destinação para rejeitos e resíduos, sejam esses gerados por uma atividade industrial ou pela execução de uma simples obra. Essas ações surgem de forma a impedir que ações antrópicas causem ainda mais prejuízos ao meio ambiente, sejam eles provenientes de erros de planejamento, projeto ou execução, ou ainda por ausência de ações para mitigar as consequências nocivas de tal obra ou atividade.

Dentre as diversas atividades humanas que geram resíduos e rejeitos, está a geração de energia em centrais termoelétricas. Para a geração de energia em usinas termoelétricas faz-se uso do carvão mineral, um combustível fóssil abundante na natureza, que possui um alto poder calorífico (libera elevada energia quando queimado), mas que também gera uma gama variada de subprodutos indesejáveis. Além da emissão de CO<sub>2</sub>, que causa o efeito estufa, há ainda resíduos sólidos variados, como as escórias, as cinzas de fundo e as cinzas leves, além dos impactos indiretos causados pela atividade de mineração, através da qual o carvão é extraído da natureza.

Diariamente toneladas de carvão são utilizadas na geração de energia, e essa enorme quantidade de carvão gera um volume considerável de resíduos. No Brasil, as maiores reservas de carvão mineral encontram-se na região sul, com o Rio Grande do Sul sendo detentor de 89% dessas reservas, seguido por Santa Catarina e Paraná respectivamente em 2º e 3º lugares. Segundo o Boletim Técnico nº 36 da Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC, 2016) do Rio Grande do Sul, só o estado produz anualmente 1,5 milhões de toneladas/ano de cinzas volantes e 700 mil toneladas/ano de cinzas de fundo, sendo que toda cinza de fundo é atualmente descartada, retornando para as cavas de mineração. No mesmo documento projeta-se que a produção de cinzas não utilizadas e a serem dispostas no meio ambiente, ultrapassará 5 milhões de toneladas por ano.

O Brasil vive um momento extremamente favorável à utilização de carvão mineral, com diversas usinas termoelétricas em operação no país e a previsão de projetos no sul do país e em diversos outros estados da federação. As reservas carboníferas do sul do Brasil possuem um carvão mineral com baixo poder calorífico, alto teor de matéria inorgânica e um significativo teor de enxofre, sendo esse principalmente empregado na geração de vapor em usinas termoelétricas. O atual cenário brasileiro, onde o país enfrenta uma grave crise hídrica aliada a medidas governamentais de incentivo, tem impulsionado a operação das UTE's e aumentado a importação de carvão de outros países, como a Colômbia, por exemplo, de onde é importado o carvão utilizado no Porto de Itaqui (Maranhão) e no Porto Pecém (Ceará). Nesse contexto, aumenta também a preocupação com os resíduos e impactos ambientais negativos advindos dessa atividade, tornando-se indispensável recolher esses materiais e dar a eles um destino adequado, para que não venham causar problemas e gerar custos as empresas.

Os resíduos sólidos têm sido alvo de diversos estudos, que buscam dar uma destinação adequada aos mesmos, dentre esses, muitos avaliam as possibilidades de reutilização das cinzas em diversas áreas e atividades distintas. UBALDO (2005), MENDONÇA (2007) e SOARES *et al.* (2009; 2010) estudaram respectivamente o uso de cinzas de carvão na composição de cobertura de rejeitos de mineração e a difusão de oxigênio em materiais de cobertura compostos por cinza. Já IZIDORO (2013) estudou a síntese e caracterização de zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão, enquanto MALLMANN e ZWONOK (2013) avaliaram a utilização de cinzas volantes em concretos compactados com rolo e TABORDA e NUÑEZ (2013) estudaram a funcionalidade de pavimentos com base em solos estabilizados com cinzas volantes e cal, entre outros. Nota-se, portanto, que apesar do caráter poluidor das cinzas, as mesmas possuem também um grande potencial de reutilização, seja

utilizadas com emprego direto e indireto em alguma etapa do processo construtivo ou na elaboração de novos “produtos” para aplicações em obras.

Nos processos de gaseificação ou combustão direta do carvão uma parte da matéria mineral não é consumida durante seu beneficiamento. Trata-se de um material sólido e inerte que se apresenta sob formas distintas como a escória, a cinza de fundo e a cinza leve. Esse material diferencia-se sobretudo pela sua granulometria, além de outros aspectos como teores de carbono não queimado, o que implica na forma como serão captados. As escórias são resfriadas com água e removidas pelo fundo das fornalhas. Já as cinzas de fundo são removidas por fluxos d’água e as cinzas volantes podem ser captadas através de precipitadores eletroestáticos, filtros de manga, lavadores úmidos entre outros. É a partir desse momento que começam a surgir os problemas. As termoelétricas geram uma grande quantidade de resíduos que devem ser corretamente descartados ou reaproveitados. Poucas são as alternativas de reuso (apenas uma pequena parte das cinzas volantes é empregada pela indústria cimenteira), de modo que as termoelétricas se veem obrigadas a estocar o material em enormes aterros ou depósitos. Entretanto, essa é uma solução que não se mostra viável a médio e longo prazo.

Sob essa perspectiva, as administrações de usinas termoelétricas têm incentivado o estudo e a pesquisa para encontrar alternativas mais adequadas para esses resíduos. Foi através dessa busca que a empresa ENEVA, responsável pelas usinas de Itaqui no Maranhão e Pecém I e Pecém II no Ceará, firmou uma parceria com a Universidade Federal do Ceará (UFC) buscando avaliar possíveis empregos e soluções técnicas de disposição para o material gerado.

O Complexo Termoelétrico do Pecém conta com duas unidades geradoras (UTE Pecém I e UTE Pecém II), cada uma com capacidade em operação de 360 MW, e juntas podem gerar anualmente 6.307 GWh. Segundo dados do Boletim Técnico nº 36 da CIENTEC de julho de 2016, em regime de operação plena o Complexo Termelétrico de Pecém produz 1300 t/dia de resíduos, sendo composto de 190 ton/dia de cinza de fundo, 900 ton/dia de cinzas volantes e 210 ton/dia de resíduos de dessulfuração (FGD – Flue Gas Dessulfurization) resíduos de dessulfuração, sendo a maior parte depositada nos aterros.

Esse preocupante cenário motivou a parceria entre a empresa e a UFC e deu origem a diversos estudos, entre eles o presente trabalho, realizado pela Linha de Pesquisa 3 – Aplicações Geotécnicas e Ambientais, coordenada pelos professores Dr. Jorge Barbosa Soares (coordenador geral), Dr. André Bezerra dos Santos, Dr. Anderson Borghetti Soares e Dr. Ronaldo Ferreira do Nascimento.

O presente trabalho caracterizou resíduos de cinzas de carvão geradas na termoelétrica Energia Pécem, e armazenadas no módulo I, além de amostras de cinzas leves da

unidade Pecém I, depositadas no módulo II, visando propor alternativas de emprego das cinzas em obras geotécnicas ambientais. Para a utilização de qualquer material em obras da engenharia moderna deve-se ter pleno conhecimento de suas características, bem como prever seu comportamento à execução da obra e seu desempenho durante a vida útil da obra ou produto. Para tanto estabeleceu-se um programa experimental que contou com ensaios laboratoriais, que buscaram identificar as características do material, buscar padrões de comportamento, avaliar sua aplicação em obras através de modelagens numéricas, além de avaliar seus riscos potenciais e impactos ao meio ambiente. Buscou-se também gerar dados e informações que pudessem subsidiar trabalhos futuros. Vale ressaltar que paralelamente ao presente estudo, desenvolvem-se outros trabalhos como o de SOUZA (2018) que avalia o emprego das cinzas como material de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos.

Caracterizações geotécnicas, físico-químicas, ambientais e mineralógicas foram realizadas e ajudaram a traçar um perfil do material estudado. Dessa forma foi possível identificar alguns padrões de comportamento, bem como avaliar a possibilidade de empregá-lo juntamente com solo, como revestimento de fundo de aterros de resíduos (*liners*). Além disso, realizou-se também, sugestões para trabalhos futuros, de formar a direcionar possíveis trabalhos a partir do que já foi desenvolvido. Ressalta-se que a proposição da utilização dos resíduos como o *liner* se faz de modo a avaliar apenas o potencial do material para esse fim, sendo necessário análises adicionais do material de modo que o mesmo possa ser empregado com a finalidade proposta, como por exemplo, capacidade de adsorção, coeficiente de difusão e compatibilidade de longo prazo com as substâncias químicas a serem contidas (BOSCOV, 2008).

Uma vez caracterizado os materiais (solo e cinza) propôs-se misturas com diferentes proporções de solo e cinza, que foram caracterizadas e testadas como material para barreiras impermeabilizantes. Observou-se que apenas uma entre as três misturas testadas atendeu os requisitos mínimos para seu emprego com a referida finalidade. Destaca-se ainda que as análises ambientais contaram com uma metodologia de análise alternativa, além dos tradicionais ensaios de lixiviação e solubilização. Na metodologia ambiental buscou-se aproximar-se do princípio do ensaio de coluna normatizado pela ASTM D4874, fazendo-se uso dos ensaios de permeabilidades para esse fim.

É importante ressaltar que este é um trabalho de engenharia, e, portanto, é necessário avaliar, além da viabilidade técnica e ambiental realizada neste trabalho, a viabilidade econômica, que espera-se, possa ser realizadas em trabalhos futuros. Não obstante, destaca-se ainda que o presente trabalho faz parte de atividades acadêmicas e de pesquisa,

contudo, espera-se também, que o estudo possa trazer contribuições à sociedade em geral, buscando-se reduzir os impactos causados pelos resíduos oriundos da queima de carvão mineral.

### **1.1 Problemas e perguntas de pesquisa**

O presente trabalho gira em torno da problemática advinda do grande volume de resíduos produzidos durante a geração de energia nas UTE's Pecém I e Pecém II, administradas pela empresa ENEVA. Sendo assim a questão principal que aqui será abordada refere-se a buscar uma alternativa de reaproveitamento desse resíduo sólido particulado, e para tanto é imprescindível que se possa responder perguntas como: *“quais as características “geotécnicas” desse resíduo?”*; *“quão permeável é o material?”*; *“esse material, se usado como material para obras geotécnicas, pode vir a contaminar o solo e corpos d’água?”*; *“esse é um resíduo perigoso ou não?”*; *“esse é um material inerte ou não?”*; *“será necessário o emprego de técnicas de encapsulamento?”*; *“com base em suas características o material pode ser empregado com revestimentos de fundo de aterros de resíduos sólidos?”*, entre outras. Desse modo, espera-se que em posse das respostas, possa-se sugerir a melhor aplicação para esse resíduo, respondendo as questões que giram em torno da temática central.

### **1.2 Objetivos**

#### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Este trabalho teve como objetivo principal, realizar caracterização completa do resíduo (cinza) oriundo da queima de carvão mineral na termelétrica Energia Pecém, abrangendo desde a caracterização geotécnica, mecânica, físico-química, morfológica, mineralógica, além de análises de impacto ambiental, de modo que com o conhecimento das características do resíduo, seja possível prever seu comportamento e propor alternativas tecnicamente viáveis de reaproveitamento do mesmo. Buscou-se ainda verificar a viabilidade de aplicação de tal resíduo em misturas de solo e cinzas de carvão mineral, como material de fundo impermeabilizante de obras geotécnicas e ambientais.

### ***1.2.2 Objetivos específicos***

De acordo com o objetivo principal, foram estabelecidos alguns objetivos específicos:

- a) Caracterizar os materiais (cinza e solo) e as misturas de solo-cinza, através de ensaios de laboratório normatizados;
- b) Realizar ensaios morfológicos e mineralógicos para identificar os componentes e a estrutura dos materiais;
- c) Analisar as influências dos materiais utilizados nas propriedades da mistura;
- d) Análise de modelo para ensaios ambientais de lixiviação;
- e) Verificar a viabilidade do emprego da cinza como material para barreiras impermeabilizante de fundo de aterro

### **1.3 Relevância do trabalho**

A presente pesquisa é fruto de parceria firmada entre a empresa ENEVA e UFC, através da qual ambas as partes buscam soluções técnicas, econômica e ambientalmente viáveis para dar um destino aos resíduos sólidos particulados oriundos da queima de carvão mineral, na geração de energia da UTE's Pecém I e Pecém II. O trabalho se desenvolveu sobre princípios técnicos e compromisso socioambiental, que devem nortear os trabalhos desta magnitude, sendo este estudo uma tentativa de contribuir, através de um estudo técnico, com soluções e alternativas para diminuir os efeitos nocivos ao meio-ambiente dos resíduos gerados.

O estudo perpassa por temáticas variadas abordando aspectos geotécnicos e ambientais, que possam responder os questionamentos e perguntas que se apresentam durante o desenvolvimento da pesquisa. A ENEVA tem hoje como solução para a maior parte dos resíduos produzidos por suas duas unidades geradores de energia, a disposição do material em aterros construídos dentre do pátio do complexo termoeletrico. É notório, mesmo sem a realização de uma análise técnica, que essa não é a melhor solução para a problemática apresentada, sendo imprescindível que sejam buscadas alternativas mais eficazes que minimizem os impactos ambientais e que estejam alinhadas com os preceitos e ideias da sociedade moderna.

É sob este prisma que se norteia o presente trabalho. De maneira que é um compromisso de todos, comunidade acadêmica, empresas, governo e sociedade, a preservação do meio-ambiente, com o uso consciente de seus recursos, além da compreensão de que as



intervenções humanas, neste meio, devem ser realizadas com respeito aos ideais socioambientais. Sendo assim pode-se afirmar que o presente trabalho tem a pretensão de, além dos objetivos técnicos e acadêmicos propostos, dar um pequeno retorno à sociedade brasileira.

#### **1.4 Estrutura do trabalho**

O Trabalho está dividido em cinco seções principais: *Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Análise e Discussão de Resultados e Considerações Finais*.

Na seção INTRODUÇÃO, apresentou-se o contexto no qual se desenvolve o presente trabalho, bem como os problemas e perguntas de pesquisa, o objetivo geral e objetivos específicos, a relevância do trabalho e como esse ficou estruturado.

A seção REVISÃO BIBLIOGRÁFICA apresentou os aspectos teóricos que nortearam o presente trabalho. Dado o extenso arcabouço bibliográfico que contemplou o estudo, buscou-se discorrer sobre os temas e aspectos pertinentes à compreensão e interpretação das informações aqui apresentadas. Ressalta-se que, como um dos principais objetivos do trabalho refere-se à caracterização geotécnica e ambiental do resíduo cinzas, objeto de estudo da pesquisa, optou-se por apresentar alguns elementos que dessem subsídios à interpretação das análises laboratoriais, o que resultou em seções que discorressem a respeito das propriedades do solo, comportamento mecânico e hidráulico. Nesta seção apresentou-se também informações pertinentes ao carvão mineral e às cinzas, como as características dos materiais, mecanismos de formação, impactos ao meio ambiente, entre outros. Abordou-se ainda os conceitos relacionados a barreiras impermeabilizantes de fundo (*liners*), proposta de aplicação geotécnica ambiental para o resíduo em estudo.

No capítulo 2, apresentou-se ainda um item julgado importante para o desenvolvimento do trabalho, que se refere aos princípios dos ensaios não convencionais realizados. Vale destacar que ao utilizar a expressão não convencionais, buscou-se referir-se aos ensaios que fogem à gama de ensaios geotécnicos tradicionais, mas que, no entanto, já foram empregados em diversos trabalhos, nos quais este estudo se baseou ao optar pelas suas realizações. Portanto, este item tem o objetivo de apresentar os fundamentos teóricos dos ensaios, ou seja, os princípios físico-químicos que regem as análises, de forma a justificar suas realizações.

A seção METODOLOGIA buscou trazer os elementos pertinentes ao programa experimental, destacando a organização e estrutura sob a qual se desenvolveu a pesquisa, os materiais utilizados e as metodologias de ensaios empregadas.

A seção ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS apresentou os resultados e interpretações das análises realizadas, além de compará-las a resultados obtidos em outros trabalhos relevantes. Ao final da seção apresentou-se ainda um perfil da cinza composta.

Na seção CONSIDERAÇÕES FINAIS, foram apresentadas as principais conclusões do trabalho, além de destacar também os principais problemas enfrentados e propor ainda, sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

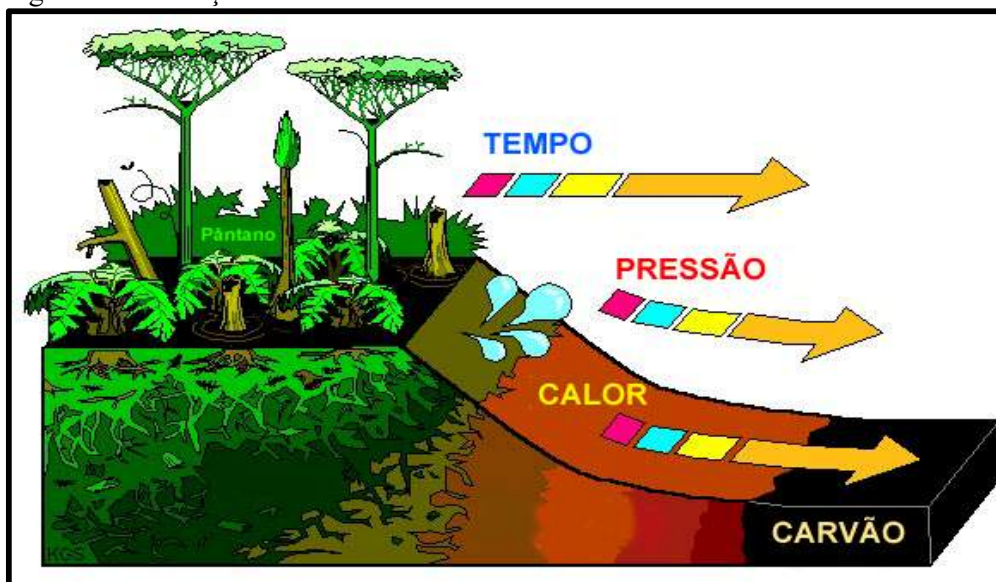
Esta seção trará os conceitos e teorias que nortearam o presente trabalho e serviram como referência para a pesquisa desenvolvida.

### 2.1 Cinzas de carvão mineral

O carvão mineral é um minério resultante da transformação da matéria vegetal de grandes florestas soterradas há milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. Segundo Schumann (1985) o carvão mineral é de origem orgânica e, portanto, não são rochas autênticas, segundo a definição geológica. Contudo, por se tratar de um componente sólido da crosta terrestre e estar tão alterado que não é possível reconhecer sua origem orgânica, são tratados como rochas sedimentares.

Os restos de plantas e árvores que se acumularam sob lâminas d'águas (pântanos), com o passar do tempo vão sendo cobertos por camadas de argila e areia. O acúmulo gradual dessas camadas vai gerando um aumento de pressão sobre a matéria orgânica ali depositada, que sob a ação de temperaturas elevadas expulsa o oxigênio e o hidrogênio, aumentando assim a concentração de carbono. Esse processo (carbonificação) ocorre ao longo de milhões de anos dando origem ao carvão mineral. (FIGURA 1).

Figura 1 - Formação do carvão mineral.

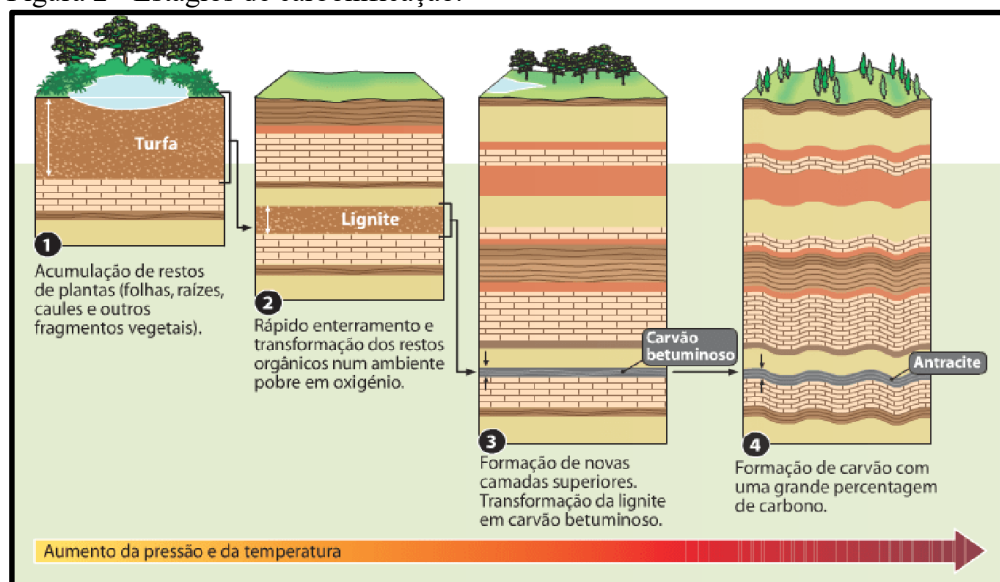


Fonte: National Geologic (2010).

O carvão pode possuir diferentes teores de carbono, o que determina a sua maturidade geológica, ou seja, o grau de carbonificação atingido. Quanto mais avançado é o estágio de carbonificação maior o teor de carbono e, conseqüentemente, maior é o seu poder calorífico e melhor a sua qualidade.

Sendo assim, quanto mais tempo durar o processo (maior for o tempo geológico) e mais intensas forem as ações da pressão e da temperatura a que a camada de material vegetal for submetida, mais alto será o grau de carbonificação. Existem quatro estágios na formação do carvão mineral: turfa, linhito, carvão (hulha) e antracito (FIGURA 2).

Figura 2 - Estágios de carbonificação.



Fonte: O mais curioso (2018).

Os diferentes estágios de carbonificação, também denominados rank, geram diferentes características ao material carbonífero, como umidade, poder calorífico, teores de oxigênio, hidrogênio e carbono, entre outras, determinando diferentes “tipos de carvão”. O primeiro estágio de formação é a turfa, que possui um baixo conteúdo carbonífero, com teor de carbono na ordem de 50% a 65%; o segundo estágio é o linhito, que apresenta um teor que varia de 65% a 75%; o terceiro rank é o carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível, contendo aproximadamente de 75% a 90% de carbono, e o mais puro dos carvões, o antracito, apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%.

O carvão mineral é também um combustível fóssil amplamente empregado ao redor do mundo e foi a energia propulsora da primeira revolução industrial. O alto poder calorífico que o carvão pode alcançar (dependendo da qualidade do carvão) o tornou uma das

principais fontes de energia do mundo, sendo ultrapassado pelo petróleo como principal fonte de energia apenas no século XX.

Entre os recursos energéticos não renováveis, o carvão possui as maiores reservas do mundo, além de ser o combustível fóssil com a maior perspectiva de duração. Do volume total desse mineral, 75% das reservas existentes estão concentradas em 5 países: Estados Unidos, Rússia, China, Austrália e Índia. O Brasil possui apenas 0,1% das reservas mundiais de carvão, dessas a maior parte concentra-se na região sul do país, sobretudo nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Segundo dados de 2016 do Ministério de Minas e Energia, o carvão mineral ocupa o segundo lugar na matriz energética no mundo, enquanto no Brasil ocupa a 5ª posição, considerando-se as fontes renováveis e não renováveis. Na matriz elétrica o carvão ganha ainda mais destaque sendo a principal fonte de energia elétrica no mundo, e ocupando novamente a 5ª colocação na matriz elétrica brasileira, considerando-se as fontes renováveis e não renováveis, e o 2º lugar entre as fontes não renováveis, sendo o primeiro lugar ocupado pelo Gás Natural.

Figura 3 - Reservas de carvão mineral.



Fonte: Mirian Zomer (2013).

O baixo regime de chuvas e a grave crise hídrica enfrentada pelo Brasil nos últimos anos, fez o país reverter a tendência de queda, que vinha apresentando até 2012, da participação do carvão na matriz de oferta interna de energia elétrica. Isso associado à maior capacidade instalada e incentivos do governo à geração de energia através de termelétricas, impulsionou o uso do carvão mineral como fonte interna para geração de energia elétrica.

No Brasil, o carvão mineral é empregado em processos de produção variados, abrangendo desde a produção industrial de alimentos até a produção de cerâmicas e vidros. É um recurso bastante utilizado, também, na indústria cimenteira e na produção de aço nos altos-fornos da indústria siderúrgica. Contudo, é na geração de energia elétrica em usinas termoelétricas que é mais empregada. Estima-se que essa atividade seja responsável pelo consumo de aproximadamente 85% da produção nacional de carvão.

É nesse cenário que um outro aspecto ganha notoriedade. Associados ao seu grande potencial energético e sua influência direta na economia, os impactos ambientais gerados pela sua produção e uso geram grande preocupação. Desde sua extração até o seu emprego direto ou indireto em processos produtivos, o carvão mineral causa impactos ambientais relevantes. A sua extração através da mineração pode causar poluição de corpos d'água, solo, ar e até mesmo causar mudanças significativas no relevo. Em todas as atividades que fazem uso do carvão, há a geração de subprodutos indesejáveis. A queima de carvão mineral além, de produzir gases que contribuem para o efeito estufa, gera também um enorme volume de resíduos sólidos, conhecidos como cinzas de carvão mineral. A cada ano, esses resíduos têm causados grandes problemas ao meio ambiente, fazendo com que organizações governamentais e não governamentais se mobilizem para atenuar os impactos por ele causado.

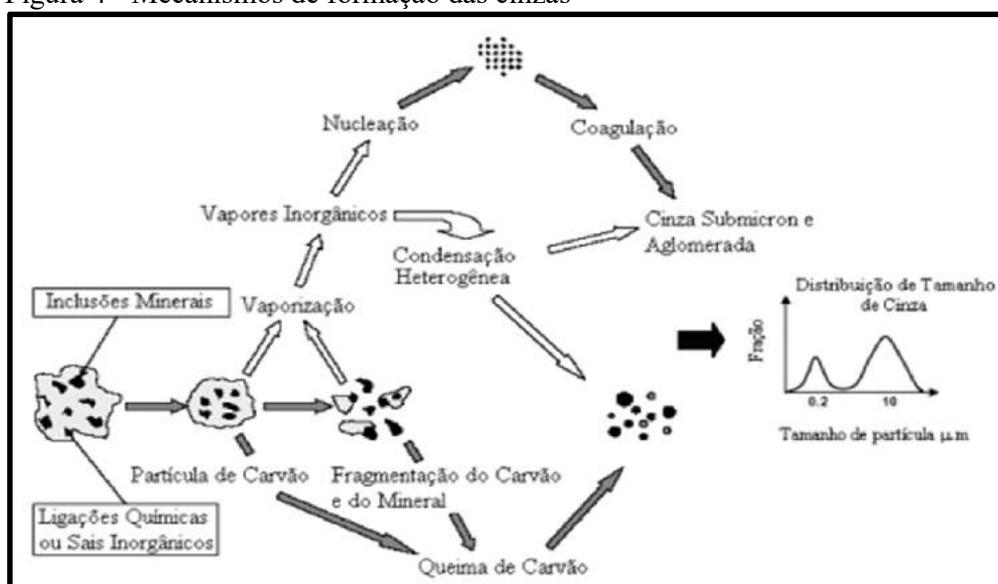
### ***2.1.1 Mecanismo de formação das cinzas e classificação das cinzas***

As cinzas são oriundas da combustão direta de matéria-prima sólida. O carvão mineral (combustível sólido) é constituído por duas frações intimamente misturadas, uma orgânica (material volátil e carbono fixo) e uma fração inorgânica (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). O calor gerado pela combustão do carvão faz com que a fração orgânica gere voláteis e coque, enquanto a fração inorgânica (matéria mineral) se transforma em cinza.

A formação de cinza está associada aos complexos mecanismos desencadeados pela combustão direta do carvão. No início do processo de combustão, a fração de matéria mineral não perde quantidades consideráveis de massa por vaporização. Entretanto, a contínua exposição à chama irá ocasionar desprendimento de voláteis – oriundos da queima da fração orgânica - e o consumo do carbono, de modo que as inclusões minerais começam a ficar expostas. Uma vez expostas e submetidas às altas temperaturas (1300 – 1600°C), a fração mineral sofrerá transformações em sua composição mineralógica, em virtude de processos como a perda de água das argilas, decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos, etc., dando origem a partículas esféricas de diferentes tamanhos, denominadas cinzas (PIRES, 2002)

Segundo Knudsen (2001 *apud* MENDES; BAZZO; TRACTEBEL, 2007) o tamanho das cinzas é função de duas classes de mecanismos formadores (FIGURA 4). A primeira é responsável pela formação de partículas maiores, com diâmetros superiores a 1  $\mu\text{m}$ , geradas pela fragmentação do carvão e a subsequente coalescência desses fragmentos auxiliada pelos vapores. A segunda etapa se inicia com as partículas de vapor (dos sais alcalinos contidos no carvão) associando-se para formar uma nova partícula através de um processo de nucleação. Em sequência, essas partículas formadas agrupam-se, passando de um estado já líquido para sólido por um mecanismo semelhante à coagulação. Parte desse vapor condensa-se e junta-se às partículas coaguladas para formar as cinzas submicrométricas.

Figura 4 - Mecanismos de formação das cinzas



Fonte: Knudsen (2001).

Segundo Gupta *et al.* (1998 *apud* MENDES; BAZZO; TRACTEBEL, 2007) os diferentes tamanhos e composições dos resíduos da combustão do carvão mineral estão associados a fatores como o tipo de material inorgânico e as condições de queima. Para os autores, esses fatores podem alterar a produção de resíduos, criando vapores, fumos e partículas com diferentes tamanhos e composições. Para Rohde *et al.* (2006 *apud* LOPES, 2011), essas cinzas, de acordo com o processo de gaseificação ou queima do carvão podem ser classificadas como:

- a) *Escória ou Cinza Grossa (slag ou boiler slag)*: esse é um dos resíduos provenientes do processo de combustão ou gaseificação do carvão. Apresentam granulometria grosseira com elevados teores de carbono não

queimado (10-20%). São retirados pelo fundo das fornalhas após o resfriamento com água;

- b) *Cinza de Fundo ou Cinza Pesada ou Cinza Úmida (bottom ash)*: Resíduo oriundo da combustão do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado. Contém geralmente teores de carbono não queimado de 5 a 10%. As cinzas de fundo depositam-se no fundo das fornalhas e gaseificadores, de onde são normalmente retiradas através de um fluxo de água, principalmente nas grandes caldeiras de usinas térmicas e centrais de vapor; e
- c) *Cinza Volante ou Cinza Leve (fly ash)*: resíduo da queima de carvão mineral constituído de partículas extremamente finas e leves. Essas partículas são arrastadas pelos gases de combustão de fornalhas ou gases gerados em gaseificadores industriais. Para capturar essas cinzas utiliza-se dispositivos de retenção e captura como, por exemplo, filtros de tecido, ciclones, precipitadores eletrostáticos, etc. As grandes unidades produtoras desse tipo de cinzas são as usinas termelétricas e centrais de vapor;

Quanto à composição química e mineralógica das cinzas, Lopes (2011) afirma que as características dessas podem sofrer variações conforme a composição do carvão, o grau de beneficiamento e da moagem do carvão, o projeto e operação da caldeira, entre outros.

Segundo Goethe (1990 *apud* LOPES, 2011) a composição e propriedades físico-químicas das cinzas podem variar não só de usina para usina, mas de caldeira para caldeira na mesma usina e até numa mesma caldeira em tempos diferentes.

As diferenças entre as cinzas geradas podem ser percebidas, também, nos teores de cálcio, sílica, alumina e ferro existentes nas suas composições, que por sua vez, influenciam diretamente nas propriedades físicas e químicas das cinzas e, conseqüentemente, nas suas propriedades como material para utilizações tecnológicas. A composição química das cinzas é essencialmente dependente das características dos carvões queimados e das impurezas que contenham.

## 2.2 Propriedades do Solo

O principal objeto deste estudo, as cinzas de carvão mineral, são um material particulado com muitas similaridades com os solos. Com base nas semelhanças entre os dois materiais e a proposta de reutilização do material em obras de geotecnia ambiental, conduziu-



se a presente pesquisa tratando o referido resíduo como um material geotécnico. Toda abordagem realizada sobre o material, desde os ensaios experimentais, tratamentos e preparação de amostras e, sobretudo, análises e conclusões técnicas, foram calcados nos preceitos da engenharia geotécnica e das ciências do solo. Sob este prisma, para fundamentar as análises aqui realizadas e embasar tecnicamente as conclusões obtidas, optou-se por apresentar nesta seção, as características e propriedades do solo que serviram como subsídio teórico para o presente estudo. Vale destacar que foram analisados também solos e materiais compósitos (cinza e solo) o que reforça ainda mais importância das seções apresentadas a seguir.

### ***2.2.1 Textura e Estrutura dos Solos***

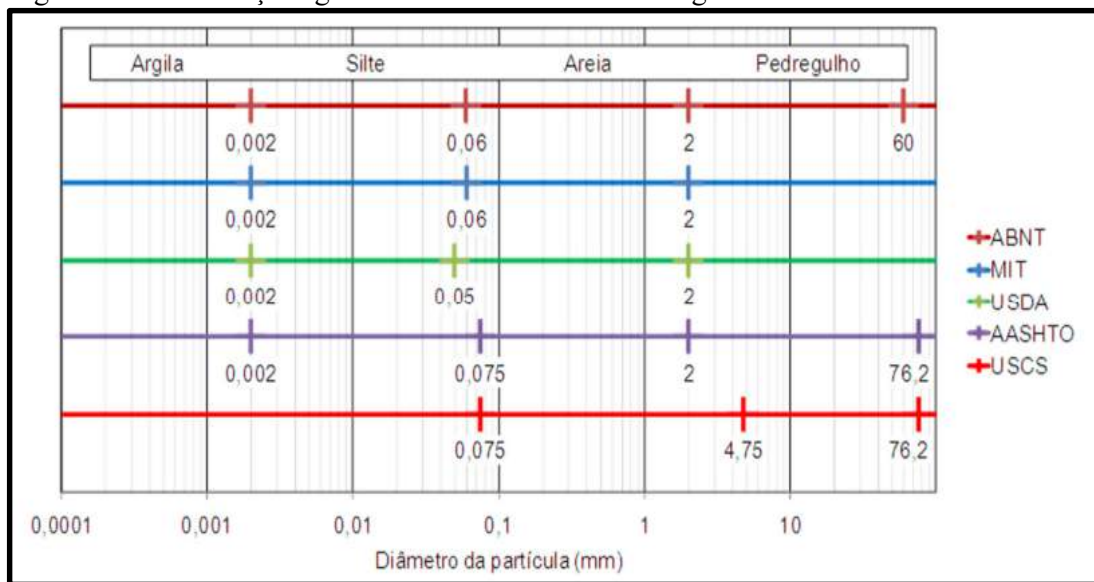
Os solos originam-se da ação do intemperismo e variações hidrotermais, se depositando como sedimentos eólicos, marinhos, lacustres e fluviais, a partir da degradação das rochas. Tal degradação é decorrente de ataques químicos (pela ação da água ou ácido carbônico) ou físicos (devido a erosão ou vulcanismo), que produzem partículas de tamanhos e formas variados, de acordo com a intensidade dos agentes intempéricos e pedogenéticos. As argilas, por exemplo, são produtos da degradação de rochas que contém feldspato. A ação desses agentes, além de modelar essas partículas menores quanto ao tamanho e forma, acabará também realizando uma seleção de minerais, que terá relação direta com tamanho e forma das partículas e será responsável pelas propriedades comuns associadas a elas. Segundo Crispim (2010), quando houver predomínio de partículas minerais de maior diâmetro, o solo é classificado como arenoso ou siltoso; quando houver predomínio de minerais coloidais, o solo é classificado como argiloso.

De forma a compreender melhor o comportamento do solo, além de facilitar seu uso seja em projetos agrícolas ou de engenharia, são realizadas diversas classificações, que buscam facilitar a identificação do solo, o agrupando de acordo com suas propriedades físicas comuns como cor, tamanho, forma, entre outras.

A textura dos solos refere-se ao tamanho das partículas (distribuição granulométrica), dividindo em categorias (grupos), ou seja, classificando-os de acordo com o tamanho das partículas. Deve-se ressaltar que a textura dos solos é uma propriedade inerente as partículas minerais, sendo considerado por isso uma propriedade básica do solo.

Existem diferentes classificações texturais, estabelecidas por órgãos e entidades diversas, que variam de acordo com suas aplicações e características, de forma que os limites entre as classes podem variar de acordo com a classificação usada (FIGURA 5).

Figura 5 - Classificações granulométrica de diferentes órgãos.



Fonte: Das (2006).

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas; MIT- Massachusetts Institute of Technology; USDA - Department of Agriculture; AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials; USCS - Unified Soil Classification System (USACE - U.S. Army Corps of Engineers, U.S. Bureau of Reclamation e ASTM - American Society for Testing and Materials)

Deve-se ressaltar que as partículas de solo possuem uma ampla faixa de variação de tamanhos, abrangendo desde partículas como diâmetro de 1,00 m (matacões), até partículas com dimensões inferiores a 0,002 mm (argilas). Entretanto, apesar das partículas de frações mais grosseiras (diâmetros maiores que 2,00 mm) influenciarem o comportamento dos solos, partículas de areia, silte e argila, mesmo que em menores porcentagens, podem exercer maior influência, sendo, portanto, a expressão textura do solo mais aplicada fração fina desse. A proporção de cada um desses materiais na amostra de solo determinará o tipo de solo, com características geotécnicas distintas. Todavia, vale ressaltar, que basta uma porcentagem relativamente pequena de argila, para que as propriedades referentes a esta fração sejam responsáveis pelas principais propriedades e comportamentos do solo. Ou seja, ainda que desconsiderando a influência do tipo de argilomineral, a maior porcentagem da fração argila confere ao solo plasticidade, capacidade de expansão e contração, coesão, além de diminuir a condutividade hidráulica e o ângulo de atrito interno (em relação ao um material puramente granular).

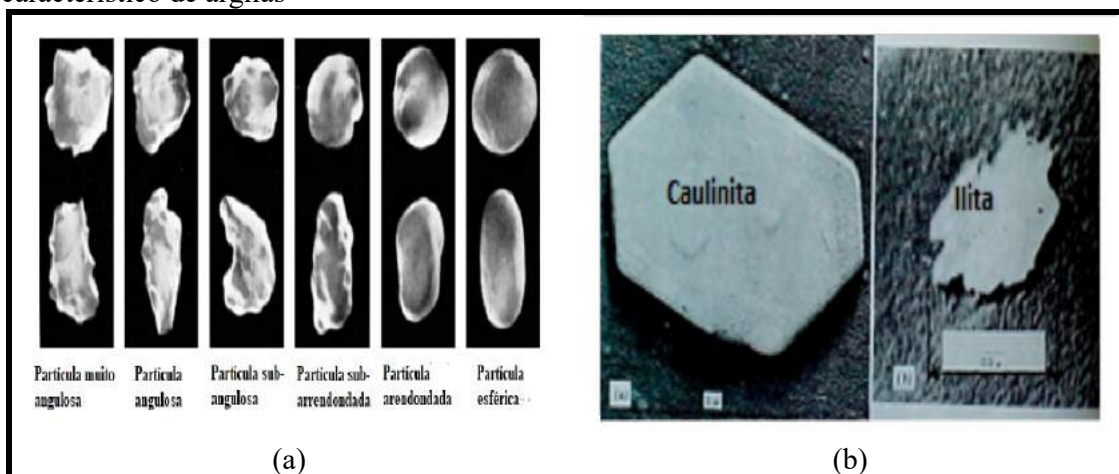
A configuração espacial das partículas de solo compreende dois elementos básicos: o arranjo das partículas (fábrica de solos) e a estrutura. No solo as partículas menores encontram-se agrupadas formando unidades maiores, associadas de forma a conferir ao solo uma configuração que o torne capaz de desempenhar suas funções.

O solo é um sistema trifásico constituídos por partículas sólidas e poros que podem estar total ou parcialmente preenchidos por água ou ar. A fábrica de solos, refere-se aos arranjos das partículas sólidas do solo e os poros, que segundo Mitchell e Soga (2005), depende do tipo de arranjo de partículas elementares, da aglomeração de partículas e dos tamanhos e distribuição dos poros. O arranjo de partículas refere-se ao agrupamento dessas e depende de aspectos como forma e tamanho dos grãos e de como as partículas de areia, silte e argila interagem entre si. O aglomerado de partículas diz respeito a uma unidade de contorno bem definido, com funções mecânicas específicas, composto por unidades menores de um ou mais arranjo de partículas. Já os poros são os vazios preenchidos com fluídos e ou gases.

Mitchell e Soga (2005) afirmaram que a estrutura dos solos é uma expressão utilizada para designar os efeitos combinados da configuração das partículas (fábrica) do solo, da composição e das forças interpartículas. Ou seja, o arranjo das partículas sólidas e poros associadas com os a elementos que lhe confere estabilidade.

O tamanho e a forma das partículas são fatores que afetam diretamente o arranjo dessas. A forma das partículas tem influência, inclusive, sobre algumas propriedades mecânicas como a compressibilidade. De acordo com a forma, pode-se ter partículas esféricas (arredondas, sub-arredondas, angulares e sub-angulares), características de pedregulhos, areias e siltes, e partículas lamelares ou fibrilares (placas horizontais relativamente finas), associadas as argilas (FIGURA 6).

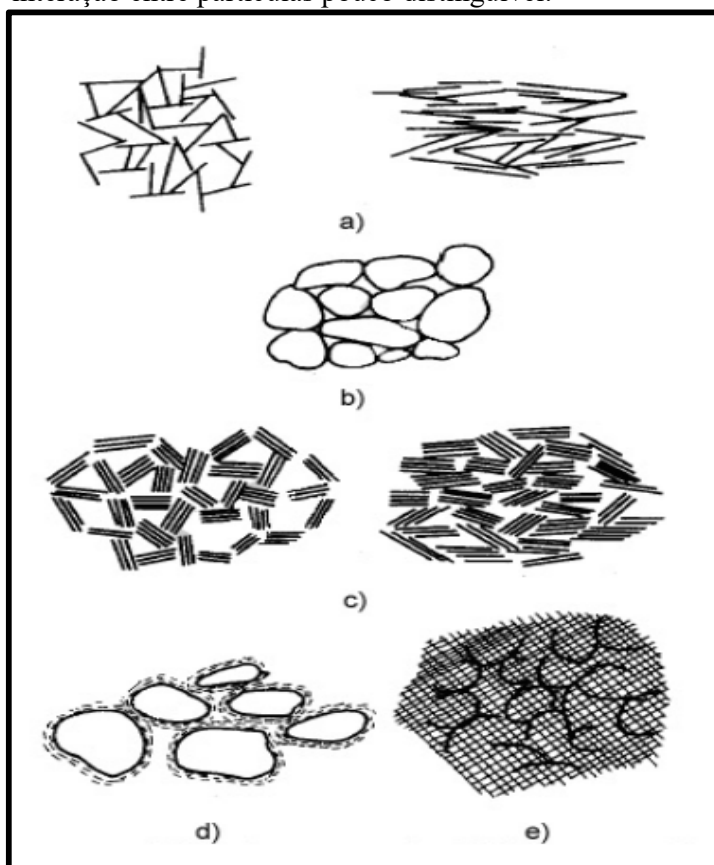
Figura 6 - Forma das partículas de Solo: (a) característico de materiais granulares; (b) característico de argilas



Fonte: (a) Powers (1953 *apud* MITCHELL & SOGA, 2005); (b) Henrique Silva (2016).

Essas as partículas podem se associar de diversas formas, e constituir diferentes configurações estruturais (FIGURA 7), que irão conferir ao solo propriedades distintas e condicionar seu comportamento.

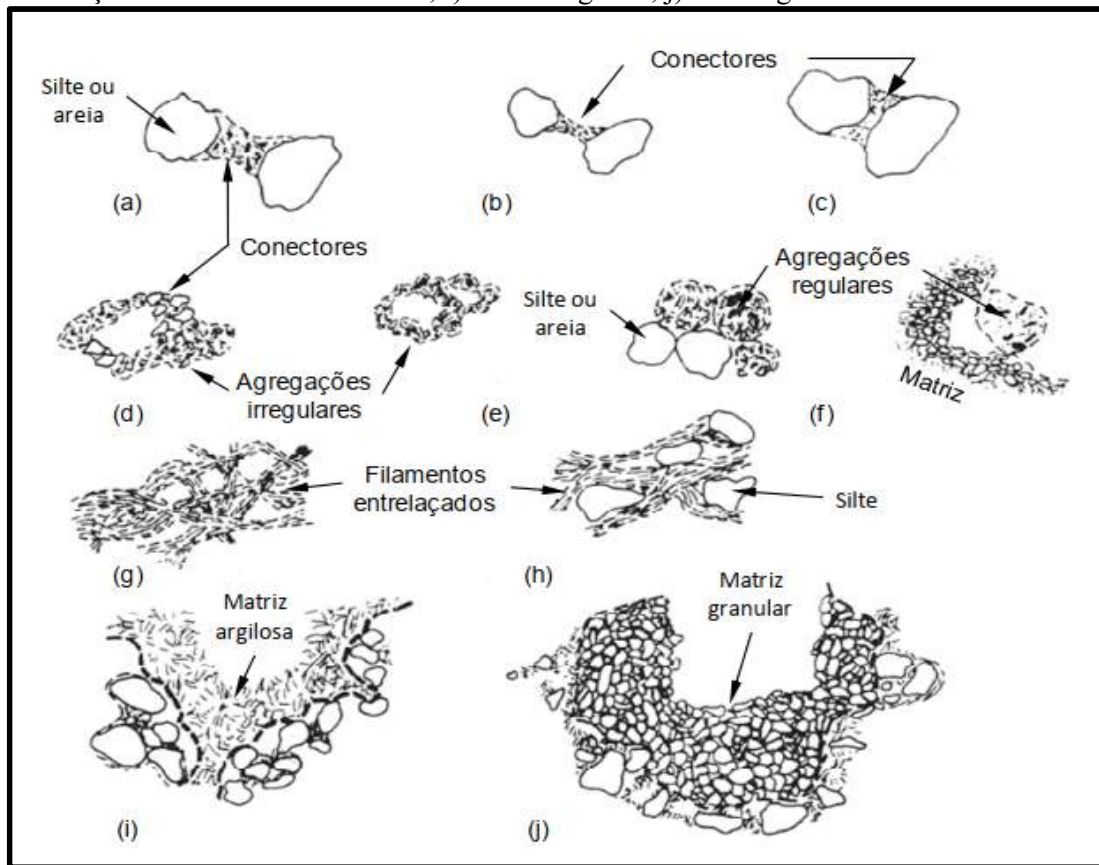
Figura 7 - Arranjo de partículas: (a) interação entre placas de argila; (b) interação entre partículas de silte ou areia; (c) interação entre grupos de placas de argila; (d) interação entre partículas de silte ou areia envoltos em argila; e (e) interação entre partículas pouco distinguível.



Fonte: Collins & Mcgown (1974 *apud* MITCHELL & SOGA, 2005).

Os grãos minerais individuais (elementares) de diversos tamanhos (argilas, siltes e areias) que compõe o solo são denominadas partículas primárias. Quando essas partículas encontram-se ligadas pela ação de forças de superfície, formando agregados ou aglomerados, esses são denominados partículas secundárias. Dependendo do tamanho e forma das partículas, da maneira como interagem umas com as outras, da composição do solo e da presença ou não de água, esses aglomerados podem apresentar-se como estruturas distintas (FIGURA 8), que exercerão influência direta no comportamento do solo.

Figura 8 - Representação de aglomerados de partículas: (a), (b) e (c) conectores; d) agregações irregulares conectadas por aglomerados; e) agregações irregulares em formato de colmeia (honeycomb), f) agregações irregulares interagindo com matriz de partículas; g) filamentos de partículas de argila entrelaçados; h) filamentos de partículas de argila entrelaçados com intrusões de silte; i) matriz argilosa; j) matriz granular.



Fonte: Collins & McGown (1974 *apud* MITCHELL & SOGA, 2005).

### 2.2.2 Mineralogia

O solo é considerado um sistema trifásico, constituído por uma fase sólida, uma líquida e uma gasosa. Essas três fases interagem entre si, de modo que o comportamento do sistema como um todo é reflexo dessas interações. A disposição das partículas, a composição da solução, a distribuição de cargas elétricas, entre outras características são fruto da interação entre esses componentes, e influenciam de forma significativa o comportamento mecânico e hidráulico do solo.

A parte sólida é composta por uma fração mineral e uma fração orgânica. A fração mineral origina-se pela ação de agentes físicos, químicos e biológicos sobre as rochas e o próprio solo, de forma que a composição mineralógica do solo depende do material de origem e do grau de meteorização do solo. Sendo assim, a matéria mineral do solo é constituída por

minerais primários e por minerais resultantes das alterações desses, denominados minerais secundários. Os minerais primários encontrados no solo são oriundos da rocha mãe, com composição mineralógica similar à da rocha matriz. Nesse tipo de mineral a ação intempérica é menos intensa, dando origem, portanto, há uma fração mais grosseira, menos plástica, com coloração mais clara (areias e siltes). Na sua composição pode-se encontrar, portanto, quartzos, feldspatos, feldspatóides, micas, piroxenas, anfíbulas, entre outros. Todavia, os quartzos e feldspatos são os mais abundantes entre os minerais primários, consequência da composição das rochas que lhe deram origem (COSTA, 2011). Os minerais secundários são produto da ação mais intensa dos agentes intempéricos, que atuam fragmentando ainda mais as rochas já intemperizadas e os minerais primários menos resistentes. As ações de agentes hidrotermais, aliados a um intemperismo químico mais intenso, levam a alteração da estrutura dos minerais dando origem a um material mais fino, com maior plasticidade e coloração mais escura do que o material composto por minerais primários. Normalmente, esse tipo de material encontra-se depositado em regiões mais distantes da rocha mãe, carregadas seja pela ação da água ou do vento, que além de transportar são também agentes do intemperismo. Segundo Costa (2011) os minerais de ocorrência mais frequente entre os minerais secundários são os minerais de argila (argilominerais ou filosilicatos – silicatos de alumínio no estado cristalino), silicatos não cristalinos, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio e carbonatos de cálcio e magnésio.

A cargas elétricas presentes nos minerais são produtos principalmente da substituição isomórfica. Durante o processo de formação do mineral ocorrem substituições nas estruturas de um ou mais íons por outros. Essa substituição ocorre sem mudanças na estrutura do mineral. É muito comum, por exemplo, a ocorrência da substituição isomórfica na formação de silicatos, com a substituição do  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$  nas estruturas tetraédricas, ou do  $\text{Al}^{3+}$  por  $\text{Mg}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{2+}$ , nas camadas octaédricas. Ocorre, portanto, a substituição de íons de eletrovalências diferentes, o que irá implicar em um desequilíbrio de cargas elétricas, que nesse caso resultará em um saldo de cargas negativas.

### *2.2.2.1 Argilominerais*

Os argilominerais são basicamente compostos de alumínio, sílica e água, formando um silicato de alumínio hidratado. Possuem, normalmente, forma lamelar e alongada, e apresentam como propriedades marcantes a plasticidade, a permuta catiônica e dimensões geralmente inferiores a 2 microns.

Fazem parte dos argilominerais uma grande família de minerais, que podem ser distribuídos em diversos grupos, conforme características que possuam, como estrutura cristalina e propriedades semelhantes. Dentre esses diversos grupos destaca-se, os das *caulinitas*, das *ilitas* e das *montmorillonitas*.

A estrutura dos argilominerais é constituída, fundamentalmente, de duas unidades estruturais. Uma unidade estrutural constituída de tetraedros, e uma segunda unidade constituída de duas folhas de um aglomerado de oxigênio ou hidroxilas junto com alumínio, ferro ou magnésio formando uma estrutura composta por octaedros (FIGURA 9 a). A unidade estrutural composta por tetraedros, é formada por tetraedros de sílica, nos quais o átomo de *Si* está equidistante de quatro oxigênios, ou hidroxilas, se necessário com o átomo de silício no centro para balancear a estrutura (FIGURA 9 b).

De acordo com a quantidade de camadas dessas unidades estruturais, seus arranjos e suas ligações químicas é que variam os grupos de argilominerais. A *caulinita*, por exemplo, é composta por uma estrutura básica formada de uma unidade estrutural de tetraedros de sílica e de uma unidade estrutural de octaedros de *gipsita* (FIGURA 9 c), onde as hidroxilas dessa são parcialmente substituídas pelos oxigênios da unidade estrutural de tetraedros de sílica. Desse modo determina-se um plano comum às duas unidades estruturais, constituído de átomos de oxigênio e hidroxila, estabelecendo-se entre elas ligações iônicas.

As ligações entre os arranjos octaédricos e tetraédricos das *caulinitas* são suficientemente fortes para evitarem a penetração da água entre as estruturas básicas. Por esse motivo, as *caulinitas*, apresentam pequena expansão, difícil dispersão na água e baixa plasticidade. Além disso, devido as valências livres estarem apenas nas extremidades, as capacidades de adsorção de água e de troca catiônica são pequenas.

Já as *montmorillonitas* possuem uma estrutura básica formada por uma unidade estrutural de octaedros, compreendida entre duas unidades estruturais de tetraedros de sílica (FIGURA 9 d). Esse grupo de argilomineral, caracteriza-se ainda, por apresentar, o alumínio dos octaedros substituído parcialmente ou totalmente por magnésio e/ou ferro, principalmente. Essa substituição acaba dando origem a um excesso de valências negativas na camada interna, que não podem ser neutralizadas por cátions, devido a unidade estrutural de octaedros estar compreendida entre as unidades limítrofes de tetraedros. Compondo a estrutura global da *montmorillonita*, moléculas de água estão presentes entre as estruturas básicas da mesma.

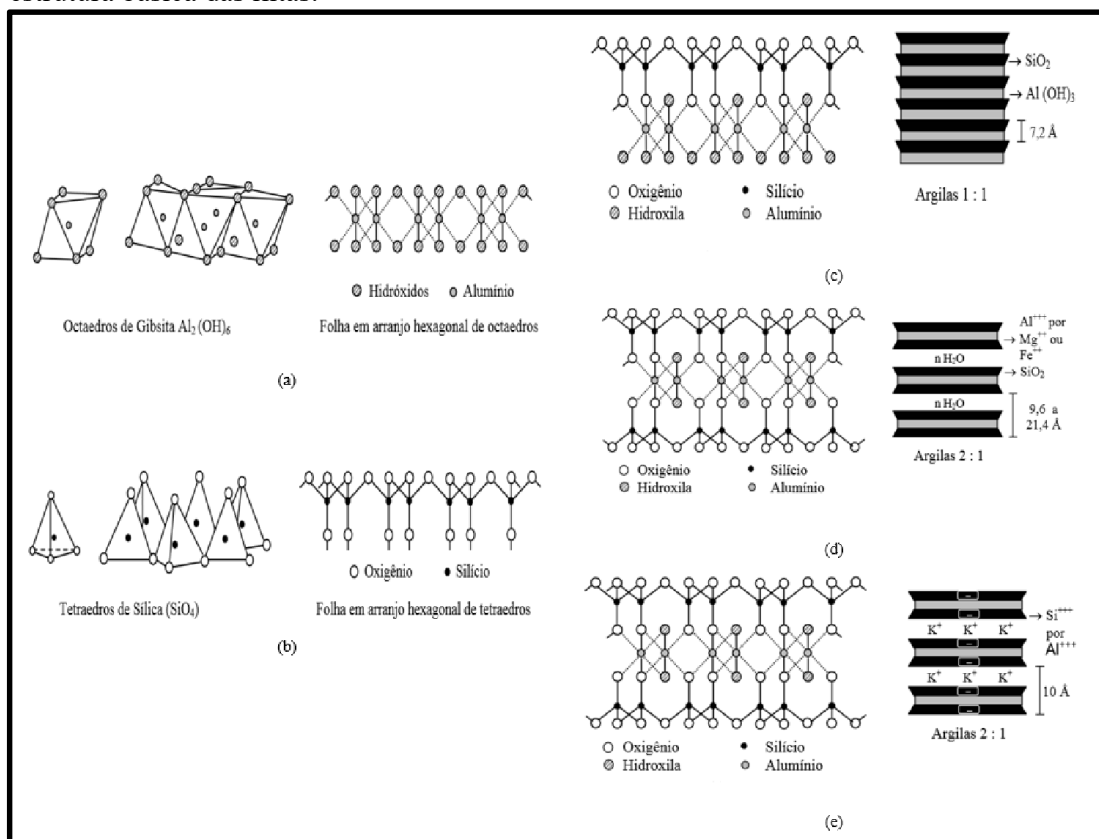
Como há uma grande facilidade de a água penetrar entre as estruturas básicas das *montmorillonitas*, essas apresentam grande expansão e alta plasticidade. Além disso, por apresentarem ligações quebradas nas extremidades e possuírem cargas negativas nas superfícies

das unidades estruturais octaédricas, acabam por apresentar grande capacidade de adsorção de água e de permuta catiônica.

A estrutura básica das *ilitas* (FIGURA 9e) é a mesma das *montmorillonitas*, diferenciando-se, apenas, pela substituição parcial dos átomos de silício, das unidades estruturais de tetraedros de sílica, por alumínio. Dessa forma as valências livres estão presentes, portanto, nas camadas limítrofes das unidades estruturais de tetraedros de sílica, que são neutralizadas por cátions de K, dispostos entre as estruturas básicas superpostas.

Essa configuração da *ilita*, faz com que a capacidade de adsorção de água e de troca catiônica deva-se, somente, às ligações quebradas das extremidades das camadas e, portanto, sejam pequenas. Caso a substituição do silício, das unidades estruturais de tetraedros, por alumínio, seja pequena o suficiente, de modo que as ligações entre as estruturas básicas, proporcionadas pelos cátions  $K^+$ , sejam deficientes e permitam a entrada de água, torna-se possível que as propriedades das *ilitas*, se aproximem das propriedades da *montmorillonita*.

Figura 9 - Argilominerais: (a) unidade estrutural octaédrica; (b) unidade estrutural tetraédrica; (c) estrutura básica das caulinitas; (d) estrutura básica das montmorillonitas; (e) estrutura básica das ilitas.



Fonte: Célio Davilla (2008).



### 2.2.3 Carga Elétrica no Solo

A presença de cargas elétricas no solo está associada sobretudo ao seu próprio processo de formação. Diversos processos, como a substituição isomórfica, a dissociação do grupo OH, a protonação das hidroxilas, entre outros, são responsáveis por gerar um desequilíbrio elétrico, resultando num balanço de cargas elétricas positivas ou negativas. A presença de cargas elétricas é uma característica mais comum nos solos argilosos, especialmente coloidais, e é responsável por diversas características físico-químicas do solo, que exercem influência direta no comportamento mecânico e hidráulico do material.

No processo de formação dos solos, a ação intensa do intemperismo e as variações hidrotermais, fazem com que alguns minerais e a matéria orgânica sejam reduzidos a partículas extremamente pequenas. Associadas a essas ações intempéricas, fenômenos físico-químicos reduzem ainda mais essas partículas que podem atingir dimensões menores que 0,001 mm, essas partículas são chamadas de coloides. Além das argilas coloidais, há também no solo os coloides orgânicos (húmus), oriundos da decomposição de matéria orgânica (LOPES e GUILHERME, 2004). Essas partículas coloidais (argila e húmus) são as principais responsáveis pela atividade físico-química do solo.

Os coloides geralmente apresentam um balanço de cargas elétricas negativas (-), originadas do processo de formação (em alguns casos os coloides podem também desenvolver cargas positivas). Esse excesso de carga negativa pode atrair e reter íons com cargas positivas, semelhante ao comportamento de um ímã. Esse tipo de comportamento dos coloides pode explicar, por exemplo, porque o nitrogênio na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) lixivia mais facilmente no solo, do que nitrogênio na forma de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). Segundo Lopes e Guilherme (2004) o nitrato apresenta uma carga negativa fraca, de forma que acaba sendo pouco retido no solo, permanecendo como íon livre na água do sistema, passível de ser lixiviado sob certas condições pluviométricas.

As cargas elétricas presentes no solo são geralmente divididas em dois grupos: as cargas permanentes e as cargas variáveis (dependentes do pH). As cargas permanentes, são cargas que não dependem do pH, presentes nas estruturas dos minerais e por isso sempre operantes. São produtos principalmente da substituição isomórfica. Nas Argilas do tipo 2:1, a carga permanente é fruto desse processo, de modo que nas motmorillonitas, por exemplo, as partículas  $\text{Al}^{3+}$  dos octaedros podem ser totalmente ou parcialmente substituídas por partículas  $\text{Mg}^{2+}$ . Essa substituição acaba resultando em uma valência (carga) negativa livre não atendida, uma vez que um átomo trivalente ( $\text{Al}^{3+}$ ) é substituído por um divalente ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Já na illita, ocorre

a substituição do átomo tetravalente ( $\text{Si}^{4+}$ ), dos tetraedros, por átomo trivalente ( $\text{Al}^{3+}$ ), deixando dessa forma, uma valência (carga) negativa livre (ALLEONI e MELO, 2009).

Outro processo que pode levar a um balanço de carga elétrica negativa é a dissociação do grupo OH. Segundo Lopes e Guilherme (2004) a presença do grupo OH nas bordas de um cristal de argila ou da matéria orgânica pode levar a dissociação de  $\text{H}^+$ , contribuindo para um saldo de carga elétrica negativa. De acordo com os autores as cargas negativas são originárias da dissociação dos radicais orgânicos (carboxílicos, principalmente, e fenólicos, em menor escala), e minerais, principalmente sesquióxidos de ferro e alumínio. Essas cargas são denominadas cargas variáveis e são dependentes do pH. Observa-se que à medida que se eleva o pH, o seu aparecimento é favorecido. Em solos tropicais, predomina argilas caulínicas (tipo 1:1). Nesse tipo de mineral (silicatado) os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio sob condição de pH elevado conferem um saldo de carga elétrica negativa.

Apesar da predominância de cargas negativas, podem ocorrer também no solo um saldo de cargas elétricas positivas. Esse balanço é favorecido por fenômenos como a protonação das hidroxilas (OH) dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, preferencialmente. Tratam-se, também de cargas variáveis, mas ao contrário da dissociação do grupo OH, é favorecido por pH extremamente baixo.

Nota-se, portanto, que as cargas elétricas variáveis no solo são originadas principalmente por óxidos e hidróxidos (óxidos hidratados) de Fe e de Al e matéria orgânica. Os óxidos hidratados de ferro e alumínio podem desenvolver tantas cargas negativas como positivas em suas superfícies, dependendo do pH da solução do meio. O desenvolvimento de cargas elétricas pela matéria orgânica, por outro lado, ocorre sob valores de pH bem mais baixos que os óxidos, o que favorece a ocorrência de cargas negativa, sendo pouco provável um saldo de cargas positivas. A origem das cargas negativas da matéria orgânica advém da dissociação de hidroxilas.

Em suma, devido a todo esse processo as partículas de argila apresentam cargas elétricas negativas nas faces e cargas positivas nos bordos, e como resultado, as cargas negativas das partículas de argila atraem íons positivos (cátions) de sais dissolvidos na água. Cada partícula pode, também, atrair várias camadas de moléculas de água em forma de esferas hidratadas dos cátions buscando um certo equilíbrio iônico. É devido a esses fenômenos que, argilominerais como as montmorillonitas, apresentam um alto poder de inchamento.

### 2.2.3.1 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A presença de carga elétrica nos solos é responsável por processos como a adsorção ou troca iônica, a dupla camada difusa, entre outras. Entender como se processam esses fenômenos é primordial para compreender o comportamento do solo em diversas situações. A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a Dupla Camada Difusa (DCD), por exemplo, exercem influência direta sobre a condutividade hidráulica dos solos, além de poderem explicar também como ocorre a dinâmica de poluentes nesse meio.

O fenômeno da troca iônica pode ocorrer de modo a induzir a retenção de cátions ou ânions, caracterizados por um excesso de cargas negativas ou positivas. Como o próprio nome sugere a troca catiônica caracteriza-se pela troca de cátions ( $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ , etc), enquanto a troca aniônica caracteriza-se pela troca de ânions ( $NO_3^-$ ,  $PO_4^-$ ,  $HPO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ , etc).

Como nos solos, em geral, predominam as cargas negativas, dar-se-á neste trabalho mais ênfase as trocas catiônicas, sendo os estudos envolvendo CTC, também, muito mais abundantes do que aqueles sobre CTA.

Segundo Lopes e Guilherme (2004), nas argilas, os cátions retidos (adsorvidos) podem ser substituídos por outros cátions, o que significa dizer que eles são trocáveis. Por exemplo, o cálcio pode ser trocado pelo hidrogênio e/ou potássio. A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é a expressão utilizada para designar o número total de cátions trocáveis que um solo pode reter em relação a sua quantidade de carga negativa. Em outras palavras, CTC é um parâmetro físico-químico, que indica a quantidade de cátions, que o solo é capaz de reter em determinadas condições, e trocar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions, sendo função da intensidade de cargas negativas presente nas próprias partículas do solo. Ou seja, essa é uma troca basal, definida como uma troca de cátion-por-cátion, estabelecida entre cátions das unidades estruturais das argilas, e a solução aquosa, que contém o cátion de maior atração.

Essa habilidade das argilas de carregar cátions trocáveis, pode ser expressa em termos de miliequivalentes por 100g de argila, e, segundo Lopes e Guilherme (2004), possui algumas características que devem ser ressaltadas face as suas implicações:

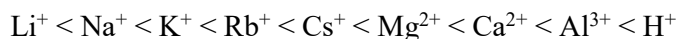
- a) *O fenômeno de troca é reversível*: isto significa que embora haja um ponto de equilíbrio na reação, um cátion desloca outro e assim sucessivamente;
- b) *O fenômeno de troca é estequiométrico*: os cátions se substituem em quantidade equivalentes;

- c) *O fenômeno de troca é instantâneo*: tão logo seja adicionado ao solo o novo cátion, a troca desse novo cátion com cátions já adsorvidos ao solo ocorre instantaneamente.

Lopes e Guilherme (2004), destacaram alguns fatores que afetam diretamente a CTC:

- a) *Espécie e quantidade de argila e matéria orgânica* – de acordo com a composição do solo, ou seja, proporção de cada material e a presença ou não de matéria orgânica, o valor de CTC pode variar significativamente (Tabela 2.)
- b) *Superfície específica* - quanto mais subdividido for o material, maior será a sua superfície específica e maior a CTC do solo.
- c) *pH* - a influência do pH do meio na CTC será tanto maior, quanto maior for a presença de espécies de minerais de argila com dominância de cargas dependentes de pH e, ou, matéria orgânica que, praticamente, só apresenta esta característica. Esse efeito é decorrente da dissociação dos radicais orgânicos e, ou, sesquióxidos de ferro e alumínio, além de fenômenos de desobstrução de cargas da matéria orgânica ocupadas por alumínio, ferro e manganês

Os cátions que estão retidos (adsorvidos) as estruturas dos argilominerais não são “presos” com a mesma intensidade. Em um sentido mais amplo, a energia de ligação dos cátions às estruturas dos argilominerais, não são as mesmas. Essa intensidade varia com a maior ou menor valência e com o grau de hidratação dos cátions. Desse modo, esses são passíveis de serem “trocados”, seguindo uma série preferencial, que ilustra a facilidade de deslocamento de um cátion, a qual apresentamos abaixo:



Destaca-se que o hidrogênio é exceção à regra, pois, apesar de ser monovalente, apresenta uma ligação por covalência muito “forte”.

Na tabela 1 apresenta-se a CTC, bem como a superfície específico e tamanho de partículas de minerais argilosos e não argilosos.

Tabela 1 - CTC de materiais argilosos e não argilosos.

<b>MATERIAL</b>	<b>CTC (cmol<sub>c</sub>/kg)</b>
<b>Matéria orgânica humificada</b>	100-250
<b>Vermiculita</b>	100-150
<b>Montmorilonita</b>	80-120
<b>Ilita</b>	30-50
<b>Clorita</b>	10-40
<b>Galuconita</b>	5-40
<b>Haloisita</b>	5-10
<b>Caulinita</b>	3-15
<b>Óxidos de Fe e Al</b>	2-5

Fonte: Grim & Guven (1978)

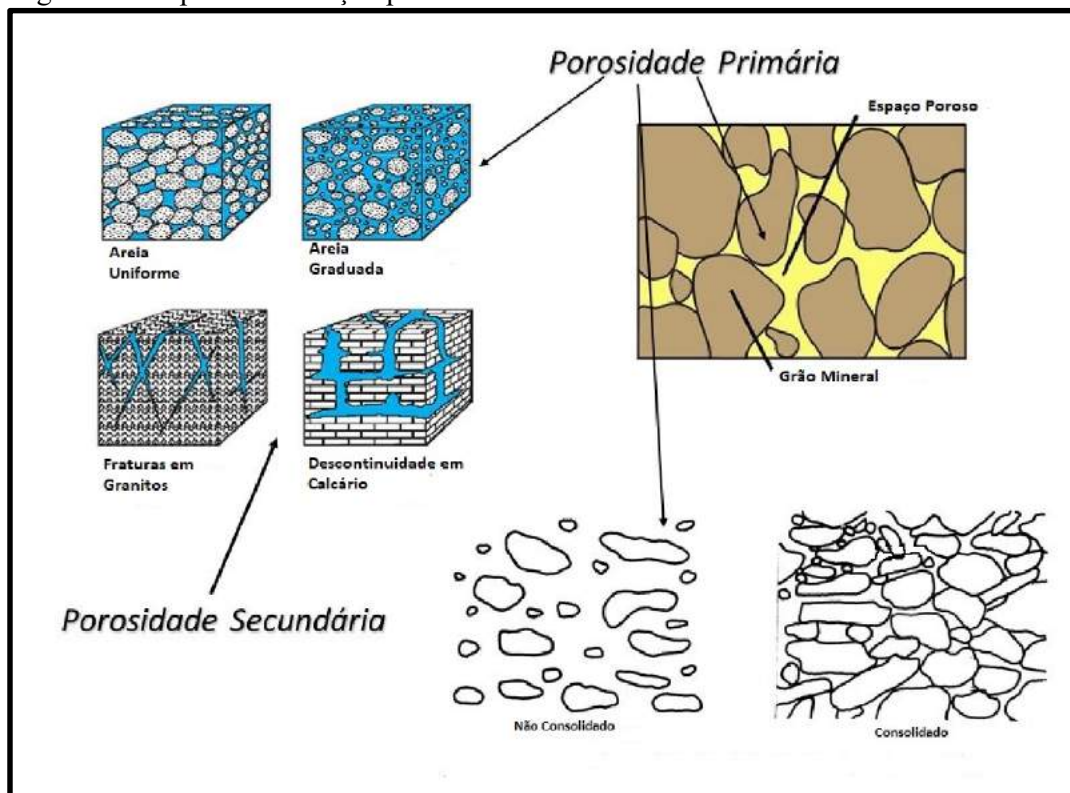
#### **2.2.4 Porosidade e densidade**

Os espaços vazios do solo, que podem estar preenchidos total ou parcialmente por água e/ou ar são denominados poros. A estrutura porosa de um solo é função da textura e estrutura ou arranjo das partículas e de fenômenos físico-químicos.

Segundo Gregg e Sing (1982 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2001) há dois tipos de formação porosa. O primeiro tipo, também chamado de porosidade primária compreende os espaços vazios existentes entre as partículas primárias e secundárias (FIGURA 10). Essa formação porosa é fruto do próprio processo de formação dos solos sedimentares, caracterizada pelos espaços entre partículas. As características desses sistemas de poros estão associadas ao tamanho, a forma das partículas e a forma do empacotamento das partículas primárias (esféricas ou planas) e secundárias.

O segundo tipo de formação porosa diz respeito as cavidades, canículos, sulcos, supressões que se forma no interior dos sólidos, por solubilidade, reações com formação e permeação de gases, expansão de gases no interior de partículas e outros fenômenos físico-químicos. Esse tipo de porosidade está muito presente em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, por faturamento ou falhas durante a sua formação, de modo que o intemperismo sob esses tipos de rochas pode originar uma estrutura porosa singular, também chamada de porosidade secundária

Figura 10 - Tipos de formação porosa

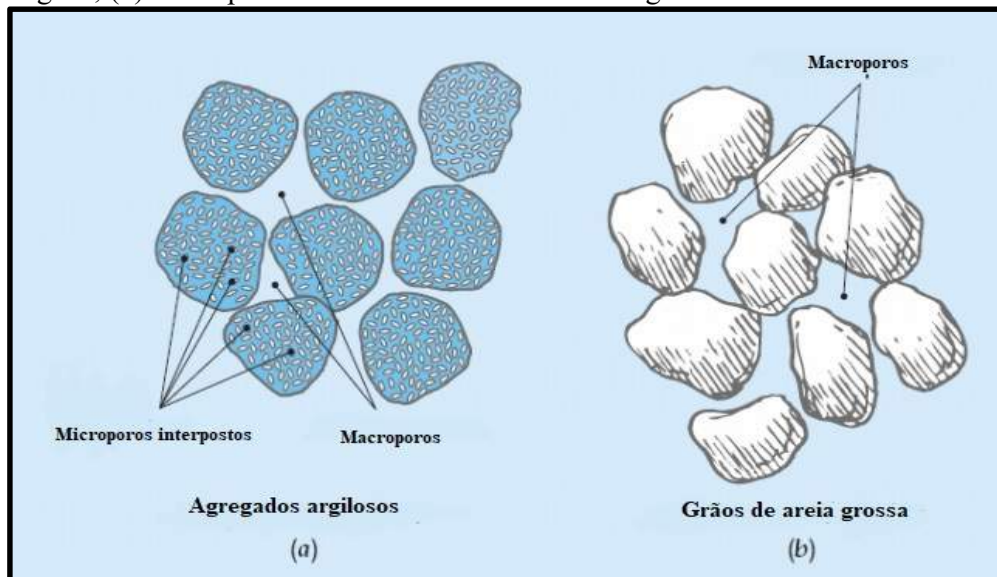


Fonte: <https://goo.gl/rUutWA>.

As dimensões dos poros, bem como a distribuição do tamanho dos poros e o tipo de porosidade levaram a classificação desses em macroporos, mesoporos e microporos. Os microporos, apesar de presentes em alguns materiais siltosos, tratam-se de uma estrutura porosa característica das argilas, determinada por pequenos poros, presentes, sobretudo, em partículas (minerais) secundárias (FIGURA 11 a). Os macroporos são os poros de maiores dimensões, caracterizado principalmente pelos espaços entre as partículas, predominante principalmente em solos granulares (Areias e Siltes) (FIGURA 11 b). Os mesoporos são estruturas porosas intermediárias, característicos de siltes e areias finas.

Greg e Sing (1982), estabeleceram faixas de valores para os poros de acordo com sua classificação, de modo que poros com diâmetros superiores a 500 Å eram classificados como macroporos. Poros com diâmetro entre 20 Å e 500 Å eram classificados como mesoporos e poros com diâmetro inferior a 20 Å eram classificados como microporos.

Figura 11 - Classificação do tamanho de poros: (a) microporos - característicos das argilas; (b) macroporos – característico de materiais granulares.



Fonte: Weil e Brady (2008).

Na tabela 2 são apresentadas as classes de poros com suas respectivas características e funções, segundo

Tabela 2 - Características e Funções de acordo com a classe de poros.

CLASSE SIMPLIFICADA	CLASSE	CARACTERÍSTICAS E FUNÇÕES
<b>Macroporos</b>	Macroporos	<i>Geralmente encontrados entre unidades estruturais; drenagem da água gravitacional; difusão e gases; tamanho suficiente para acomodar raízes</i>
<b>Microporos</b>	Mesoporos	<i>Retenção de água; movimento de água por capilaridade;</i>
	Microporos	<i>Geralmente encontrados dentro das unidades estruturais; retenção de água disponível as plantas</i>
	Ultramicroporos	<i>Presentes em solos argilosos; retenção de água não disponível às plantas</i>
	Ciptoporos	<i>Seu tamanho exclui todos os microrganismos e moléculas de maior tamanho</i>

Fonte: Soil Science Society of America (1996).

Essas estruturas porosas influenciam características como a superfície específica, por exemplo. Segundo Gregg e Sing (1982 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2001) a área superficial externa é determinada pela porosidade caracterizada pelos espaços existentes entre as partículas primárias e secundárias (mesoporos e macroporos). Esse tipo de área aumenta à medida que a superfície do sólido apresenta mais imperfeições, tais como sulcos, cavidades e fissuras, com dimensões maiores em comprimento que em profundidade. Já área interna é formada pelas paredes das descontinuidades, sulcos, poros e cavidades com profundidades maiores que o

comprimento e com abertura para o exterior. A superfície interna é característica, principalmente, das partículas de argila.

Além da superfície específica, a porosidade influencia diversas outras propriedades do solo, como a densidade, compressibilidade, permeabilidade, a resistência dos solos, retenção de água, adsorção de cátions entre outras.

#### *2.2.4.1 Densidade dos Solos*

A densidade é uma propriedade física que relaciona a massa e o volume de um material, definida numericamente como a razão entre a massa e o volume. Nos solos a dois tipos de densidade a se considerar a densidade global (massa específica do solo) e a densidade das partículas de solos (massa específica dos grãos de solo). A diferença entre ambas reside basicamente na consideração ou não da porosidade, sendo ambas determinadas para amostras secas (sem a presença de água). A densidade global é a densidade que inclui o espaço poroso do solo, de forma que é definida como a razão da massa de uma amostra solo seco pelo volume que ela ocupa incluindo partículas e poros. A massa específica real dos grãos desconsidera os espaços porosos de modo que é definida numericamente pela razão da massa da amostra de solo seca pelo volume ocupado apenas pelas partículas.

Deve-se ressaltar que a densidade global não é uma característica imutável e intrínseca ao tipo de solo, de modo que a mesma pode variar de acordo com diversos fatores como textura, estrutura e arranjo das partículas, presença de cargas elétricas no solo, tensão a qual está submetida, entre outras, além das condições de temperatura e pressão as quais está sujeita. Já a densidade das partículas, apesar de também não possui um valor fixo para um determinado tipo de solo, sofre pequenas variações em seu valor, sendo influenciado sobretudo pela sua composição química e mineralógica e estrutura cristalina do mineral. A densidade das partículas não é influenciada pelos espaços porosos, de forma que aspectos como estrutura e arranjo de partículas não influenciam na massa específica dessas, além disso seu valor é o mesmo com ou sem presença de água, a qual deve ter sua massa descontada caso esteja incluída no valor de massa da amostra. Na tabela 3 são apresentadas a densidade das partículas de alguns materiais.



Tabela 3 - Densidade das partículas.

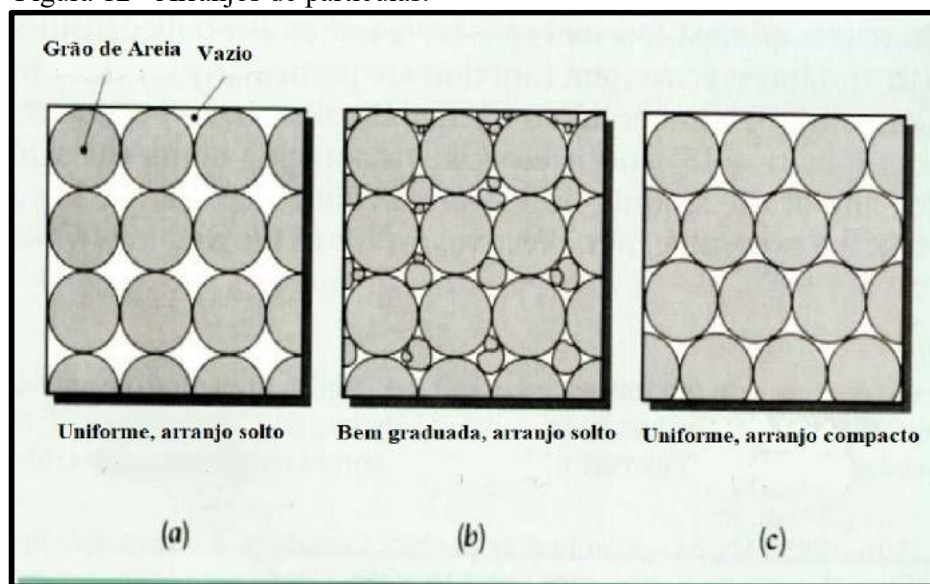
MATERIAL	DENSIDADE DAS PARTÍCULAS (g/cm <sup>3</sup> )
Húmus	1,3 – 1,5
Argila	2,2 – 2,5
Quartzo	2,5 – 2,8
Feldspato	2,5 – 2,6
Calcita	2,6 – 2,7
Hematita, pirita e magnetita	4,9 – 5,3

Fonte: Filho e Francelino (2001).

Dentre os principais fatores que afetam a densidade do solo, a porosidade tem grande relevância. Solos com maior proporção de espaço poroso total em relação ao volume de sólidos possuem menor densidade. Além disso, solos de textura mais finas (siltes e argilas), possuem elevados teores de matéria orgânicas se comparados com solos arenosos, o que acaba contribuindo para uma diminuição da densidade do solo. Outro fator que pode contribuir para densidade do solo é a estrutura ou arranjo das partículas. Em solos arenosos, por exemplo, além da baixa microporosidade e do baixo teor de matéria orgânica, as partículas estão menos predispostas a formar agregados (menor ação de forças elétrica) conferindo ao solo uma maior densidade.

Outro fator que exercem grande influência na densidade do solo é a compactação. A compactação melhora as características e estabilidade do solo através da diminuição dos vazios, afetando o espaço poroso, a estrutura e arranjo das partículas, influenciando diretamente a densidade do solo (FIGURA 12). Vale destacar que a compactação quando aplicada aos solos frágeis pode levar a quebra dos grãos o que implicaria na mudança da densidade do solo. A compactação promove mudanças na distribuição do espaço poroso formado por mesoporos e macroporos, influenciando ainda a condutividade hidráulica, as interações elétricas no solo, a compressibilidade, as interações químicas entre fluidos percolantes e o solo, entre outras.

Figura 12 - Arranjos de partículas.



Fonte: Weil e Brady (2008).

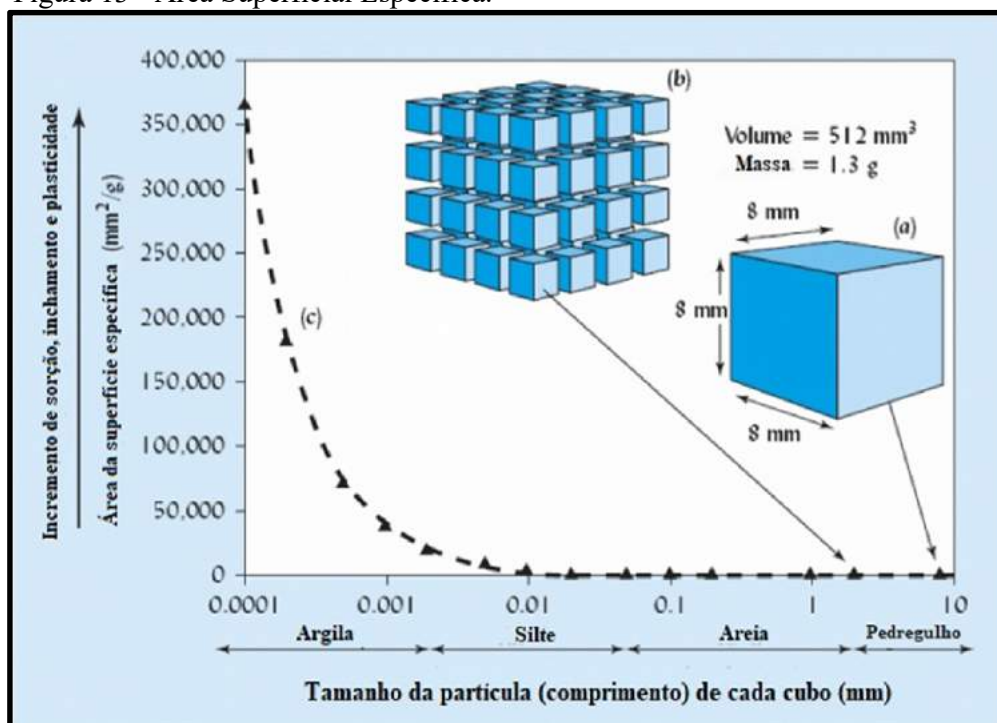
### 2.2.5 Área Superficial Específica (ASE)

As cargas elétricas presentes no solo encontram-se na superfície de seus minerais, de forma que muitos dos processos e do comportamento do solo são influenciados por fenômenos interfaciais que ocorrem nessas superfícies. Propriedades elétricas como dupla camada elétrica, potencial zeta, condições de carga zero (PCZ), entre outras, associados aos fenômenos como adsorção, adesão e tensão superficial, ocorrem nessas superfícies entre as fases sólidas e líquidas, e são indispensáveis para compreensão de diversos fenômenos e processos do solo, evidenciando a importância do conhecimento das características superficiais dos sólidos.

Segundo Filho e Francelino (2001) a superfície de um sistema disperso se expressa em termos de superfície específica, que é definida como sendo a relação entre a área da superfície exposta e o seu volume ou massa. Nota-se, portanto, que área superficial exposta, densidade (massa e volume), textura e estrutura do solo e estrutura porosa estão intrinsecamente associadas, devendo ser analisadas de forma conjunta, tanto nas análises de superfície específica, como para a compreensão dos fenômenos interfaciais.

Segundo Teixeira *et al.* (2001), a área de uma determinada massa de sólido é inversamente proporcional ao tamanho de suas partículas, ou seja, à medida que diminui o diâmetro das partículas, aumenta a área superficial específica influenciando propriedades relacionadas como a sorção, expansão e plasticidade (FIGURA 13).

Figura 13 - Área Superficial Específica.



Fonte: Weil e Brady (2008).

Como foi visto no item 2.2.4, existe dois tipos diferentes de formação porosa, a porosidade primária e a porosidade secundária. Junto esses dois tipos são responsáveis pela definição de superfície externa e interna. Gregg e Sing (1982 *apud* TEIXEIRA *et al.*, 2001) afirmaram que: a área externa é definida pela porosidade, sendo determinada pelos espaços existente entre as partículas primárias e secundárias, enquanto a área interna é formada pelas paredes dos sulcos, poros e cavidades com profundidades maiores do que o comprimento e que tenham abertura para o exterior. Segundo os autores a área externa pode aumentar quanto mais imperfeições na forma de sulcos e fissuras (com dimensões maiores em comprimento do que em profundidade) a superfície do sólido apresentar. Os mesmos afirmam ainda que área interna é muitas vezes maior que a superfície externa, sendo determinante para superfície total do sólido e ressaltam que poros fechados não contribuem para o aumento da área interna.

A textura do solo aliadas a superfície específica influenciam diversas outras propriedades do solo como (COOPER E OTTO, 2017):

- Maior capacidade de retenção de água quanto maior for a superfície específica. Além das pequenas quantidades de água retida nos pequenos poros do solo, a água também é retida como pequenos filmes aderidos à superfície das partículas do solo.

- Maior a capacidade de retenção de nutrientes e outras substâncias químicas do solo quanto maior for a área superficial. Gases e substâncias químicas são atraídos e adsorvidos pela superfície das partículas minerais.
- Quanto maior a área superficial, maior a taxa de liberação de nutrientes para os solos através de minerais intemperizáveis. O processo de intemperismo ocorre na superfície das partículas minerais, liberando elementos constituintes na solução do solo.
- Maior a tendência de as partículas manterem-se unidas em uma massa coesa ou como pequenos agregados, quanto maior a área superficial. As superfícies das partículas minerais muitas vezes apresentam tanto cargas negativas como algumas cargas eletromagnéticas positivas, então essas superfícies das partículas e filmes de água entre eles tendem a se atrair.

A tabela 4 apresenta a superfície específica de alguns materiais argilosos e não argilosos.

Tabela 4 - Valores característicos de superfície específica.

MINERAL DE ARGILA	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA (m <sup>2</sup> /g)
<b>Matéria orgânica humificada</b>	700
<b>Minerais da fração argila</b>	
<i>Silicatos de alumínio não cristalino</i>	
Alofanas	400 – 700
<i>Argilominerais</i>	
Caulinita	10 – 30
Clorita	100 – 175
Ilita	100 – 200
Vermiculita	300 – 500
Montmorilonita	700 – 800
<i>Óxido de ferro</i>	
Hematita	300 – 500
Goethita	50 – 200
<i>Óxido de alumínio</i>	
Gibbsita	2-5

Fonte: Filho e Francelino (2001).

### 2.2.6 Propriedades físicas da areia, silte e argila

Cooper e Otto (2017) apresentaram pequenas descrições das características das partículas de areia, silte e argila, que apresenta alguns indícios de como as propriedades físicas desses materiais influenciam o comportamento dos solos.

As partículas de areia, trata-se basicamente de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) podendo também estar presente outros minerais silicatados. Devido ao tamanho relativamente grande de suas partículas (quando comparado com siltes e argilas), possui tamanho de poros largos com diâmetro relativamente grandes e não apresenta estrutura microporosa, o que explica o fato de apresentar baixa superfície específica. Devido a essas características possui pequena capacidade de retenção de água ou nutrientes, além disso não mantém suas partículas unidas em uma massa coerente (não coesivo).

O silte apesar de possuir composição mineralógica similar à das areias, tratam-se de partículas ainda mais intemperizadas, que são tão pequenas que não são visíveis a olho nu, de forma que sua descrição textural (tátil) faz menção a um material com sensação de aspereza inferior as areias. Por se tratar de um material composto por minerais intemperizáveis com partículas diminutas possui grande área superficial, aumentando consideravelmente a retenção de água quando comparado as areias e permitindo uma maior liberação de nutrientes para o solo.

As argilas possuem composição mineralógica mais complexa, sendo formada principalmente por argilominerais (filossilicatos), além de possuir também em sua composição minerais não argilosos (hidróxidos de Fe e Al, quartzos, micas, feldspatos, calcitas e dolamitas), e substâncias orgânicas (principalmente húmus). Possui uma estrutura microporosa, com poros tão pequenos e irregulares que ocasiona um lento movimento dos fluidos no solo. Conseqüentemente, possui elevada superfície específica, que para algumas argilas como a bentonita pode chegar a  $800 \text{ m}^2/\text{g}$  (GROHMANN, 1972). Essas características fazem com que as argilas apresentem elevada capacidade de adsorção de água e outras substâncias, além de alta coesividade sendo facilmente moldada (elevada plasticidade). Além disso apresenta também elevada capacidade de expansão e retração, elevada compressibilidade, alta capacidade de adsorção de elementos químicos. Observa-se, portanto que as propriedades e comportamentos dos solos estão diretamente associados a fração de argila presente nesse.

O quadro 1 apresenta as principais características que o solo pode apresentar de acordo com a predominância de areia, silte ou argila.

Quadro 1 - Características de acordo com textura.

TEXTURA		
SOLOS ARENOSOS	(SOLOS SILTOSOS)	SOLOS ARGILOSOS
<i>Menor porosidade do solo</i>	←→	<i>Maior porosidade do solo</i>
<i>Menor micro e maior macroporosidade</i>	←→	<i>Maior micro e menor macroporosidade</i>
<i>Baixa retenção de água</i>	←→	<i>Alta retenção de água</i>
<i>Boa drenagem e aeração</i>	←→	<i>Drenagem lenta e pouco arejado (se pouco agregados)</i>
<i>Menor densidade do solo</i>	←→	<i>Maior densidade do solo</i>
<i>Aquece rápido</i>	←→	<i>Aquece lentamente</i>
<i>Resiste à compactação</i>	←→	<i>Maior susceptibilidade à compactação</i>
<i>Superfície específica baixa</i>	←→	<i>Superfície específica elevada</i>
<i>Baixa CTC</i>	←→	<i>Maior CTC</i>
<i>Mais lixiviável</i>	←→	<i>Menos lixiviável</i>
<i>Maior erosão</i>	←→	<i>Mais resistente à erosão</i>
<i>Coesão baixa, friável</i>	←→	<i>Coesão elevada, firme</i>
<i>Consistência friável quando úmido (Compacidade)</i>	←→	<i>Consistência plástica e pegajosa quando molhado Fácil preparo mecânico</i>
<i>Potencial de compressão e contração baixo</i>	←→	<i>Potencial de compressão e contração moderado a muito alto</i>
<i>Matéria orgânica baixa e rápida decomposição</i>	←→	<i>Matéria orgânica média a alta e menor taxa de decomposição</i>
<i>Resistência a mudança de pH baixa</i>	←→	<i>Resistência a mudança de pH alta</i>
<i>Potencial de lixiviação de poluentes alta</i>	←→	<i>Potencial de lixiviação de poluentes baixa</i>

Fonte: Adaptado por Elias (2018).

### 2.3 Condutividade Hidráulica nos Solos

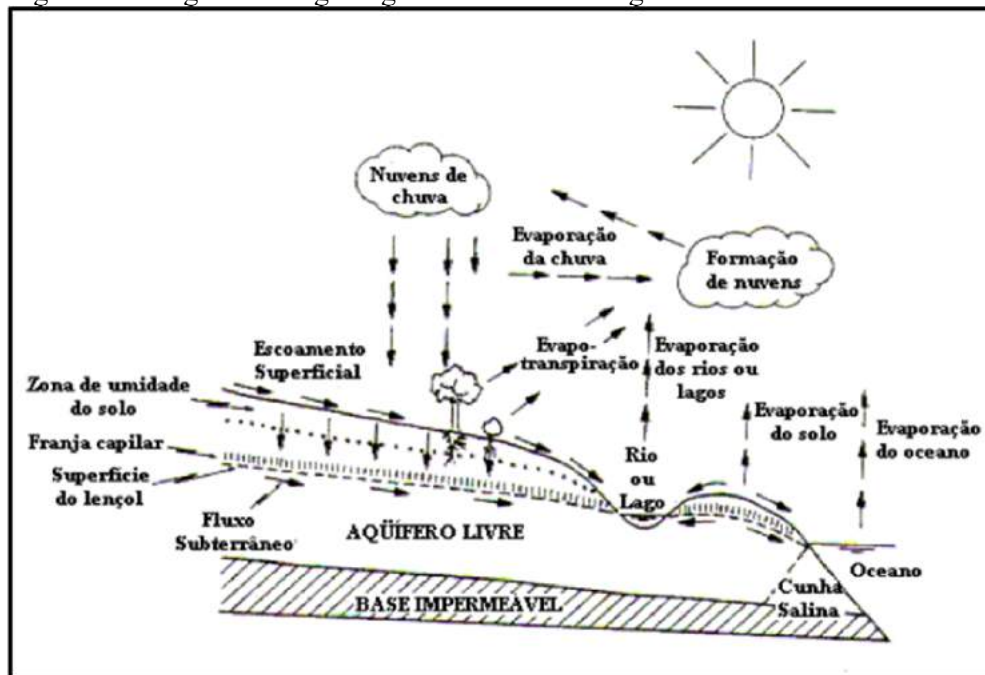
A água no solo pode ser apresentar sob formas distintas, dentre elas pode-se citar a água adsorvida, a água capilar e água livre. Água adsorvida (ou água hidrocópica) está ligada às superfícies das partículas do solo por meio de forças elétrica, não se movendo nem por capilaridade nem por gravidade. É absorvida da atmosfera, em forma de vapor, única forma sob a qual é capaz de se movimentar. A água capilar é aquela retida ao solo por meios de fenômenos interfaciais, que se eleva pelos interstícios capilares formados pelas partículas sólidas, devido a ação das tensões superficiais nos contatos ar-água-solo. Água livre ou gravitacional é aquela que não consegue mais ser retida pelas partículas sólidas e circula nos solos. Pode estar em

equilíbrio hidrostático ou fluir sob a ação da gravidade ou de outros gradientes de energia. Tanto a água capilar quanto a gravitacional podem movimentar-se no solo no estado líquido,

O solo funciona como um grande reservatório. Sua estrutura é composta por partículas sólidas e espaços vazios (poros e discontinuidades), também denominados interstícios, onde água que se infiltra pode se acumular ou circular. Apesar dos interstícios poderem ter grandes dimensões, a maioria são extremamente pequenos. São geralmente interligados permitindo o deslocamento das águas infiltradas (MARAGON, 2009).

A água subterrânea é originada predominantemente pela infiltração de águas da chuva. A acumulação desta água nos aquíferos subterrâneos obedecem a um regime hidrogeológico, que confere a esta uma dinâmica dentro do solo (FIGURA 14). A presença da água no solo o separa em zonas: a zona vadosa (ou zona de aeração) e a zona saturada, sendo interface entre essas duas zonas chamada de nível freático.

Figura 14 - Regime hidrogeológico e dinâmica da água nos solos.



Fonte: Maragon (2009).

A zona vadosa, também chamada de zona saturada é a região que está entre o lençol freático e o nível do terreno. Nessa região os espaços vazios (poros) são preenchidos por ar e, ou, água na forma de umidade, é também a zona onde ocorre a retenção de muitos metais pesados. A zona vadosa pode ser ainda dividida em três regiões: a zona de umidade, a zona intermediária e a franja capilar. A primeira é a mais superficial, onde a perda da água de adesão

para atmosfera é mais intensa. A Franja capilar é a região mais próxima do nível do lençol e onde a umidade é maior, devido a proximidade da zona saturada. A zona intermediária como próprio nome sugere, esta compreendida entre zona de umidade e a franja capilar, e da mesma forma sua umidade possui um valor entre a umidade das duas zonas citadas.

A zona saturada é a região abaixo do lençol freático, onde os poros e as discontinuidades das rochas estão totalmente preenchidos por água. É a região onde encontra-se a água livre. O nível freático ou lençol freático pode variar de acordo com as condições hidrogeológicas (clima, regime de chuvas...).

O fluxo de água pode ocorrer sobre dois regimes distintos; o escoamento (ou fluxo) laminar ou o escoamento turbulento. No escoamento laminar as partículas do fluido se movimentam em trajetórias paralelas, uma não interferindo no movimento das outras. No regime de fluxo turbulento, as trajetórias de fluxo são irregulares, cruzando-se umas com as outras de forma aleatória. No estudo de fluxo em condutos fechados, Reynolds estabeleceu um limite inferior de velocidade entre os dois regimes, denominado velocidade crítica, de forma que o fluxo que ocorre abaixo da velocidade crítica é o escoamento laminar e acima caracteriza o fluxo turbulento. De forma prática, considera-se o fluxo no solo como sendo laminar, condicionado sobre tudo pela estrutura porosa do solo, composta geralmente por pequenos poros. A resistência ao fluxo deve-se principalmente a viscosidade do fluido e ao arranjo das partículas e distribuição dos poros. O escoamento turbulento ocorre apenas no caso de solos mais grossos, pedregulhos, todavia necessita de elevados valores de gradientes hidráulicos para que isto ocorra.

A conservação da energia (Bernoulli), permeabilidade dos solos (lei de Darcy) e conservação da massa são os princípios básicos que regem o fluxo de água em solos. Com base nesses princípios, pode-se afirmar que a energia total em dois pontos distintos no solo deve ser diferente para que haja fluxo entre eles, de modo que a água fluirá sempre do ponto de maior energia para o ponto de menor energia total.

Em 1856, o engenheiro francês H. Darcy realizou um experimento no qual estudou o fluxo de água através de um filtro de areia. No experimento (FIGURA 15) foram mantidos constantes os níveis de água  $h_1$  e  $h_2$ , impondo um fluxo de água no sentido descendente através da amostra de areia e então, mediu-se a vazão de água ( $q$ ) que passa através de uma amostra de espessura ( $L$ ). O experimento foi realizado variando-se o comprimento da amostra e a carga hidráulica ( $\Delta h = h_1 - h_2$ ). Darcy observou-se que a taxa de fluxo (vazão) era proporcional a razão  $\Delta h/L$  (gradiente hidráulico), através da seguinte relação:



$$q = k \cdot (\Delta h/L) \cdot A \Rightarrow q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

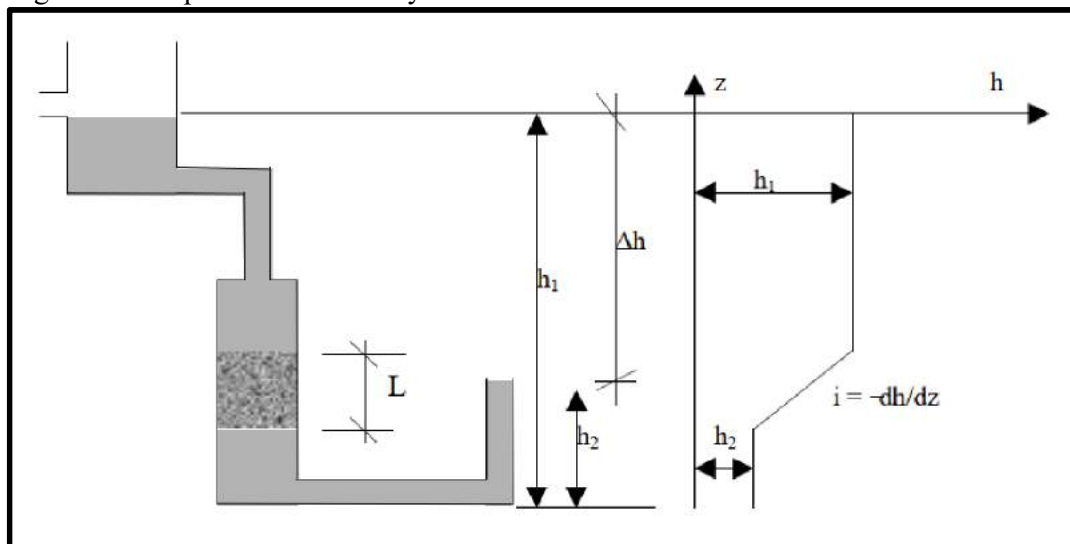
onde  $i$  é o gradiente hidráulico e  $A$  é a área da seção transversal da amostra perpendicular a direção do fluxo. A constante  $k$  é uma constante de proporcionalidade, chamada de coeficiente de permeabilidade e expressa a facilidade com que a água flui através do vazio da amostra.

A vazão ( $q$ ) dividida pela área transversal do corpo de prova ( $A$ ) indica a velocidade com que a água percola no solo. O valor da velocidade de fluxo da água no solo ( $v$ ), é dado pela eq. 2, apresentada a seguir.

$$q = k \cdot i \cdot A \Rightarrow (q/A) = k \cdot i \Rightarrow v = ki \quad (2)$$

Vale destacar que a Lei de Darcy é válida para o fluxo de água no solo sob o regime de escoamento laminar. Ressalta-se que a condutividade hidráulica ( $k$ ) é um parâmetro característico do meio poroso e do fluido que percola por esse meio.

Figura 15 - Experimento de Darcy.



Fonte: L. Machado e C. Machado (2008).

### 2.3.1 Fatores que afetam a condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica nos solos pode ser influenciada por diversos fatores, como: teor de umidade, método e esforço de compactação, grau de saturação, gradiente hidráulico, tamanho dos aglomerados das partículas de solo, distribuição e tamanho dos poros, composição química do fluido percolante, composição mineralógica, entre outros (LIKIANTCHUKI, 2007).

A mineralogia do solo é um dos principais fatores responsáveis pelas características hidráulicas do solo. Os minerais primários que compõem os siltes e areias, conferem a esse tipo de solo condutividades hidráulicas relativamente altas. Fenômenos de superfície são quase inexistentes nesses tipos de solo, isso aliado à forma e ao tamanho de suas partículas condiciona ao solo valores de condutividade hidráulica mais elevados.

Em contrapartida os minerais de argila ou minerais secundários, são responsáveis pelos baixos valores de condutividade hidráulica dos solos. A forma e o tamanho das partículas conferem ao solo uma textura e estrutura singular. Os poros de solos argilosos, por serem menores que outros tipos de solo, impõem dificuldade ao movimento de fluidos no interior do meio poroso. Adicionalmente, as propriedades físico-químicas proporcionam a manifestação de diversos fenômenos interfaciais de superfície, conferindo ao solo uma baixa condutividade hidráulica. Isso evidencia que o solo pode sofrer significativas mudanças nas suas propriedades e comportamento pela presença desses minerais.

Nos minerais secundários das argilas, devido às suas características (partículas extremamente pequenas, baixa porosidade, elevada superfície específica, plasticidade elevada, presença de cargas elétricas, etc.), ocorrem fenômenos de natureza elétrica que influenciam o comportamento do sistema. Como foi visto no item 2.2.3, a presença de carga elétrica nos solos é fortemente atribuída ao próprio processo de formação dos minerais, que contempla o fenômeno da substituição isomórfica, responsável pela presença de valência eletropositiva ou eletronegativa. É possível observar nos solos argilosos fenômenos como a troca ou adsorção iônica e a dupla camada difusa, que influenciarão, por exemplo, o comportamento de expansão e retração dos solos, que impactará diretamente na condutividade hidráulica desse.

A caulinita argilomineral do tipo 1:1 não apresenta cátions entre as camadas estruturais. A ausência desses cátions e os espaços entre as estruturas básicas inibem a expansão desse tipo de argila (HEINECK, 2002). Em contrapartida as montmorillonitas, são argilominerais de alta superfície específica e elevada capacidade de troca catiônica. A configuração elétrica dessas partículas, com cátions existentes entre as camadas estruturais, que hidratam na presença de água (inchamento cristalino), somada à elevada concentração de íons na superfície do argilomineral, estimula a penetração da água entre as camadas. A entrada de água entre as camadas busca um equilíbrio de concentrações (dupla camada difusa - inchamento osmótico), conferindo a esse argilomineral um alto poder de inchamento (ELIAS, 2015), o que reduz consideravelmente sua permeabilidade.

O teor de umidade, é um outro fator que pode influenciar na condutividade hidráulica. Lambe (1958), apresentou uma teoria que relaciona o teor de umidade em solos

compactados com a estrutura dos agregados de partículas. Segundo Lambe, num solo compactado, quanto mais baixa a umidade, a atração face-aresta não é vencida pela energia de compactação e solo fica com uma estrutura floclada. Já para umidades maiores a repulsão entre as partículas pode aumentar e a compactação as orientam, posicionando-as de forma paralela em uma estrutura dispersa. Para uma mesma umidade quanto maior a energia de compactação maior o grau de dispersão.

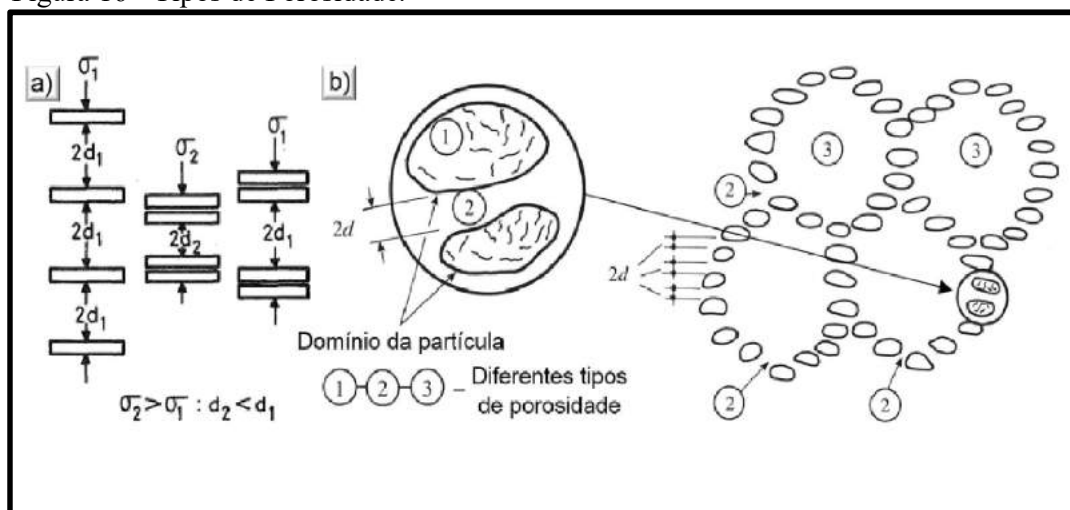
Olsen (1962), em sua teoria dos agregados de partículas, sugere que a maior parte do fluxo de água em argilas compactadas ocorre nos espaços existentes entre os aglomerados (HEINECK, 2002). Sob essas premissas uma estrutura floclada tende a apresentar uma maior condutividade hidráulica uma vez que possui mais vazios.

A natureza química do fluido percolante é outro fator que pode afetar a condutividade hidráulica já que ela é capaz de afetar a estrutura através da floclação das partículas ou do encolhimento do esqueleto do solo. Para evitar mudanças na estrutura do solo é muito comum realizar a estabilização química, através da adição do agente cimentante (cimento, cal, cinza). Vale destacar que o agente cimentante além de atenuar as mudanças na estrutura do solo, “tampa” os poros, densificando a massa de solo e diminuindo a condutividade, podendo ainda aumentar a resistência mecânica. Segundo Heineck (2002) as partículas do solo tornam-se mais resistentes à alteração (floclação ou orientação) quando estão em uma configuração mais densa, o que evidencia que um aumento do esforço de compactação é capaz de estabilizar a massa de solo e torná-la mais resistente a ataques químicos.

Segundo Póvoa (2014) os estudos da condutividade hidráulica das argilas desenvolvidos por Olsen (1962) serviram de base para teoria da agregação das partículas, que buscou justificar as discrepâncias entre a condutividade medida em ensaios e a prevista segundo a lei de Darcy. Nagaraj et al. (1990 *apud* PÓVOA, 2014), com base na análise da compressibilidade e permeabilidade, propuseram a existência de três níveis de porosidade no arranjo estrutural das partículas de uma argila (FIGURA 16). O tipo 1 se referia a porosidade intra-agregados, ou seja, entre partículas individuais de argila dentro de um agregado. O tipo 2, tratava-se da porosidade inter-agregados, em outras palavras, entre dois agregados que interagem entre si (interação físico-químicas) dependendo do carregamento exterior. E por fim o tipo 3, referente a porosidade inter-agregados de maior diâmetro, que diz respeito a um grupo de agregados em equilíbrio com a tensão da água. Esse tipo de porosidade pode representar até 90% do volume de porosidade de uma argila, sendo a que mais influencia a condutividade hidráulica desse solo. Com base no exposto, é possível observar, portanto, a relação direta entre essas duas características distintas dos solos (porosidade e permeabilidade), mas

intrinsecamente associadas. No item 2.2.4 foram apresentados elementos pertinentes sobre a porosidade dos solos que corroboram essa perspectiva.

Figura 16 - Tipos de Porosidade.

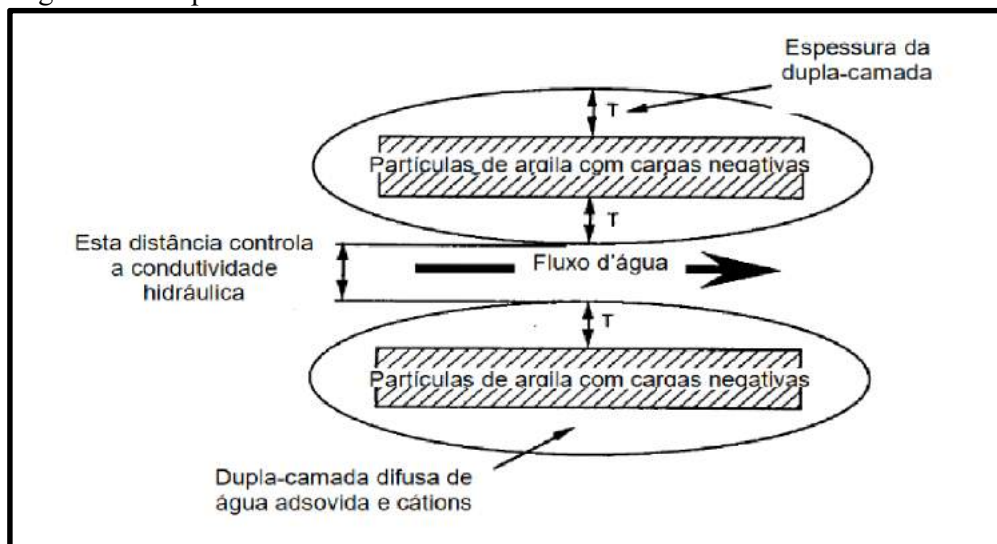


Fonte: Daniel (1994)

Assim como nos solos compactados, nos GCL's (Geocompostos Argilosos) a presença de agentes orgânicos ou inorgânicos são capazes de alterar a permeabilidade do meio. É cada vez mais comum no ensaio de permeabilidade desses, a utilização dos mesmos fluidos percolantes a que serão submetidos a massa de solo. Vale destacar que mesmo a água sendo o fluido percolante, a depender de suas características pode haver alterações na condutividade hidráulica do meio. Variações na quantidade de ar dissolvido, o tipo e concentração de eletrólitos, teor de nutrientes, podem acarretar em valores diferente de permeabilidade para o solo. É sempre preferível o uso de água deaerada, quando não for possível a água de rede de abastecimento é a mais recomendada.

Os eletrólitos (substâncias químicas que, dissolvidas em água ou outro solvente, origina íons positivos e íons negativos), podem exercer influência na condutividade hidráulica, uma vez que o aumento da concentração desses ou na valência dos cátions pode aumentar a espessura da dupla camada de íons, diminuindo a condutividade hidráulica (FIGURA 17). Vale destacar que a água destilada pode lixiviar eletrólitos, fazendo com que a dupla camada de íons expanda, reduzindo a permeabilidade (HEINECK, 2002).

Figura 17 - Dupla camada de íons e o seu efeito na condutividade hidráulica.



Fonte: Daniel (1994).

Outro fator importante a se considerar que pode afetar de forma significativa a condutividade hidráulica dos solos são as tensões efetivas. Segundo Daniel (1994 *apud* HEINECK, 2002), solos compressíveis e solos com características como macroporos e muitas discontinuidades (falha, fissuras...) são os mais sensíveis a variações nas tensões efetivas. Incrementos no valor da tensão efetiva irão resultar na diminuição dos poros e no “fechamento” das discontinuidades e conseqüentemente resultará na diminuição da condutividade hidráulica. Deve-se, sempre que possível, realizar os ensaios submetendo as amostras as mesmas tensões efetivas a que serão submetidas em campo.

A compactação é uma técnica que visa melhorar as características mecânicas e hidráulicas do solo partir da diminuição dos vazios. A técnica de compactação associadas a condições de contorno específicas (teor de umidade, energia de compactação, tipo de solo, grau de saturação...) é responsável direta pela condutividade hidráulica do solo. Como foi exposto, a depender do teor de umidade do solo e do esforço de compactação, a estrutura do solo pode variar de um estado mais floculado para um mais disperso, influenciando a permeabilidade. Mitchell et al (1965 *apud* LIKIANTCHUKI, 2007) analisaram ainda o efeito da energia de compactação na condutividade hidráulica dos solos, onde a condutividade foi avaliada para os corpos-de-prova saturado, para diferentes teores de umidade e energias de compactação. Os autores observaram uma redução significativa (em até 100 vezes) na condutividade, com o incremento da energia de compactação, principalmente para pontos próximos do teor de umidade ótima.

A saturação é mais uma a afetar a condutividade hidráulica dos solos, havendo uma diminuição da permeabilidade com a queda da saturação, uma vez que os caminhos disponíveis para água percolar diminuem, pois parte dos poros estarão preenchido por ar. Além desses, muitos outros fatores podem vir a interferir no comportamento hidráulico do solo, como o gradiente hidráulico, temperatura, índice de vazios, entre outros.

## 2.4 Barreiras Impermeabilizantes

As barreiras impermeabilizantes (*liners*) são elementos que visam minimizar a infiltração de água (e outros fluidos) para camadas inferiores, reduzindo o transporte de água ou de poluentes em solos e para aquíferos subterrâneos. Barreiras impermeabilizantes de fundo são elementos usados para controlar a percolação de efluentes para camadas inferiores em projetos de revestimentos de fundo de aterros de resíduos, barragens de rejeito, dentre outros. Segundo Boscov (2008), os projetos contam ainda com camadas de drenagem e transição. Essas três camadas podem ser compostas por diferentes materiais e com diferentes configurações, variando-se desde o material utilizado até suas dimensões, disposições e técnicas empregadas.

Os projetos de revestimentos de fundo são influenciados por fatores diversos como o clima da região, materiais disponíveis, tipos de resíduos, existência ou não de aquíferos, legislação ambiental vigente, além de considerar ainda aspectos econômicos e técnicos. Independente das características do projeto, há requisitos básicos que toda barreira impermeabilizante de fundo deve atender e que segundo Boscov (2008) em ordem de importância deve ser: *baixa condutividade hidráulica, compatibilidade de longo prazo com as substâncias químicas a serem contidas, capacidade alta de adsorção e baixo coeficiente de difusão*.

Os requisitos para os projetos de impermeabilização variam de acordo com as normas técnicas e legislações vigentes em cada país. No Brasil recomenda-se o uso de camadas de impermeabilização com coeficiente de permeabilidade saturado máximo de  $10^{-9}$  m/s. (BOSCOV, 2008).

Para atingir a função impermeabilizante, além dos *liners*, vários sistemas são utilizados, tais como geossintéticos (geomembranas, geocompostos argilosos...), sistemas compostos de solos e geossintéticos, além do uso de materiais alternativos constituídos de resíduos, misturas com solos e/ou aditivos (cimento, cal, etc.).

### 2.4.1 Tipos de Barreiras Argilosas

Daniel (1993) definiu três tipos de *liners*: *liners* naturais de argila (camadas naturais de solos argilosos), *liners* de argila compactada (CCL – *Compacted Clay Liner*) e *liners* com geossintéticos (GCL – *Geosynthetic Clay Liners*) que tratam-se de sistemas compostos de argila com geossintéticos.

#### 2.4.1.1 Argilosas Naturais

As barreiras de solo natural constituem uma das formas menos dispendiosas de *liners*. Trata-se de formações naturais de argila, que por terem baixa condutividade hidráulica ( $10^{-8}$  e  $10^{-9}$  m/s) possuem a principal característica para desempenhar o papel de barreira impermeabilizante de fundo. Segundo Heineck (2002) a efetividade desse tipo de sistema depende da inexistência de imperfeições, tais como fissuras e outras descontinuidades, devendo a camada de solo ser contínua. Para verificar a integridade da camada quanto ao aspecto mencionado são necessários a realização tanto de ensaios “*in situ*” quanto ensaios laboratoriais, o que todavia, não garante uma avaliação completa de toda camada, dada suas dimensões. Além disso, barreiras naturais de argila estão sujeitas a outros fenômenos e interações que podem influenciar seu comportamento como, por exemplo, a manifestação de trincas de secagem devido ao fenômeno de retração e a compatibilidade físico-química com as substâncias químicas a serem contidas, entre outras.

#### 2.4.1.2 Argilas Compactadas

As limitações dos *liners* naturais, aliadas às dificuldades de avaliar sua uniformidade em campo estimulou a procura de materiais alternativos. Uma solução bastante empregada são os *liners* de argila compactada, que consiste basicamente de solo argiloso compactado. O emprego da técnica de compactação melhora diversas características da barreira protetora, em particular a condutividade hidráulica, que diminui consideravelmente com a compactação, além de melhorar a resistência mecânica do material e diminuir a superfície exposta a ação dos agentes químicos presentes nos efluentes líquidos.

Os solos mais comumente empregados são os solos argilosos que apresentam condutividades hidráulicas que podem chegar à ordem de  $10^{-11}$  m/s. A redução na condutividade hidráulica está associada a elementos como estrutura do solo, energia de

compactação, método de compactação, entre outros, que exercem influência direta no comportamento mecânico e hidráulico do solo compactado.

De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1993 *apud* LIKIANCHUKI, 2007), recomenda-se que os solos utilizados como *liners* seja classificados de acordo com o SUCS como CL, CH ou SC, de forma que esse solos devem apresentar ainda condutividade hidráulica inferior a  $10^{-7}$  cm/s, porcentagem de finos maior ou igual a 30 %, limite de liquidez (WL) maior ou igual a 30 %, índice de plasticidade (IP) maior ou igual 15 % e pH maior ou igual a 7.

A tabela 5 traz as principais características que as barreiras argilosas devem possuir segundo a visão de diferentes autores. Ressalta-se que apesar de valores limites apresentados, o parâmetro mais importante é a condutividade hidráulica no que diz respeito a barreiras impermeabilizantes. Likiantchuki (2007) afirmou ainda que a garantia de valores aceitáveis de condutividade hidráulica é condição necessária e suficiente para o bom funcionamento das barreiras argilosas.

Tabela 5 - Principais características de barreiras impermeabilizantes por diferentes autores.

FONTE	LL (%)	IP (%)	FINOS ( $\leq 0,075\text{MM}$ ) (%)	FRAÇÃO ARGILA (%)	$D_{\text{máx}}$ (mm)	FRAÇÃO PEDREGULHO (%)	k (cm/s)
Benson <i>et al.</i>	$\geq 20$	$\geq 7$	$\geq 30$	$\geq 15$	-	-	$\leq 10^{-7}$
Daniel, D.E.	-	$\geq 7$	$\geq 20$	-	25 a 50	$\leq 30$	$\leq 10^{-7}$
Bagchi, A.	$\geq 30$	$\geq 15$	$\geq 50$	$\geq 25$	-	-	$\leq 10^{-7}$
EPA (1989)	-	$\geq 10$	$\geq 20$	-	-	$\leq 10$	$\leq 10^{-7}$
Cetesb (1993)	$\geq 30$	$\geq 15$	$\geq 30$	-	-	-	$\leq 10^{-7}$

Fonte: Likiantchuki (2007).

Apesar das melhores características dos solos argilosos compactados quando comparados às barreiras naturais, problemas como infiltrações indesejadas ainda são relatados, sobretudo em virtude de incompatibilidade do solo com o fluido percolante. Segundo Daniel (1984 *apud* LAESPIGA, 2008) apesar dos resultados satisfatórios dos CCL's, alguns vazamentos foram observados devido ao contato da CCL's com efluentes ácidos, compostos orgânicos e líquidos alcalinos. Esse comportamento, apesar de ser algo previsto e recorrente na literatura, muitas vezes não é contemplado como uma variável para análise na fase de projeto e viabilidade técnica, de forma que na maioria das vezes, os ensaios de condutividade hidráulica realizados em laboratórios são executados com água, ignorando-se os efeitos que outros fluidos percolantes podem exercer sobre a camada de solo.



Resultados mais satisfatórios do emprego de barreiras de solo compactado têm sido obtidos quando a condutividade hidráulica, tanto em campo quanto em laboratório, é medida utilizando fluido similar ao que a barreira será exposta (LAESPIGA, 2008).

Estudos realizados por Fernandez e Quigley (1985), corroboram as afirmações de Daniel (1984), e confirmam a influência do fluido percolante na condutividade hidráulica dos solos, sobretudo em solos argilosos. No trabalho desenvolvido pelos referidos autores, foi avaliada a integridade de barreiras argilosas quando expostas a líquidos diferentes da água. Neste estudo, determinou-se a condutividade hidráulica de solos da Região de Sarnia, (Ontário, Canadá), cujo o teor da fração argilosa era de 57%, e para tanto fizeram percolar diferentes fluidos pelo solo: compostos aromáticos (benzeno, ciclohexano), álcool (metanol) e água. Os resultados obtidos pelos autores comprovam a variação da condutividade hidráulica do solo para os diferentes fluidos, associando essas diferenças às interações elétricas entre a argila e os fluidos. Ressalta-se ainda, como foi exposto no item 2.2.3, que há uma presença muito forte de cargas elétricas nos solos, o que induz diversos fenômenos elétricos nesses, sobretudo nos solos argilosos. Essa característica presente nas argilas influencia diretamente a condutividade hidráulica dos solos, como é observado nas bentonitas sódicas (esmetitas sódicas), cujos fenômenos elétricos contribuem de forma incisiva para a baixa permeabilidade do material.

No referido trabalho, desenvolvido por Fernandez e Quigley (1985), os fluidos utilizados possuem constante dielétricas diferentes, o que segundo os autores exerce influência na condutividade aferida. Segundo eles a condutividade hidráulica medida para fluidos com baixas constantes dielétricas ( $\epsilon$ ) são maiores que a condutividade para fluido com maiores constantes. Para os autores o comportamento hidráulico apresentado pelo material deve-se à variação da dupla camada elétrica (ou dupla camada difusa) nas partículas de argila. A partir dos ensaios observou-se que a espessura da dupla camada difusa na presença do benzeno é de 1nm, enquanto em presença de água é de 100 nm. Com o aumento das distâncias entre as camadas as forças de atração de curto alcance não se manifestam e o sistema dispersa. Segundo Spera *et al.* (2008), o fluido de percolação promove a eluviação (fracionamento em microagregados, deslocamento de materiais como argilas, sesquióxidos, carbonatos) das partículas de argila dispersa, de forma que a matriz sólida do solo muda. Com o rearranjo das partículas, a porosidade do solo passa a ser obstruída pela iluviação (acumulação de materiais do solo dissolvidos ou suspensos) das partículas de argilas, o que faz aumentar a densidade do solo, diminuindo a condutividade hidráulica do mesmo.

Além da compatibilidade entre o fluido percolante e solo, outros problemas são observados em barreiras de solo compactado, como: pequena espessura da camada, trincas de

ressecamento, entre outros. Contudo, tais problemas podem ser contornados com maior rigor e controle tanto na fase de projeto como de execução, de maneira que esse tipo de *liner* ainda é bastante utilizado, sendo uma boa alternativa para barreiras impermeabilizantes de fundo.

Além dos solos argilosos, outros materiais têm sido empregados com sucesso como barreiras compactadas, em especial o emprego de materiais compósitos. Lukiantchuki (2007) avaliou a utilização de solo natural misturado com bentonita para o emprego como barreira impermeabilizante. Neste trabalho, foram realizados ensaios de condutividade hidráulica e resistência à compressão simples em misturas de solo e bentonita nos teores de 3 %, 5 % e 7%. Os resultados obtidos indicaram que para os teores de 5 % e 7 % de bentonita a condutividade hidráulica apresentava valores adequados para a construção de barreiras impermeáveis e que nos ensaios de resistência à compressão simples para as misturas com 5 % de bentonita, também, se obteve resultados satisfatórios para o emprego da referida mistura como camadas impermeabilizantes.

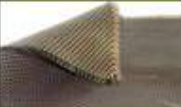


Há ainda trabalhos desenvolvidos com o emprego de materiais alternativos como escórias, fibras, RCD, entre outros, proposta esta também avaliada no presente trabalho, com a substituição parcial do solo por cinzas de carvão mineral.

#### 2.4.1.3 Geossintéticos argilosos (GCL's) e geomembranas

A alternativa que tem se mostrado mais eficiente para aplicação como *liners* têm sido o uso de sistemas compostos. Esses sistemas são constituídos por uma camada de argila compactada, subjacente a uma geomembrana de polietileno de alta densidade (PEAD) e tem suprido a deficiência que cada um dos seus elementos possa apresentar quando empregado de forma isolada. O solo, por exemplo, atenua vazamentos de efluente causados quando há defeitos na geomembranas, inerentes ao seu manuseio e instalação, ou seja, há uma redução da condutividade hidráulica do sistema composto quando comparado a aplicação isolada da geomembrana em virtude da atenuação dos defeitos locais dessa.

Existem atualmente vários sistemas impermeabilizantes com diversas configurações e materiais, que utilizam geotêxtis tecidos, geotêxtis não tecidos, geomembranas de polietileno de alta densidade, geomembranas de polietileno de baixa densidade, geocompostos argilosos (sendo esse o mais usado em *liners* de fundo), além de sistemas compostos elaborados com geossintéticos e materiais alternativos. A escolha do melhor sistema impermeabilizante varia de acordo com o projeto, ou obra. O quadro 2 mostra alguns geossintéticos com suas respectivas funções.

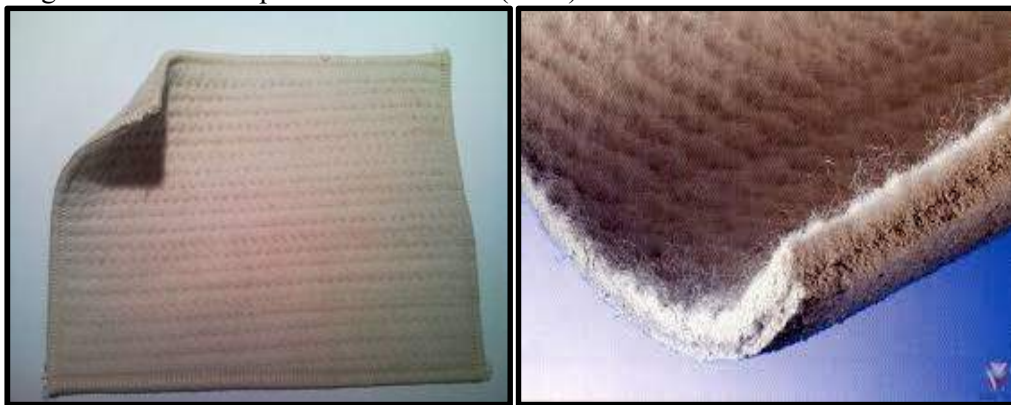
Quadro 2 - Tipos de Geossintéticos e suas principais características.

 <p><b>Geotêxteis</b></p>	<p>São produtos têxteis, bidimensionais, permeáveis, compostos de fibras cortadas, filamentos contínuos, monofilamentos, laminetes ou fios formando estruturas tecidas, não tecidas ou tricotadas, cujas propriedades mecânicas e hidráulicas permitem que desempenhem várias funções em uma obra geotécnica (NBR 12553/2003).</p>
 <p><b>Geomembranas</b></p>	<p>São produtos bidimensionais de baixíssima permeabilidade, compostos predominantemente por materiais termoplásticos, elastoméricos e asfálticos, utilizados para controle de fluxo e separação, nas condições de solicitação (NBR 12553/2003).</p>
 <p><b>Geocompostos</b></p>	<p>São produtos industrializados, formados pela superposição ou associação de um ou mais geossintéticos entre si ou com outros produtos, geralmente concebidos para desempenhar função específica (NBR 12553/2003).</p>

Fonte: GTC-ABINT (2018).

Uma outra opção usada como barreira impermeabilizante são os geocompostos impermeáveis ou bentoníticos (GCL's), que consiste em uma fina camada de bentonita sódica com alto poder de expansão entre dois geotêxteis, unidos por agulhamento ou costura (FIGURA 18). Os GCL's são usados em detrimento dos *liners* de solos compactados em virtude de sua permeabilidade inferior (pode chegar a  $10^{-11}$  m/s), boa resistência química e mecânica e facilidade de instalação.

Figura 18 - Geocompostos bentoníticos (GCL).



Fonte: Inovageo (2018).

Os problemas associados aos GCL's podem ocorrer tanto no geossintético como na bentonita. No que diz respeito aos geotêxteis e geomembranas podem ocorrer os furos, advindos

sobretudo de sua aplicação e manuseio, além da baixa resistência ao cisalhamento na interface (geossintético-bentonita). No que diz respeito à bentonita, merece atenção a baixa resistência ao cisalhamento da bentonita quando hidratada, susceptibilidade às trocas catiônicas e a dessecação com conseqüente aumento da condutividade hidráulica, além de outros. Todavia, o maior controle de qualidade tanto na fabricação como na aplicação dos GCL's tem atenuado esses problemas.

Apesar dos avanços tecnológicos dos sistemas compostos manufaturados, há ainda o frequente uso de barreiras de solo compactado (CCL's), sobretudo por suas correntes prescrições em manuais e normas técnicas como solução satisfatória e eficaz para uso como barreiras impermeabilizantes.

Benson e Edil (2005 *apud* BOSCOV, 2008), a partir de estudos em lisímetros, contendo RSU e revestidos por CCL's e GCL's, avaliaram o desempenho dos dois sistemas de impermeabilização. Os estudos mostraram que ambos os sistemas tiveram desempenhos semelhantes com poucas diferenças entre as duas soluções, com os GCL's mostrando-se um pouco mais eficientes no que diz respeito a interação química e física desses com poluentes inorgânicos. Evidencia-se, portanto, que apesar da maior eficiência e dos constantes avanços tecnológicos dos GCL's, não se deve descartar totalmente o emprego de CCL's, estando a escolha desse ou daquele sistema condicionada a outros fatores, como recursos disponíveis, finalidades de aplicação, particularidades de projeto, compatibilidade físico-química com o efluente a ser contido, entre outros aspectos.

## **2.5 Análises Ambientais**

Nos processos de contaminação de aquíferos subterrâneos e dos solos, o último se interpõe como uma barreira a propagação de plumas de contaminação, de forma que o arranjo dos grãos formando uma estrutura porosa, oferece resistência ao escoamento da massa de contaminantes. O processo de contaminação esta intrinsecamente associado as características e condições de três agentes: o meio ambiente, o poluente e o solo. O primeiro estabelece as condições climáticas, hidro-geológicas, regime de chuvas, entre outros. O segundo influencia o fenômeno através de suas características como, pH, solubilidade, DBO, toxicidade. O último é responsável por condicionantes como porosidade, teor de matéria orgânica, mineralogia, capacidade de troca catiônica, granulometria. Além disso, deve-se ressaltar que afinidades químicas entre os poluentes e o solo influenciam o processo, evidenciando que as interações entre os elementos se tornam condicionantes do processo global de contaminação

Na sociedade contemporânea é muito comum o descarte de resíduos de atividades diversas no meio ambiente. Em contrapartida torna-se cada vez mais comum na engenharia moderna o emprego de resíduos diversos, seja de forma direta ou indireta em alguma obra ou processo produtivo, como alternativa ao simples descarte e como forma de atenuar os impactos nocivos desses resíduos ao meio ambiente. Seja através do descarte ou do emprego consciente desses resíduos, os efluentes por eles gerados são motivos de grandes preocupações, devido suas altas cargas poluidoras e potenciais nocivos, de forma que se torna imprescindível avaliar possíveis contaminantes advindos desses subprodutos.

O descarte de qualquer material no meio ambiente ou mesmo seu emprego deve ser previamente avaliado, analisando os impactos desse nos corpos receptores, como também a técnica utilizada no seu emprego, de forma que o mesmo não potencialize a nocividade do material. Sendo assim são realizados diversos ensaios que visam avaliar o potencial poluidor desses resíduos. No Brasil há um conjunto de normas e resoluções que propõe métodos e critérios para avaliar o potencial poluidor/degradador bem como estipula limites aceitáveis de concentração de substâncias poluentes.

### ***2.5.1 Ensaios Ambientais***

Atualmente são empregadas diversas técnicas com intuito de analisar o potencial poluidor de um determinado material, ou efluente. No Brasil, as Normas NBR 10004/2004, NBR 10005/2004, NBR 10006/2004 e NBR 10007/2004 estabelecem as diretrizes e procedimentos para avaliar o potencial poluidor de determinado material. A norma NBR 10007/2004 estabelece as orientações para amostragem de resíduos sólidos, enquanto as normas NBR 10005/2004 e a NBR 10006/2004 prescreve as metodologias usadas para obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados, respectivamente, de modo a identificar a presença de possíveis constituintes perigosos ou não inertes, realizando-se a classificação do resíduo sólido através da NBR 10004/2004.

As normas que regem os ensaios para obtenção dos extratos lixiviados e solubilizados, para posterior classificação do resíduo como perigoso ou não perigoso e inerte ou não inerte, não abrangem elementos associados a compactação, por exemplo, não retratando com fidelidade as condições reais de campo. A ASTM dispõe da norma D4874 que trata da obtenção do extrato lixiviado através de um equipamento de lixiviação em coluna, contemplando características e elementos mais fiéis as condições de campo como, por exemplo, o efeito da compactação entre outros.

Knop (2003) em seu estudo sobre encapsulamento de solo contaminados por hidrocarbonetos, desenvolveu um equipamento semelhante ao referenciado na ASTM D4874, e comparou os resultados obtidos com os resultados dos ensaios de lixiviação realizado conforme a NBR 10005/2004. Em seu trabalho o autor realiza os ensaios com e sem a adição de agente cimentante às amostras. Os resultados obtidos no ensaio de coluna indicaram uma redução na quantidade de contaminantes quando comparada com a mesma amostra realizado conforme a NBR 10005/2004, mesmo para as amostras sem o agente cimentante, evidenciando que a compactação foi capaz de reter parte dos contaminantes presentes na amostra, diminuindo assim a concentração desses nos lixiviados obtidos.

## **2.6 Fundamentos físicos e químicos das análises laboratoriais**

Esta seção visa explicar de forma sucinta o princípio de alguns ensaios convencionalmente pouco utilizados na engenharia geotécnica. Os ensaios convencionais da geotecnia, tais como compactação, resistência, etc., não serão abordados nesta seção por serem amplamente conhecidos e divulgados. A proposta desta seção é justificar o emprego de alguns ensaios dentro das análises realizadas, de modo a evidenciar a importância de tais análises para a compreensão do comportamento do material.

### **2.6.1 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)**

Como foi visto no item 2.2, sobre as superfícies dos minerais existem cargas elétricas responsáveis por uma série de fenômenos físico-químicos interfaciais. Um desses fenômenos é a adsorção iônica, que é quase que completamente regida pelos minerais de argila e matéria orgânica coloidal, que por processos diversos podem apresentar tanto cargas negativas como cargas positivas. Todo sistema físico busca um equilíbrio e no solo não é diferente. Buscando um equilíbrio eletrônico, as cargas positivas ou negativas presentes na solução buscam neutralizar o balanço de cargas negativas ou positivas da superfície do sólido, e para que isto aconteça ocorrem trocas de íons. Quando ocorre a neutralização de cargas negativas por íons eletropositivos (cátions), chama-se a troca catiônica, quando se neutraliza cargas positivas com íons eletronegativos (ânions) chama-se de troca aniônica. Como no solo predomina principalmente cargas negativa, o processo de troca catiônica ocorre com frequência bem maior do que a troca aniônica

No processo de troca catiônica os íons envolvidos nesse processo podem ligar-se às partículas coloidais por eletrovalência ou por covalência (LOPES e GUILHERME, 2004). Dessa forma os íons adsorvidos sobre a superfície das partículas coloidais podem ser deslocados e substituídos estequiometricamente, por outros íons de mesmo tipo de carga, efetivando-se uma troca iônica.

Segundo Lopes e Guilherme (2004), além das cargas negativas eletrovalentes, há também as cargas negativas de caráter covalentes, que podem ou não ser manifestar, de acordo com o pH do meio. Pode-se ter no solo simultaneamente as cargas negativas eletrovalentes (permanentes) e uma concentração de cargas negativas variáveis (covalente) dependentes do pH, que poderá afetar a CTC do solo. Ou seja, a depender do pH, parte das cargas dependentes poderão estar bloqueadas por  $H^+$  (ligações covalentes). Sendo assim, para um determinado solo sob um certo valor de pH, têm-se um valor de CTC, dado pelas cargas permanentes mais as cargas dependentes do pH, livres do hidrogênio covalente, determinando a CTC efetiva do solo a esse valor de pH. Para o mesmo solo, aumentando-se o pH do sistema, mais íons  $H^+$  são neutralizados pela carga dependente do pH, resultando num aumento da CTC efetiva.

No processo de troca catiônica os cátions mais envolvidos quantitativamente na neutralização das cargas negativas são:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $H^+$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  e  $NH_4^+$ . Dentre esses, tem-se os cátions  $Ca^{2+}$ , mais presentes em alguns solos e o  $Al^{3+}$  em outros, e os cátions  $H^+$  ligados as cargas negativas em meios com pH mais baixos (ácidos fortes).

Ao conjunto das partículas que fazem parte dessa dinâmica (troca de íons), chama-se complexo sortivo, e é com base na determinação do complexo sortivo por metodologias variadas é que se estima a CTC do solo. Assim, a CTC de um solo representa a quantidade total de cátions trocáveis que o solo pode adsorver, sendo função de sua superfície específica e da densidade de cargas elétricas que se manifestam nessa superfície, podendo-se considerar a CTC a expressão das propriedades físico-químicas do solo.

### ***2.6.2 Superfície Específica***

Segundo Teixeira *et al.* (2001) um dos métodos mais empregados para determinação da superfície específica ou área específica baseia-se no processo de adsorção. Conforme Nascimento *et al.* (2014) a adsorção baseia-se em uma operação de transferência de massa, que consiste na capacidade de certos sólidos de reter em sua superfície, determinadas substâncias existentes tanto em fluidos líquidos como gasosos. Dessa forma quanto maior for a superfície externa por unidade de massa sólida exposta a ação do gás, mais favorável será a

adsorção. Por isso esse processo tem sido empregado para determinação da superfície de sólidos com partículas porosas (NASCIMENTO, 2014 *apud* RUTHEVEN, 1984).

No processo de adsorção, o fluido no qual as partículas se concentram sobre a superfície do sólido é denominado de adsorvato ou adsorbato, enquanto o sólido, sobre a superfície do qual se acumula as moléculas e íons são chamados de adsorventes ou adsorbentes

A adsorção pode ser regida por dois processos a adsorção física (fisissorção) ou a adsorção química (quimissorção). A adsorção física ocorre a partir da interação entre o fluido e a superfície do sólido através de forças de atração. As forças de interação podem ser forças de van der Waals ou forças eletrostáticas, de forma que as moléculas do adsorvato encontram-se fracamente ligadas a superfície do adsorvente e os calores de adsorção são baixos.

Segundo Teixeira *et al.* (2001) na adsorção física, também denominada de adsorção de van der Waals, as forças que governam o processo compreendem forças de dispersão, que apresentam efeitos de atração, e forças repulsivas de baixa intensidade. Sendo assim, observa-se que as forças intermoleculares de atração das moléculas do adsorvente e da superfície sólida são mais intensas que as forças atrativas entre as moléculas do próprio adsorvente (CLAUDINO, 2003).

Foust *et al.* (1982 *apud* NASCIMENTO *et al.*, 2014) afirma que a adsorção física é rápida e reversível, sendo decorrente de ligações intermoleculares fracas entre o adsorvente e as moléculas adsorvidas, podendo ser comparada com a condensação de vapor para formação de um líquido, que só é importante a temperaturas abaixo da temperatura crítica do gás. No processo de adsorção física podem formar-se camadas moleculares sobrepostas.

Além da adsorção física há também a adsorção química (ou quimissorção). Esse tipo de adsorção envolve interações químicas entre o fluido adsorvido e o sólido, onde há a transferência de elétrons, equivalente à formação de ligações químicas entre o adsorvato e a superfície do sólido. Segundo Nascimento *et al.* (2014), ao contrário da adsorção física (que é inespecífica), a adsorção química é altamente específica e nem todas as superfícies sólidas possuem sítios ativos capazes de adsorver quimicamente o adsorvato. Ou seja, nem todas as moléculas presentes no fluido podem ser adsorvidas quimicamente, exceto aquelas capazes de se ligar ao sítio ativo. Além do exposto, na adsorção química forma-se uma única camada molecular adsorvida. A tabela 6 apresenta as principais diferenças entre os dois tipos de adsorção.



Tabela 6 - Principais diferenças entre adsorção física e adsorção química.

ADSORÇÃO FÍSICA	ADSORÇÃO QUÍMICA
Causada por forças de van der Waals.	Causada por forças eletrostáticas e ligações covalentes.
Não há transferência de elétrons.	Há transferência de elétrons.
Calor de adsorção = 2 - 6 kcal/mol.	Calor de adsorção = 10 - 200 kcal/mol.
Fenômeno geral para qualquer espécie.	Fenômeno específico e seletivo.
A camada adsorvida pode ser removida por aplicação de vácuo à temperatura de adsorção.	A camada adsorvida só é removida por aplicação de vácuo e aquecimento a temperatura acima da de adsorção.
Formação de multicamadas abaixo da temperatura crítica.	Somente há formação de monocamadas.
Acontece somente abaixo da temperatura crítica.	Acontece também a altas temperaturas.
Lenta ou rápida	Instantânea.
Adsorvente quase não é afetado.	Adsorvente altamente modificado na superfície.

Fonte: Teixeira *et al.* (2001).

Há diversos fatores que influenciam o processo de adsorção, tanto aspectos relacionados ao adsorvente, quanto ao adsorvato, como do meio no qual ocorre o processo. Do adsorvente aspectos como a área superficial, tamanho do poro, densidade, grupos funcionais presentes na superfície são alguns desses fatores. Do adsorvato, características como polaridade, solubilidade, acidez ou basicidade e tamanho das moléculas exercem influência direta sobre o processo de adsorção. Quanto ao ambiente no qual se desenvolve o processo, as condições operacionais principalmente quanto a temperatura, pressão e natureza do solvente são condicionantes direta do processo (COONEY, 1999 *apud* NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Sekar *et al.* (2004, *apud* NASCIMENTO *et al.*, 2014), afirma que sendo a adsorção um fenômeno de superfície, a intensidade do processo é proporcional à área superficial específica, de modo que para partículas maiores, a resistência à difusão é menor e grande parte da superfície interna da partícula não é disponibilizada para adsorção.

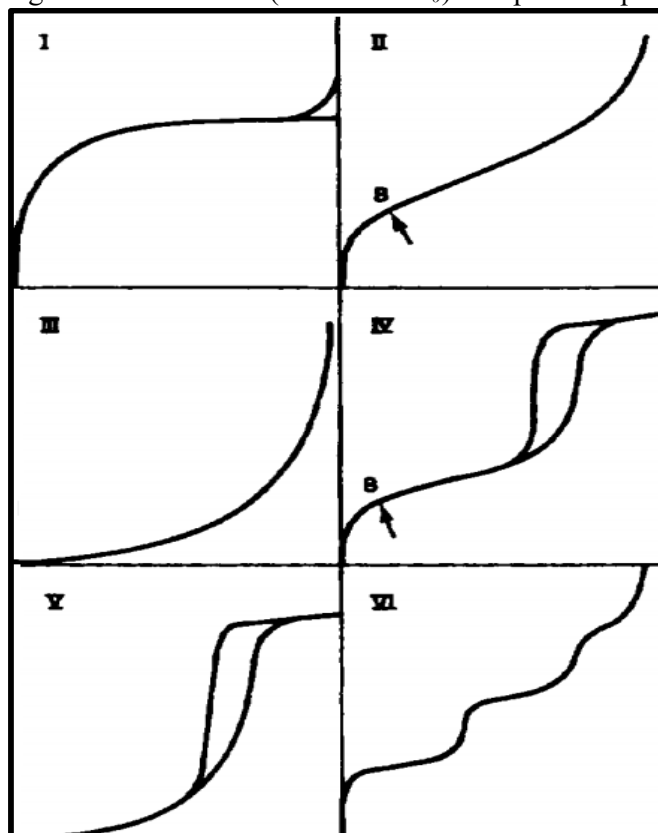
Teixeira *et al.* (2001) afirma que o processo de adsorção pode ser utilizado para obter informações a respeito da área específica e da estrutura porosa de um sólido, e quando utilizado para esse fim, torna-se imprescindível a construção de uma isoterma de adsorção. As isotermas são diagramas que mostra relação entre a quantidade molar de gás (n) adsorvida ou desorvida por um sólido, a uma temperatura constante, em função da pressão do gás. Além disso sua forma pode revelar aspectos importante sobre as características do material. Convencionalmente, expressa-se a quantidade de gás adsorvida pelo seu volume (V<sub>a</sub>) em condições normais de temperatura e pressão (0°C e 760 mmHg). Enquanto que a pressão é

expressa pela pressão relativa  $P/P_0$ , ou seja, a relação entre a pressão de trabalho e a pressão de vapor do gás na temperatura utilizada.

Um dos fatores que mais influenciam o formato da isoterma é a porosidade. Além desse, outros aspectos também exercem influência sobre a forma do diagrama, como a forma das partículas, a existência de aglomerações, a estrutura ou arranjo das partículas, a forma dos poros, entre outros. Muitas equações de isoterma foram propostas, dentre elas pode-se citar as equações de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, Temkin e Dubinin-Radushkevich e a equação de Brauner, Emmett e Teller (BET). As mais utilizadas são as equações de Langmuir e Freundlich, em virtude do fato de preverem a capacidade máxima de adsorção do material (modelo de Langmuir) e capacidade de descrever o comportamento dos dados experimentais (NASCIMENTO *et al.*, 2014). Além dessas, a equação de BET, que leva em consideração outros efeitos no processo de adsorção, também é utilizada, principalmente, para determinação da superfície específica.

Segundo Teixeira *et al.* (2001) as várias formas de isotermas usadas variam de seis tipos principais (FIGURA 19), dos quais cinco foram propostas por Brunauer em 1938.

Figura 19 - Isotermas ( $n$  versus  $P/P_0$ ) do tipo I ao tipo VI.



Fonte: Gregg e Sing (1982).

A isoterma do tipo I pode ser limitada a poucas camadas moleculares, onde os poros excedem um pouco o diâmetro molecular do adsorvente, sendo características de sólidos com microporosidade.

As isotermas do tipo II e IV são os tipos mais encontrados em medidas de adsorção. Comuns em sistema não poroso ou com poros no intervalo de mesoporos ou macroporos. O ponto de inflexão (B) da isoterma corresponde à ocorrência da formação da primeira camada adsorvida que recobre toda a superfície do material. A isoterma do tipo IV nada mais é do que a isoterma do tipo II com o fenômeno de histerese, que será mais pronunciado quanto maior for a dispersão de tamanhos de poro. A ausência de histerese não significa a ausência de porosidade, já que alguns formatos de poro podem levar a processos iguais de adsorção e dessorção (TEIXEIRA *et al.*, 2001). A isoterma do tipo IV indica a presença de microporos associados à mesoporos.

As isotermas do tipo III e V são características de sistemas onde as moléculas do adsorvato apresentam maior interação entre si do que com o sólido. Estão relacionadas a interações muito fracas em sistemas contendo macro e mesoporos, não sendo muito empregada para análise de estruturas porosas. Já a isoterma do tipo VI é característica da adsorção do gás por um sólido não poroso de superfície quase uniforme, não muito comum, sendo particular de alguns materiais específicos.

É notório que a forma da isoterma é reflexo do efeito da estrutura porosa sob o processo de adsorção, de forma que sob essa perspectiva Gregg e Sing (1982) estabeleceu uma classificação dos poros de acordo com o seu diâmetro, apresentada no item 2.2.4.

#### 2.6.2.1 Modelo BET

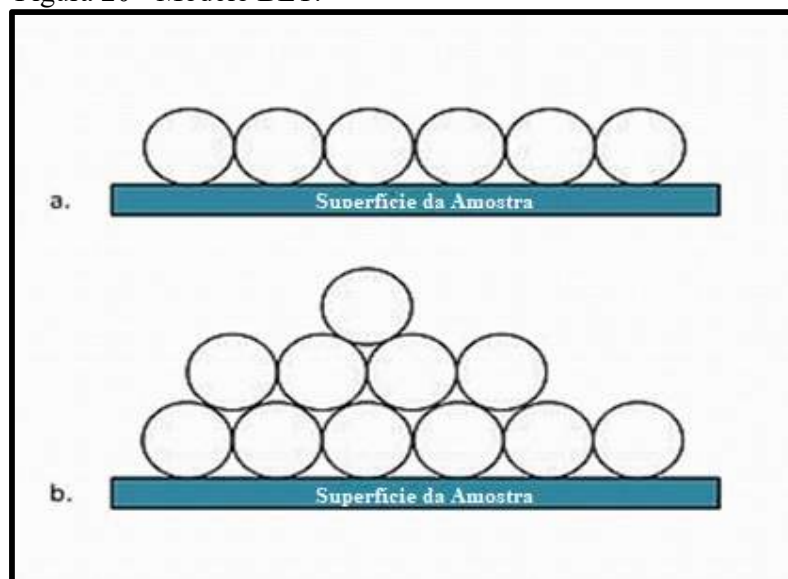
Em 1918, Langmuir, propôs uma teoria para explicar o processo de adsorção, na qual relacionava a quantidade de gás adsorvida com a pressão de equilíbrio do gás. No modelo o fenômeno de adsorção é atribuído a colisão não-elástica entre as moléculas de gás e a superfície do sólido, fato esse que permite a formação da monocamada por um pequeno intervalo de tempo limitada pelo retorno do gás a fase gasosa. Ou seja, as moléculas são adsorvidas pela superfície do adsorvente, de modo que, à medida que as moléculas são adsorvidas, essas vão se distribuindo uniformemente sobre a superfície do sólido formando uma monocamada que recobre toda a superfície, atingindo um equilíbrio dinâmico de adsorção no qual as velocidades de adsorção e dessorção são iguais.

Além da adsorção monomolecular algumas outras hipóteses são consideradas no modelo de Langmuir que considera a superfície energeticamente homogênea e que não existe interação entre as partículas adsorvidas. Com base nessas hipóteses e considerando que a adsorção é função apenas das forças que atuam a pequenas distâncias, a formação de camadas subsequentes é impedida pela primeira camada, que promove a colisão elástica de outras moléculas do gás, que retornam a fase gasosa. Ressalta-se ainda que no modelo matemático de Langmuir considera-se que o número de moléculas que evaporam da superfície do sólido é igual ao número de moléculas que condensam sobre essa superfície (TEXEIRA *et al.*, 2001)

Em 1938, Brunauer, Emmett e Teller, propuseram uma teoria para o fenômeno de adsorção que se baseava nos mesmos princípios da teoria de Langmuir, introduzindo algumas hipóteses, que consideravam a possibilidade de que uma camada tenha a capacidade de produzir sítios de adsorção gerando a deposição de uma camada sobre a outra. A possibilidade da formação de múltiplas camadas já havia sido considerada por Langmuir, todavia a equação para isoterma por ele derivada era muito complexa.

Na equação BET (iniciais dos nomes dos três autores), os autores partem da premissa que as forças responsáveis pela condensação do gás são também responsáveis pela atração de várias moléculas para formação de multicamadas (FIGURA 20). Segundo Teixeira *et al.* (2001) esse fato permite generalizar a equação de Langmuir, considerando que a velocidade de condensação das moléculas da fase gasosa sobre a primeira camada é igual a velocidade de evaporação da segunda camada.

Figura 20 - Modelo BET.



Fonte: Wikipédia (2018).

Desenvolvida com o intuito de relacionar a área específica de um solo com os valores obtidos a partir das isotermas de adsorção, a equação BET leva em consideração algumas hipóteses como: a homogeneidade da superfície do sólido; entalpia de adsorção igual a entalpia de condensação, forças horizontais entre uma molécula e suas moléculas vizinhas desprezadas; e todas as camadas, excetuando-se a primeira, são tratadas de modo equivalente, de modo que o modelo não prevê um processo de declínio do potencial atrativo da superfície. Sob estas premissas e hipóteses, o modelo matemático desenvolvido leva em consideração a formação de multicamadas, todavia a equação não é válida em toda a faixa de valores de pressão, sendo a comportamento linear só obedecido, para a maioria dos sistemas adsorvente/adsorvente, na faixa de valores de pressão relativa entre 0,05 e 0,35.

### ***2.6.3 Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX)***

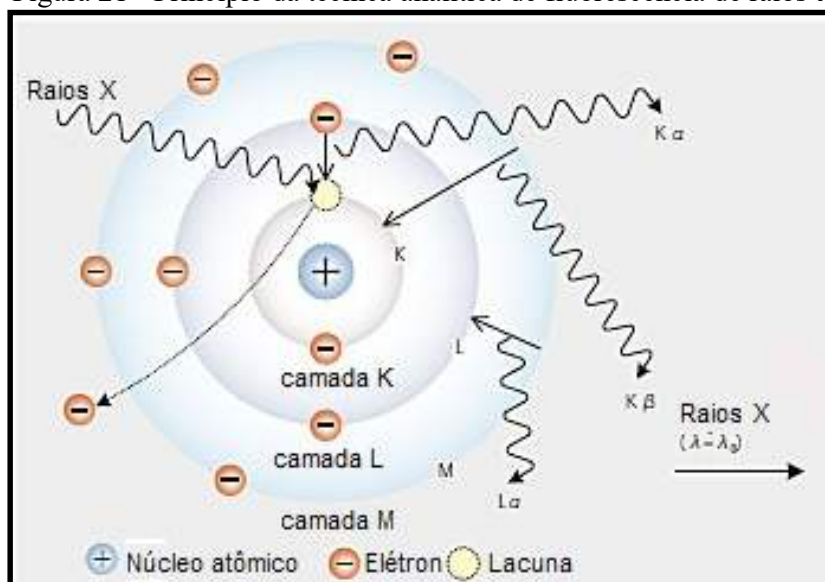
Os raios X são uma forma de radiação eletromagnética, ou seja, ela é uma parte do espectro eletromagnético. Em outras palavras, pode-se dizer que a radiação eletromagnética corresponde a uma faixa espectral que pode ser associada a uma faixa de comprimento de ondas (ou a uma faixa de frequências – relação de dispersão), de modo que os raios X correspondem a um intervalo dessa faixa, assim como a luz, ondas de rádio, raios gama, entre outros. Mas especificamente os raios X formam parte do espectro eletromagnético, com comprimentos de onda que variam da ordem de 10 nm a 0,01 nm. Cabe ressaltar, que tal fenômeno é bem mais complexo. Trata-se na verdade da tradução de componentes ondulatórios (amplitudes ou intensidades) em energia, baseando-se em fenômenos como o efeito fotoelétrico.

Segundo Pereira (2006), esse tipo de radiação (raios X), pode ser originado de dois processos físicos distintos. O primeiro consiste na desaceleração partículas energizadas, como, por exemplo, um feixe de elétrons de alta energia em tubos de raios X (tubos de raios catódicos), onde parte ou toda a energia cinética dos elétrons é convertida em raios X (radiação de “Bremsstrahlung”). A segunda maneira é pela transição de elétrons entre as camadas mais internas dos átomos.

Ainda segundo Pereira (2006), os raios X originados pela transição de elétrons formam um espectro discreto de distribuição de energia e está diretamente associado ao número atômico do elemento (raios X característicos). É baseado nesse conceito, ou seja, os raios X característicos, é que se apoia a técnica analítica de fluorescência de raios X. Ou seja, ao medirmos os raios X característicos, é possível correlacioná-los ao elemento químico que o emitiu.

Para ser mais preciso, pode-se dizer que o processo ocorre da seguinte forma, ao fazermos incidir uma alta energia, como um feixe de radiação, sobre a matéria, excitamos os elementos da amostra, de modo que os elétrons das camadas mais internas dos átomos, são ejetados. Na reorganização eletrônica dos átomos para seu estado fundamental ocorre uma transição eletrônica (elétrons dos níveis mais afastados dão um salto quântico para preencher o espaço deixado pelo elétron ejetado), e isso ocorre com a liberação de energia. Essa energia é emitida na forma de um fóton de raio X e é igual a diferença de energia dos níveis entre os quais ocorreu a transição (FIGURA 21).

Figura 21 - Princípio da técnica analítica de fluorescência de raios-x.



Fonte: Shimadzu (2018).

A energia irradiada (emissão dos raios X característicos ou raios X fluorescentes) é bem definida e característica de cada elemento. A detecção e análise do espectro permite a identificação e quantificação dos elementos constituintes da amostra. Em outras palavras, ao se analisar qualitativamente (identificando os comprimentos de ondas) e medindo a intensidade dos raios X característicos, que é função da concentração dos elementos (análise quantitativa), é possível correlacioná-los com o comprimento de onda específico de cada elemento identificando-os.

A técnica de fluorescência de raios X baseia-se nesse princípio e permite determinar, de maneira qualitativa e semi-quantitativa, os elementos  $[Z \text{ (número atômico)} > 13]$  presentes em uma determinada amostra. Vale destacar que essa é uma técnica não destrutiva, o que elimina na maioria das vezes a necessidade de preparação prévia da amostra.

#### ***2.6.4 Difração de raios-X (DFRX)***

A técnica de difratometria de raios X, é uma das mais avançadas técnicas de caracterização microestrutural e análise química. Utilizada em diversas áreas do conhecimento, como ciência dos materiais, engenharia, química, geologia, entre outras, essa técnica, baseia-se num padrão de difração da radiação, característico de cada estrutura cristalina. Baseado nesse padrão é possível identificar e quantificar substâncias químicas sólidas cristalinas presentes nas amostras analisadas.

A técnica de difração de raios X baseia-se no seguinte princípio: os raios X ao incidirem sobre um material podem ser dispersados elasticamente, sem que haja perda de energia pelos elétrons de um átomo. Após colidirem com os elétrons, os fótons de raios X tem sua trajetória alterada, mantendo, contudo, a mesma fase e energia do fóton incidente. Pode-se dizer, sob o prisma da física ondulatória, que a onda eletromagnética é instantaneamente absorvida pelo elétron e reemitida logo em seguida, ou seja, é como se cada elétron atuasse como um centro de emissão de raios X.

Se as partículas que geram dispersão (dispersão ou espalhamento coerente) estiverem arrançadas de modo sistemático, como em uma estrutura sólida cristalina, é possível observar que as distâncias entre essas partículas são próximas ao comprimento de onda da radiação incidente. Verifica-se, portanto, uma periodicidade entre as relações de fases e o espalhamento e que é possível estabelecer uma relação entre os efeitos da difração dos raios-X sobre um material através de ângulos de difração. Ou seja, de forma sucinta e simplificada, pode-se dizer que é possível, a partir da análise do ângulo e padrão de difração da radiação (singular para cada estrutura cristalina), identificar e quantificar as substâncias químicas sólidas cristalinas, como se cada padrão de difração fosse uma espécie de impressão digital da amostra.

#### ***2.6.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)***

A análise microscópica é realizada através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Esse é um equipamento capaz de produzir imagens de alta resolução, podendo ampliar imagens da superfície de uma amostra em até 300.000 vezes (varia de acordo com o equipamento).

O princípio de funcionamento do MEV, baseia-se na emissão termiônica de feixes de elétrons, a partir de um filamento de tungstênio (cátodo), emissão essa, que ocorre em virtude da aplicação de uma diferença de potencial. Tal variação de voltagem produz também,

variações na aceleração dos elétrons, que são fortemente atraídos por um ânodo (eletrodo positivo), o qual acelera os elétrons em sua direção.

O feixe de elétrons é então, focalizado por uma ou duas lentes condensadoras, que realizam a correção do percurso do mesmo, alinhando-o em direção à abertura da lente objetiva. Essa última, ajusta o foco dos feixes de elétrons antes desses atingirem a superfície da amostra analisada, defletindo o feixe horizontal e verticalmente para que o mesmo varra uma área retangular da amostra.

### **2.6.6 Lixiviação**

Segundo alguns autores a etimologia (origem) da palavra lixo é do latim *lix*, que significa “cinza ou lixívia”, pois antigamente a maioria dos resíduos domésticos eram compostos por restos de carvão e cinzas provenientes do fogão e da lareira. O termo lixiviar é o ato de lavar com lixívia, onde lixívia também é um termo do latim que significa uma espécie de solução com cinzas dissolvidas, ou seja, uma solução alcalina, com o poder de dissolver outras substâncias. Alguns dicionários definem lixiviação como o ato de extrair de substâncias, cinzas ou resíduos, algum sal ou princípios solúveis através da passagem de uma solução (percolação) por um meio poroso.

Segundo a NBR 10005/2004 a lixiviação é um processo, que visa determinar a capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator.

Para KNOP (2003), pode-se definir lixiviação como um processo de percolação de um fluido, geralmente água, em meio a uma camada de solo ou outro material, de maneira que o fluido após percolar por meio a esta camada sólida é denominado lixiviado.

Devido a existência de diversos protocolos de lixiviação, com base nas diversas definições e com vistas ao propósito deste trabalho podemos definir lixiviação como um processo de migração de poluentes para o meio, que se dá pela passagem de um fluido pela camada de solo ou outro material, fazendo com que determinadas substâncias (orgânicas e inorgânicas) sejam dissolvidas ou carreadas da superfície do material. Através desse processo pode-se avaliar o potencial de transferência, a capacidade de liberação (seja por meio de arraste, diluição ou dessorção) de determinados componentes sob condições específicas



### ***2.6.7 Solubilização***

Solubilização é a capacidade que uma substância possui de dissolver-se em um líquido podendo ser expressa em gramas por litro, mols por litro ou em porcentagem de soluto/solvente.

A solubilidade pode definir tanto o fenômeno qualitativo do processo (dissolução), como expressar quantitativamente a concentração das soluções. O pH, a temperatura e as pressões as quais estão submetidos os sistemas, bem como a natureza do soluto e do solvente tem influência direta na solubilidade de uma substância, devendo essas variáveis serem controladas e monitoradas durante o processo de solubilização.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais empregados, bem como os procedimentos realizados no desenvolvimento desta pesquisa. No que diz respeito à abordagem do estudo, mostrou-se necessário a realização de dois tipos de pesquisa, uma *pesquisa bibliográfica* e uma *pesquisa experimental*, de modo a se obter um estudo o mais detalhado possível.

A *pesquisa bibliográfica*, além de auxiliar nas análises realizadas, buscou dar sustentação às análises e conclusões, que se sucederam durante a pesquisa experimental, pois apesar do material em questão ser amplamente estudado, o mesmo possui uma variabilidade muito grande de características e comportamento, advindo da sua origem, formação e processo de obtenção.

A *pesquisa experimental* foi composta por caracterizações físico-químicas (pH, condutividade elétrica, carbono, nitrogênio, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, fluorescência de raios-x, superfície específica, ensaios ambientais – lixiviação e solubilização), mineralógicas (difração de raios-x e MEV), e geotécnicas (densidade real, granulometria, limites de Atterberg, compactação, permeabilidade e resistência ao cisalhamento) das cinzas, do solo e das misturas de cinzas e solo.

Na etapa de caracterização ambiental das cinzas de carvão mineral da *Termoelétrica Energia Pecém*, os ensaios de lixiviação e solubilização foram em parte realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental - Labosan (análise dos ânions) e parte foi realizada no Laboratório Análise de Água – LANASA (análise dos cátions). Parte das análises químicas-ambientais das cinzas foram regidas pela NBR 10005/2004 e pela NBR 10006/2004, através das quais foi possível a classificação do resíduo conforme a NBR 10004/2004. Ainda nesta etapa foram propostas mudanças no processo de obtenção do extrato lixiviado, buscando uma maior fidelidade ao comportamento em campo dos materiais e misturas, onde os materiais encontram-se no estado compactado. A metodologia empregada na obtenção do lixiviado será apresentada no item 3.3.3.6.

#### 3.1 Materiais

Neste item serão apresentados todos os materiais utilizados nesta pesquisa, citando-se alguns aspectos relativos às suas características tátil-visuais e processos de amostragem, coleta e armazenamento.

### 3.1.1 Cinzas

A cinza utilizada neste estudo é originada da queima do carvão mineral na produção de energia elétrica na Usina Termoelétrica (UTE) Porto do Pecém, Geração de Energia S/A. A termoelétrica conta com duas unidades geradoras Pecém I e Pecém II, ambas com capacidade instalada de 360 MW. Essas duas unidades juntas são responsáveis pela geração de toneladas de cinzas anualmente.

O carvão utilizado no processo é oriundo da Colômbia. Após a queima do carvão as cinzas produzidas são destinadas a dois módulos (aterros) localizadas na própria UTE. Um dos aterros (Módulo I) foi construído para uma capacidade inicial de aproximadamente 245 mil m<sup>3</sup> que posteriormente foi ampliado passando a comportar 570 mil m<sup>3</sup> de cinza (Boletim Técnico n° 36 – CIENTEC, 2016). Um segundo aterro (Módulo II) foi construído com capacidade para 250 mil m<sup>3</sup>.

No *Módulo I* (FIGURA 22) foram depositadas cinzas sem nenhum tipo de distinção e separação, ou seja, o material armazenado é composto por cinzas leves, cinzas pesadas e resíduos de dessulfuração. Esse módulo atingiu sua capacidade máxima, estando totalmente preenchido com os resíduos. Há nele também uma piscina de águas residuais, localizada aproximadamente no centro do módulo.

Figura 22 - Módulo I (completamente preenchido).



Fonte: Elias (2015).

O *Módulo II* (FIGURA 23), está parcialmente preenchido e continua recebendo as cinzas da queima do carvão da UTE, todavia, nele estão sendo depositadas exclusivamente cinzas leves tanto da unidade *Pecém I* como da unidade *Pecém II*.

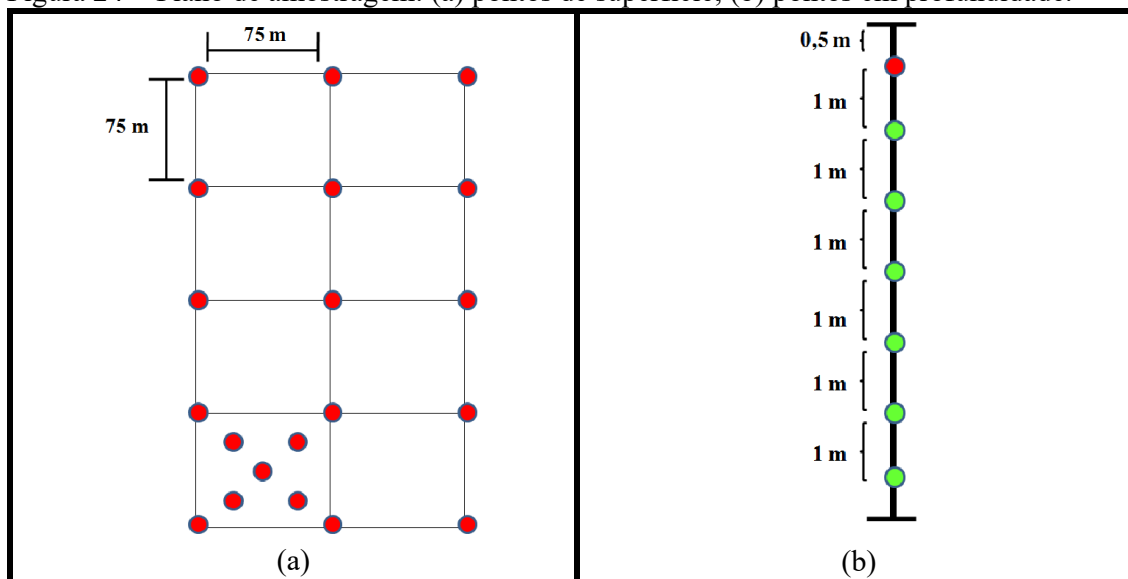
Figura 23 - Módulo II (parcialmente preenchido).



Fonte: Elias (2015).

A coleta do material seguiu um plano de amostragem (FIGURA 24) previamente definido, que buscou cobrir a maior área possível do módulo. Foram realizadas coletas em superfície e profundidade de modo a contemplar o máximo volume de cinza, objetivando-se uma caracterização mais abrangente. Inicialmente, foram estabelecidos 28 pontos de amostragem, dos quais 26 localizavam-se no módulo I e apenas dois no módulo II. Como havia apenas dois pontos de coleta no módulo II, devido à maior uniformidade do material desse módulo, e, sobretudo, devido à maior preocupação e interesse em dar um destino ao material do módulo I, não foi realizado um plano de amostragem específico para o módulo II. Sendo assim, a malha amostral apresentada a seguir foi elaborada especificamente para o módulo I.

Figura 24 - Plano de amostragem: (a) pontos de superfície; (b) pontos em profundidade.



Fonte: Relatório Final de Projeto Energia Pecém (2018).

Para a definição da localização dos pontos de amostragem do *Módulo I*, levou-se em consideração as dimensões do referido módulo, com aproximadamente 300 m de comprimento e 150 m de largura totalizando uma área 45.000 m<sup>2</sup>. Sobre esta área lançou-se a malha amostral, que distribuiu 20 pontos de amostragem sobre sua superfície, de modo a abranger a maior área possível. Foram estabelecidos também a coleta em profundidade no ponto PA-20, para o qual estava prevista a coleta de material em mais 6 pontos. Além disso, foi prevista também, a coleta de duas amostras de cinzas volantes do Módulo II da UTE Porto Pecém.

Vale destacar ainda que da malha lançada sobre a superfície do módulo I alguns pontos tiveram suas localizações alteradas ou por se localizarem sobre a “piscina” de águas servidas, ou por alguma inviabilidade técnica, ou ainda por solicitação do responsável técnico da Energia Pecém. Desse modo a configuração final da localização dos pontos de coleta encontra-se na figura 25.

Figura 25 - Configuração final dos pontos de coleta.



Fonte: Google Earth (2015) – Adaptado por Elias (2018).

Para a coleta das amostras foi inicialmente proposto a coleta via trincheiras e trados manuais, contudo, tais procedimentos não foram viáveis tecnicamente em todos os pontos devido à elevada compactação do material *in situ*, além da existência de aglomerações de cinza formando pedras de mão e matações (dim. 10-60 cm) bastante resistentes. Desse modo a coleta só foi possível com a utilização de uma **Mini escavadeira** (Fab. Case Construcion / **Mod. CX55B**) (FIGURA 26 a) para os pontos de superfície e de uma **Escavadeira Hidráulica** (Fab. Case Construcion / **Mod. CX350B**) (FIGURA 26 b) para os pontos em profundidade, ambas cedidas pela *Fornecedora Rental*, empresa vinculada à UTE Energia Pecém.

Figura 26 - (a) Mini escavadeira (Fab. *Case Construcion* / Mod. *CX55B*); (b) Escavadeira Hidráulica (Fab. *Case Construcion* / Mod. *CX350B*).



(a)

(b)

Fonte: Elias (2015).

Para os pontos de superfície a coleta do material era feita de 0,50 m a 0,75 m de profundidade, descartando-se o material dos primeiros 50 cm. Para os dois pontos onde foram realizadas as coletas de profundidade, o material era retirado a cada 1,00 (um) metro, sendo coletados o material dos 0,25 m imediatamente após cada 1,00 (um) metro medido a partir da superfície até a profundidade de 6,00 m - 6,25 m. Durante as coletas de profundidade do ponto PP-1 não foi possível o recolhimento das amostras até a profundidade prevista, uma vez que, com a proximidade da piscina a partir de 3,00 m de profundidade, começou a infiltrar água na escavação, de modo que a mesma foi interrompida com 5,25 m. Alguns pontos em profundidade o material encontrava-se bastante úmido em virtude da água que infiltrava da piscina para o interior do maciço. A pedido do responsável técnico da empresa Energia Pecém foi realizada outra coleta em profundidade, o ponto PP-2. Nesse atingiu-se a profundidade prevista (6,00 m). Em cada ponto foi coletado cerca de 200 kg que foram ensacados e devidamente identificados. No total foram coletadas 6,0 toneladas de cinza que viriam a ser utilizadas por três linhas de pesquisa.

Para facilitar a identificação dos pontos de amostragem utilizou-se as seguintes regras: os pontos de superfícies foram identificados pela sigla PA e seguidos de uma numeração em ordem crescente. Os pontos de profundidade foram identificados pela sigla PP acrescidos do número 1 (PP-1) e 2 (PP-2) referentes às duas posições de coleta, seguidos da profundidade em que foi coletado material. Foram ainda coletadas duas amostras de cinzas leves (*fly ash*) em dois pontos distintos. Em um ponto coletou-se a cinza oriunda da unidade Pecém 1, sendo esse

ponto e o material nele coletado identificados pela expressão Pecém 1. No segundo ponto coletou-se o material oriundo da unidade Pecém 2, sendo esse ponto e o material nele coletado identificado por Pecém 2. Destaca-se ainda que a Pecém 2 foi a única amostra que não foi submetida a nenhuma análise por esta linha de pesquisa.

No apêndice A encontra-se as tabelas com as coordenadas dos pontos de coleta, a forma como foi feita a coleta em cada ponto e se o material estava seco ou úmido. Todas estas informações e outras adicionais estão disponíveis no Relatório Final do Projeto (2018).

Como será visto adiante, optou-se pela utilização de uma amostra composta, constituída pela mistura de todas as amostras coletadas no módulo I, denominada cinza composta (CC). Realizou-se, também, a pedido da linha de pesquisa 2, a caracterização de uma amostra composta, que reunia as cinzas individuais localizadas no Quadrante-1 (CC-Q1), abrangendo apenas amostra de superfície PA-9 a PA-20, excetuando-se a PA-12. As análises realizadas com essa amostra também serão apresentadas neste trabalho, e foram utilizados como dados para as análises estatísticas realizadas.

### **3.1.2 Solo**

O solo utilizado neste trabalho foi o mesmo utilizado no Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia – ASMOC, em camadas intermediárias e finais de cobertura. O solo utilizado foi escavado diretamente da camada de cobertura do ASMOC, da qual foram desprezados os 10 cm iniciais e coletados os 30 cm seguintes. O material foi retirado dos módulos 12 e 13 como mostra a figura 27. Toda coleta do material foi feita com o aval e apoio da empresa Marquise, responsável pelas operações no aterro.



Figura 27 - Localização dos Módulos do ASMOC e dos pontos de coleta de solo.



Fonte: Barbosa (2015).

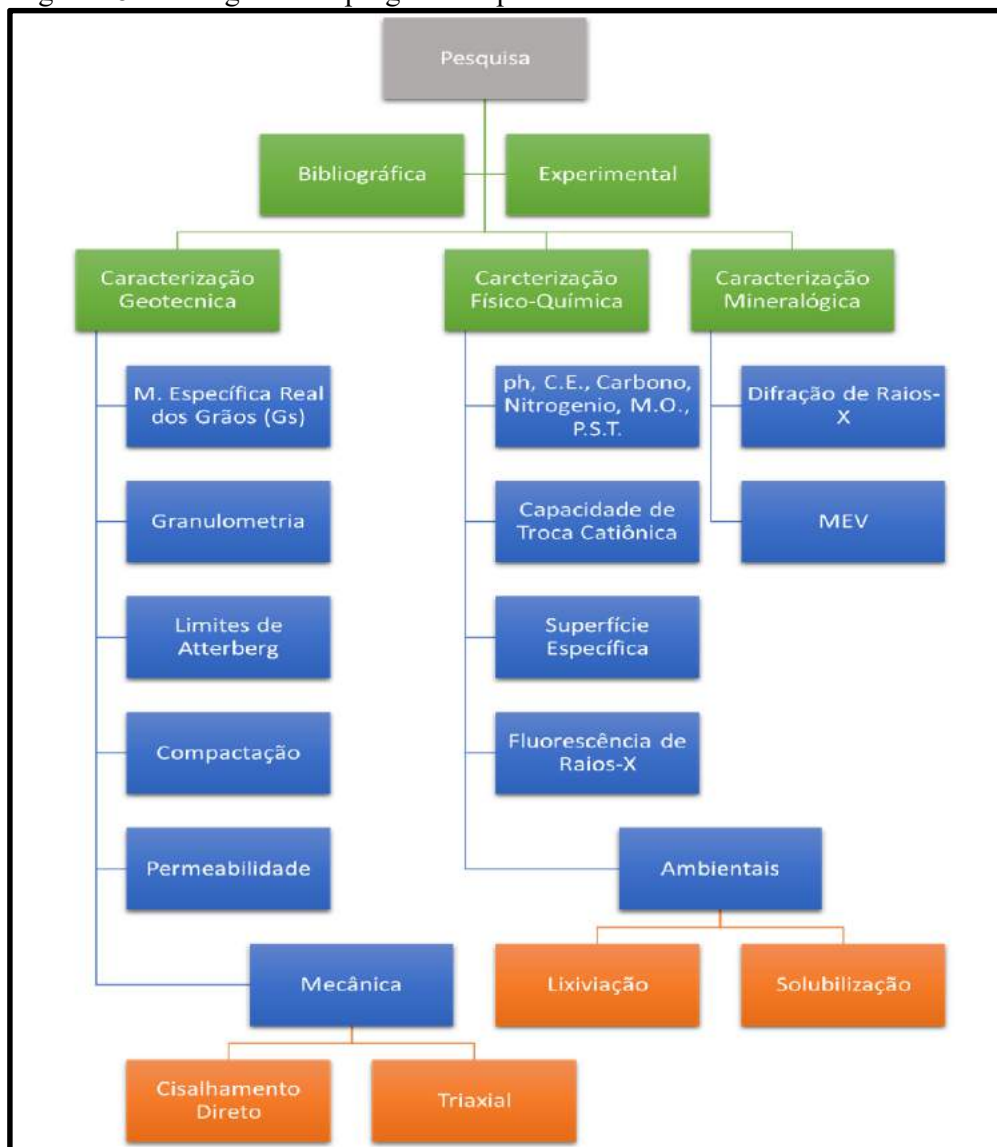
### 3.1.3 Misturas

As misturas utilizadas no presente trabalho foram propostas com base em diversos aspectos como: trabalhos já realizados, quantidade de material a ser utilizado, finalidade de uso das misturas, o tipo de solo com o qual a cinza será misturada, características das cinzas, entre outras. Com base nesses aspectos foram propostas 3 misturas, que buscaram utilizar a maior quantidade possível de resíduos, com vistas à sua aplicação como material de fundo de aterro. As misturas eram constituídas por solo e cinza composta (CC), em diferentes proporções.

### 3.2 Programa Experimental

Com base nos objetivos propostos elaborou-se um programa experimental, que visou estabelecer uma organização e sequência lógica de tarefas, de modo a alcançá-los. Para ilustrar o referido programa tem-se a seguir um fluxograma das atividades que foram realizadas (FIGURA 28).

Figura 28 - Fluxograma do programa experimental.



Fonte: Elias (2018).

Para facilitar a referência aos materiais e às misturas serão utilizadas nomenclaturas específicas para cada uma delas. Para as cinzas coletadas na UTE Porto Pecém, as nomenclaturas serão compostas apenas por suas referências no plano de amostragem. Para o solo coletado no Aterro Sanitário Metropolitano de Caucaia (ASMOC) será utilizada apenas a letra S. Para as misturas fez-se uso da seguinte regra, a inicial do nome de cada material (Solo e Cinza) seguidas da porcentagem em massa do mesmo na composição da mistura. Por exemplo, a mistura de 30% em massa de Solo com 70% em massa de Cinza Composta, será denotado pela simbologia S30C70. Foram realizadas ainda, análises com misturas solo-cinza acrescida do teor de 5% de cal, que serão referenciadas pelas iniciais de cada material mantendo-se

suas respectivas proporções em massa adicionadas da simbologia Ca5 para indicar a adição de 5% em massa de cal. Sendo assim, tem-se por exemplo, a seguinte simbologia S70C30Ca5, ou seja, a mistura S70C30 adicionada de 5% de cal em massa. Vale destacar que dessa forma a mistura S70C30Ca5 manterá a proporção entre a massa de solo e cinza e a ela será acrescida 5% de cal, todavia, nessa mistura com a adição de cal, a porcentagem de solo será de aproximadamente 66,5%, a de cinza 28,5% e a de cal 5%, em relação à massa seca total da mistura. Os materiais utilizados neste trabalho e suas respectivas simbologias estão apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 - Simbologia dos materiais e misturas usadas no presente trabalho.

MATERIAL/MISTURA	% SOLO	% CINZA	SÍMBOLO
Cinza	0	100	C
Solo	100	0	S
Mistura 1	30	70	S30C70
Mistura 2	50	50	S50C50
Mistura 3	70	30	S70C30
Melhor Mistura + 5% Cal	66,5	28,5	S70C30Ca5

Fonte: Elias (2018).

Foram realizados ensaios de caracterização granulométrica com todas as amostras de cinzas coletadas como mostra a tabela 8.

Tabela 8 - Ensaios de caracterização realizados com amostras coletadas de todos os pontos.

AMOSTRA	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO		
	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	GRANULOMETRIA	LIMITES DE ATTERBERG (LL E LP)
PONTOS DE SUPERFÍCIE			
<i>PA (0,50m – 0,75m)</i>	PA-1, PA-2, PA-3; PA-4, PA-5, PA-6, PA-7, PA-8, PA-9, PA-10, PA-11, PA-12, PA-13, PA-14, PA-15, PA-16, P-17, PA-18, PA-19, PA-20, PA-21	PA-1, PA-2, PA-3; PA-4, PA-5, PA-6, PA-7, PA-8, PA-9, PA-10, PA-11, PA-12, PA-13, PA-14, PA-15, PA-16, P-17, PA-18, PA-19, PA-20, PA-21	PA-1, PA-2, PA-3; PA-4, PA-5, PA-6, PA-7, PA-8, PA-9, PA-10, PA-11, PA-12, PA-13, PA-14, PA-15, PA-16, P-17, PA-18, PA-19, PA-20, PA-21
PONTOS DE PROFUNDIDADE			
<i>PP-1</i>	(1,00m-1,25m); (2,00m-2,25m); (3,00m-3,25m); (4,00m-4,25m); (5,00m-5,25m)	(1,00m-1,25m); (2,00m-2,25m); (3,00m-3,25m); (4,00m-4,25m); (5,00m-5,25m)	(1,00m-1,25m); (2,00m-2,25m); (3,00m-3,25m); (4,00m-4,25m); (5,00m-5,25m)
<i>PP-2</i>	(1,00m-1,25m); (2,00m-2,25m); (3,00m-3,25m); (4,00m-4,25m); (5,00m-5,25m); (6,00m-6,25m)	(1,00m-1,25m); (2,00m-2,25m); (3,00m-3,25m); (4,00m-4,25m); (5,00m-5,25m); (6,00m-6,25m)	(1,00m-1,25m); (2,00m-2,25m); (3,00m-3,25m); (4,00m-4,25m); (5,00m-5,25m); (6,00m-6,25m)
CINZAS LEVES (FLY ASH)			
<i>CL</i>	Pecém 1	Pecém 1	Pecém 1

Fonte: Elias (2018)

Todavia, limitações técnicas e operacionais impediram a realização de todos os ensaios previstos com todas as amostras coletadas. Dessa forma, optou-se pela realização dos ensaios em algumas amostras individuais de cinza. As amostras foram selecionadas com base nos resultados dos ensaios de caracterização e nos ensaios ambientais realizados em algumas amostras individuais de cinza. Foram, portanto, estabelecidos alguns critérios que serviram de base para a seleção das amostras com as quais seriam realizados os demais ensaios (compactação, permeabilidade, resistência...).

Buscou-se amostras representativas de cada faixa de porcentagens de finos e que tenham sido classificadas como resíduos classe I, sendo levado em consideração, também, a quantidade de amostra de cada faixa. Com base nos resultados dessas análises foram selecionadas as amostras que seriam submetidas aos demais ensaios (TABELA 9).

Tabela 9 - Amostras selecionadas.

GRUPO	FAIXA (% FINOS)	AMOSTRAS SELECIONADAS
GRUPO 60	60 – 69%	PA-4
GRUPO 70	70 – 79%	PA-17
GRUPO 80	80 – 89%	PA-9; PP-1 (2,00-2,25m) e PP-2 (1,00-1,25m)
GRUPO 90	90 – 99%	PA-7 e PP-1 (5,00-5,25m)

Fonte: Elias (2018).

Como será visto na seção 4, os resultados da análise granulométrica mostraram que todas as amostras analisadas apresentavam um teor de finos (diâmetro inferior a 0,075mm) acima de 60%, sendo as amostras separadas em quatro faixas de porcentagens de finos.

Os resultados das análises ambientais (ensaios de lixiviação e solubilização), realizados pela linha de pesquisa 3, indicaram que 18 % das amostras foram classificadas como resíduos classe I (perigosos e não-inertes) (PA-2; PA-5; PA-7; PA-9; PA-12 e PP-2 (1)), sendo o restante classificado como classe II-A (não perigosos e não-inertes), (Relatório Semestral - Projeto Energia Pecém, 2016).

Outros aspectos também foram levados em consideração para a não realização de ensaios com todas as amostras como: *logísticas de ensaio* (quantidade de amostras), *prazos para apresentação de resultados* e sobretudo, e mais importante, a representatividade e homogeneidade das amostras selecionadas. No decorrer dos ensaios, apesar da identificação de padrões de características e comportamento, houve uma grande variabilidade de alguns parâmetros, tais como teor de umidade ótima ( $w_{ot}$ ), massa específica aparente seca máxima ( $\rho_{m\acute{a}x}$ ) e ângulo de atrito ( $\phi$ ), o que levou à necessidade de se trabalhar com amostra de cinzas compostas.

A tabela 10 apresenta os ensaios que foram realizados, bem como a metodologia empregada (norma utilizada), além da quantidade de amostra utilizada por ensaio e o pré-tratamento a que a amostra deve ser submetida, quando houver.

Tabela 10 - Resumo dos ensaios, método, quantidade de amostra (por ensaio) e pré-tratamento das amostras.

ENSAIO	MÉTODO	QUANTIDADE DE AMOSTRA	PRÉ-TRATAMENTO
<b>ENSAIOS GEOTÉCNICOS</b>			
Densidade Real dos Grãos	DNER 093/94	10 g	Amostra representativa passada na 10 #
Granulometria	NBR 7181/16	1,5 kg	Amostra representativa da porção preparada, por exemplo, solo, seca ao ar, homogeneizada e quarteadada
Limites de Atterberg (LL e LP)	NBR 6459/16 e 7180/16	500 g	Amostra representativa passada na 40 #
Compactação	NBR 7182/16	3,0 kg (por ensaio)	Amostra representativa passada na 10 #
Permeabilidade	NBR 14545/00	1,0 a 3,0 kg (por ensaio)	Amostra representativa passada na 10 # e compactada
Cisalhamento Direto	ASTM D3080/11	100 a 150 g (por corpo-de-prova)	Amostra representativa passada na 10 # e compactada
Triaxial	ASTM D7181	200 a 250 g (por corpo-de-prova)	Amostra representativa passada na 10 # e compactada
<b>ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E ANÁLISES DE MATERIA ORGÂNICA</b>			
pH e CE	Embrapa	80 g	Amostra representativa passada na 10 #
Complexo Sortivo (S, CTC-T)	Embrapa	100 g	Amostra representativa passada na 10 #
Análises de Matéria Orgânica (C, N, MO)	Embrapa	20 g	Amostra representativa passada na 10 #
Superfície Específica	BET	10 g	Amostra representativa passada na 80 #
Fluorescência de Raios-X	*Não há Norma	10 g	Amostra representativa passada na 300 #
Lixiviação	NBR 10005/04	100g	Amostra representativa passada na 80 #
Solubilização	NBR 10006/04	100g	Amostra representativa passada na 80 #
Ambiental	Adaptação	3000g	Amostra representativa passada na 10 #
<b>ENSAIOS MINERALÓGICOS</b>			
Difração de Raios-X	Não há norma	10g	Amostra representativa separada granulometricamente. Escolha da fração para a análise e cominuição
MEV	Não há norma	Pastilhas de 5,00 cm de diâmetro e 2,00 cm de altura.	Amostra compactada, moldada e seca em estufa a peso constante no caso dos solos. Cinza seca em estufa.

Fonte: Elias (2018).

C - Carbono (Orgânico); CE - Condutividade Elétrica; CTC-T - Capacidade de Troca Catiônica (CTC) Total (T); MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura; MO – Matéria Orgânica; N – Nitrogênio (Total); S - Soma de Bases Trocáveis.

As tabelas 11 e 12 apresentam os ensaios a que foram submetidas cada amostra analisada, considerando-se as amostras individuais de cinza, a amostra de cinza leve, a amostra de cinza composta, o solo e as misturas.

Tabela 11 - Resumo dos ensaios realizados com as cinzas individuais selecionadas.

ENSAIOS	AMOSTRA								
	PA-2	PA-4	PA-9	PA-17	PP-1 (2)	PP-1 (5)	PP-2 (1)	Pecém I	C. Composta
ENSAIOS GEOTÉCNICOS									
Densidade Real dos Grãos	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Granulometria	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Limites de Atterberg	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Compactação	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Permeabilidade	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cisalhamento Direto	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Triaxial									x
ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E ANÁLISES DE MATERIA ORGÂNICA									
pH e CE				x				x	x
Complexo Sortivo (S, CTC-T)				x				x	x
Análises de Matéria Orgânica (C, N, MO)				x				x	x
Superfície Específica				x	x			x	x
Fluorescência de Raios-X				x				x	x
Lixiviação	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Solubilização	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ambiental (Adaptado)			x		x	x			x
ENSAIOS MINERALÓGICOS									
Difração de Raios-X	x	x	x	x	x	x	x	x	x
MEV				x				x	x

Fonte: Elias (2018).

C - Carbono (Orgânico); CE - Condutividade Elétrica; CTC-T - Capacidade de Troca Catiônica (CTC) Total (T); MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura; MO - Matéria Orgânica; N - Nitrogênio (Total); S - Soma de Bases Trocáveis.

Tabela 12 - Resumo dos ensaios realizados com solo e as misturas.

ENSAIOS	SOLO	MISTURAS			
	ASMOC	S30C70	S50C50	S70C30	S70C30Ca5
ENSAIOS GEOTÉCNICOS					
Densidade Real dos Grãos	x	x	x	x	x
Granulometria	x	x	x	x	x
Limites de Atterberg	x	x	x	x	x
Compactação	x	x	x	x	x
Permeabilidade	x	x	x	x	x
Cisalhamento Direto	x	x	x	x	x
Triaxial				x	x
ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E ANÁLISES DE MATERIA ORGÂNICA					
pH e CE					x
Complexo Sortivo (S, CTC-T)					x
Análises de Matéria Orgânica (C, N, MO)					x
Superfície Específica					
Fluorescência de Raios-X				x	
Lixiviação	x	x	x	x	x
Solubilização	x	x	x	x	x
Ambiental (Adaptado)	x			x	x
ENSAIOS MINERALÓGICOS					
Difração de Raios-X	x	x	x	x	x
MEV	x			x	x

Fonte: Elias (2018).

C - Carbono (Orgânico); CE - Condutividade Elétrica; CTC-T - Capacidade de Troca Catiônica (CTC) Total (T); MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura; MO - Matéria Orgânica; N - Nitrogênio (Total); S - Soma de Bases Trocáveis.

No presente trabalho, os diversos ensaios foram realizados apenas em laboratórios da Universidade Federal do Ceará, no campus do Pici em Fortaleza. Todas as análises realizadas tiveram a participação do LMSP (Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação), quando

não pela realização direta, através de preparações prévias das amostras, adaptações em metodologias ou tratamento de dados, além de apoio e acompanhamento. Os trabalhos e ensaios desenvolvidos contaram com importantes colaboradores, sem os quais o desenvolvimento deste trabalho não seria possível. Visando apresentar onde cada ensaio foi feito e destacando a importância de cada colaborador, elaborou-se a tabela 13, que apresenta o ensaio, onde o mesmo foi realizado e os operadores e técnicos responsáveis pelas análises.

Tabela 13 - Resumo dos ensaios realizados por laboratório e departamento (Continua).

ENSAIO	LABORATÓRIO	DEPARTAMENTO	OPERADOR / TÉCNICO
<b>ENSAIOS GEOTÉCNICOS</b>			
<b>Densidade Real dos Grãos</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>Granulometria</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>Limites de Atterberg (LL e LP)</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>Compactação</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>Permeabilidade</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>Cisalhamento Direto</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>Triaxial</b>	LMS	DEHA	Elias (Autor) e Equipe técnica do LMS (Anselmo O. C. e Roberto Antônio C. S.)
<b>ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E ANÁLISE DE MATERIA ORGÂNICA</b>			
<b>pH, CE</b>	Laboratório de Solos/Água e LMS	DSC - CCA	Técnico Antônio José
<b>Complexo Sortivo (S, CTC-T)</b>	Laboratório de Solos/Água e LMS	DSC - CCA	Técnico Antônio José
<b>Análises de Matéria Orgânica (C, N, MO)</b>	Laboratório de Solos/Água e LMS	DSC - CCA	Técnico Antônio José
<b>Superfície Específica</b>	DQAFQ e LMS	Departamento de Química	Prof. Dra. Regina
<b>Fluorescência de Raios-X</b>	Laboratório de Microscopia Eletrônica e LMS	Departamento de Geologia	Técnico Msc. Joel
<b>Lixiviação</b>	LABOSAN, LANASA e LMS	DEHA (LABOSAN e LMS) e Departamento de Química (LANASA)	Técnico <i>Ricardo Bruno P. de Lima</i> (LABOSAN), Técnica Doutoranda <i>Mayza de Morais França</i> (LANASA), <i>Deyvid S. Elias</i> (Autor) (LMS).
<b>Solubilização</b>	LABOSAN, LANASA e LMS	DEHA (LABOSAN e LMS) e Departamento de Química (LANASA)	Técnico <i>Ricardo Bruno P. de Lima</i> (LABOSAN), Técnica Doutoranda <i>Mayza de Morais França</i> (LANASA), <i>Deyvid S. Elias</i> (Autor) (LMS).

Tabela 13 - Resumo dos ensaios realizados por laboratório e departamento (Conclusão).

ENSAIO	LABORATÓRIO	DEPARTAMENTO	OPERADOR / TÉCNICO
ENSAIOS FÍSICO-QUÍMICOS E ANÁLISE DE MATERIA ORGÂNICA			
<b>Ambiental</b>	LABOSAN, LANASA e LMSP	DEHA (LABOSAN e LMSP) e Departamento de Química (LANASA)	Técnico <i>Ricardo Bruno P. de Lima</i> (LABOSAN), Técnica Doutoranda <i>Mayza de Moraes França</i> (LANASA), <i>Deyvid S. Elias</i> (Autor) (LMSP).
ENSAIOS MINERALÓGICOS			
<b>Difração de Raios-X</b>	Laboratório de Raios-X e LMSP*	Departamento de Física	Equipe Técnica
<b>MEV</b>	Laboratório de Microscopia Eletrônica e LMSP*	Departamento de Geologia	Técnico Msc. Joel

Fonte: Elaborada pelo autor.

CCA - Centro de Ciências Agrárias; DCS - Departamento de Ciências do Solo; DEHA - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental; LANASA - Laboratório Análise de Águas; LMSP - Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação; LABOSAN – Laboratório de Saneamento Ambiental.

### 3.3 Métodos e Procedimentos de Ensaios

Nesta seção serão apresentadas as metodologias e procedimentos empregados para a realização dos ensaios e demais atividades relativas ao presente estudo. Destaca-se que para realização dos ensaios aqui descritos optou-se sempre por seguir procedimentos e metodologias regidas preferencialmente por normas nacionais elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), entre outras, ou por normas internacionais elaboradas por instituições como ASTM e a ASTHO. Na ausência de normas técnicas orientou-se por procedimentos realizados por laboratórios e empresas de renome como EMBRAPA, ou por metodologias, que apesar de não possuírem normas técnicas, são amplamente difundidas no meio acadêmico. Será descrito também neste item em que circunstâncias ocorreram o emprego dos softwares utilizados no presente trabalho.

#### 3.3.1 Preparação das amostras

A importância da preparação da amostra vai muito além da prescrição técnica. Um resultado preciso é indispensável para compreensão de comportamentos atuais e previsão de comportamentos futuros, e tal precisão perpassa diretamente pela correta amostragem e preparação das amostras.

É comum na geotecnia a realização de ensaios com amostras indeformadas para retratar com maior fidelidade possível o comportamento do material estudado, uma vez que a



amostra indeformada traz informações do estado e do histórico de tensões, composição e estrutura do solo, fenômenos geológicos, entre outros. Além disso, como são muitas as variáveis que influenciam o comportamento do solo em campo, e devido à dificuldade de reproduzir de forma idêntica essas condições, a realização de ensaios com amostras deformadas exigem o mesmo cuidado e controle que os ensaios com amostras indeformadas.

Sob essa perspectiva destaca-se a importância da correta preparação das amostras para a realização dos ensaios. As cinzas são materiais que, apesar dos muitos estudos desenvolvidos, têm um comportamento não tão previsível e necessitam ainda de alguns estudos mais aprofundados. Apesar de ser possível identificar padrões de comportamento e características, esses materiais possuem amplas faixas de variação para determinados parâmetros, devendo-se ter bastante atenção com a etapa de preparação das amostras. Dessa forma, os procedimentos realizados no presente estudo buscaram seguir as prescrições previstas para as preparações de amostras de acordo com cada norma. Na ausência de normas específicas para determinados ensaios buscou-se seguir as orientações já existentes na bibliografia.

Na tabela 10 apresentou-se de forma sucinta alguns pré-tratamentos realizados, que são indispensáveis para realização de cada análise. Nas seções referentes a cada ensaio serão detalhadas as preparações previstas para os mesmos. Todavia, torna-se importante destacar as principais preparações de amostras realizadas.

Para os ensaios de caracterização geotécnica e compactação foram seguidos o processo de preparação de amostras previstos pela NBR 6457/2016 (Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização). Os ensaios de permeabilidade, cisalhamento direto e triaxial seguiram a preparação previstas em suas normas específicas, bem como os ensaios de lixiviação e solubilização. Algumas análises físico-químicas do solo seguiram o que preconiza o manual da EMBRAPA, outras seguiram orientações encontradas na bibliografia e no âmbito acadêmico. Alguns ensaios como a DFRX, a MEV e a FRX seguiram também as recomendações dos fabricantes dos equipamentos das análises.

É importante ressaltar que apesar das diferentes preparações de amostras exigidas por cada ensaio, alguns procedimentos iniciais foram impostos a todas as amostras como: secagem ao ar, destorroamento, secagem prévia em estufa a 60°, moagem, homogeneização, identificação e armazenamento, dentre os quais a moagem merece especial atenção.

Todas as amostras de cinzas, exceto a amostra de cinzas leves, foram submetidas a britagem (ou moagem), devido ao estado da maior parte das amostras. Um volume considerável do material encontrava-se aglomerado, formando-se torrões, pedras-de-mão e matações,

extremamente resistentes, que não era possível o destorroamento através da mão de gral. Dessa forma optou-se por empregar um britador (FIGURA 29). Esse procedimento deve ser levado em consideração nas interpretações e análises que serão realizadas nas etapas seguintes, como a granulometria por exemplo.

Figura 29 - Britador empregado no processo de cominuição das cinzas.



Fonte: Elias (2018).

### ***3.3.2 Caracterização Geotécnica***

Na etapa de caracterização geotécnica foram realizados os ensaios para identificar as propriedades índices dos materiais (cinza e solo) e das misturas propostas e os ensaios que visam investigar o comportamento hidráulico e mecânico dos materiais e misturas, com vistas as suas possíveis aplicações

#### ***3.3.2.1 Determinação dos teores de umidade***

No presente trabalho não houve a determinação dos teores de umidade buscando identificar condições de campo. As cinzas não estavam empregadas em nenhuma espécie de obra de engenharia, na qual as mesmas tivessem que possuir determinadas características ou estivessem associadas a algum tipo de função ou empregabilidade. Essas estavam sendo apenas armazenadas e alocadas num determinado espaço, sendo submetidas apenas a compactação

(sem nenhum controle tecnológico), com o único intuito de armazenamento do material. É importante destacar que muitas das amostras de profundidade acabaram sendo umedecidas durante as escavações próximas à “piscina” de águas servidas existentes no “pátio” de cinzas. Além disso as amostras dos materiais (cinza e solo) e das misturas foram submetidos a secagem prévia (a diferentes temperaturas, de acordo com o ensaio) antes da realização de quaisquer análises.

Alguns ensaios, como por exemplo o ensaio de compactação, demandam a medição do teor de umidade das amostras. Nesses casos as umidades foram aferidas como preconiza o anexo da norma NBR 6457/2016.

### *3.3.2.2 Massa específica real dos grãos*

A massa específica real dos grãos é determinada numericamente pela relação entre a massa de solo seco (peso das partículas do solo) e volume ocupado pelas partículas, ou seja, excluindo-se os vazios. A determinação desse índice além de ser importante para outros ensaios como o ensaio de sedimentação, auxilia na determinação de outros importantes índices como, o índice de vazios. Para cinza, esse ensaio ganha particular importância devido a elevada porosidade desse material, além de estar relacionada à mineralogia do mesmo.

No Brasil há duas metodologias bastante empregadas para a realização desse ensaio, uma regida pela norma da ABNT NBR 6458/16 e outra pela norma do DNIT ME-093/94. No presente trabalho foi utilizada a norma do DNIT, e a NBR 6457/16 no que diz respeito a preparação da amostra.

### *3.3.2.3 Análise granulométrica*

A análise granulométrica tem por objetivo a determinação das dimensões das partículas do solo e as proporções relativas em que elas se encontram. Essa pode ser realizada através apenas do peneiramento, ou do peneiramento juntamente com o emprego da técnica de sedimentação. O modo como será realizado o ensaio está relacionado à presença de fração grossa e/ou fração fina de material presente na amostra. Contudo, como foi mencionado anteriormente as amostras de cinza foram submetidas a moagem, de modo que a amostra passou integralmente na peneira com abertura de malha de 2,00 mm (nº 10), fato esse que deve ser levado em consideração nas ilações a respeito da granulometria do material. Neste trabalho foi realizado o ensaio de granulometria conjunta, ou seja, através do peneiramento e da

sedimentação. As análises realizadas foram regidas pelo método preconizado na NBR 7181/16, sendo as amostras preparadas conforme NBR 6457/16.

#### *3.3.2.4 Limites de Atterberg (LL e LP)*

Os limites de consistência dos solos, também conhecidos como Limites de Atterberg, trazem informações a respeito da consistência do solo com relação ao teor de umidade. Tais limites são determinados empiricamente e têm especial importância para solos finos, uma vez que é possível correlacioná-los com uma série de propriedades, características e comportamento dos solos. A partir dos limites de consistência pode-se inferir a respeito da atividade de solos finos, estrutura, superfície específica, tipo de argilomineral, além de estar relacionada também com condutividade hidráulica, resistência a penetração, a técnica de compactação, expansão e retração dos solos, entre outros, auxiliando na execução de diversas obras de engenharia. Dessa forma, para muitos solos, a granulometria por si só não é suficiente para uma boa caracterização, sendo imprescindível a determinação dos limites de consistência. Para cinza, em particular, devido às suas características, esses ensaios tornam-se importantes para compreensão de seu comportamento.

No presente trabalho, os ensaios realizados seguiram os procedimentos técnicos estabelecidos na NBR 6459/16 Determinação do Limite de Liquidez e na NBR 7180/16 Determinação do Limite de Plasticidade, além da preparação prévia das amostras segundo a NBR 6457/16.

#### *3.3.2.5 Ensaio de compactação*

Os ensaios de compactação permitem a determinação do teor de umidade ótima e da massa específica aparente seca máxima. Tais parâmetros servirão para execução da compactação em campo, além de serem empregados para moldagem dos corpos de prova para os ensaios de permeabilidade a carga variável, cisalhamento direto e ensaios triaxiais.

Esse ensaio foi realizado tanto para as amostras de cinza selecionadas, como para o solo e as misturas de solo e cinza e solo, cinza e cal. A energia escolhida para realização dos ensaios foi a energia Proctor Normal e devido suas características granulométricas fez-se uso do cilindro metálico pequeno (cilindro de Proctor) e soquete pequeno. Todo o procedimento foi realizado segundo a norma NBR 7182/16, além da preparação prévia da amostra conforme o estabelecido na NBR 6457/16.

### 3.3.2.6 Ensaio de permeabilidade a carga variável

Devido as características de todos os materiais ensaiados (cinza, solo e misturas), que possuem porcentagem superior a 10% em massa de material passante na peneira n° 200 (abertura de malha de 0,074 mm) e cujos coeficientes de permeabilidade são inferiores a  $10^{-3}$  cm/s, os ensaios realizados no presente estudo foram realizados conforme o *método B* da NBR 14545/00 (Solo – Coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável). Nesse ensaio foi utilizado um permeâmetro de parede rígida e o ensaio foi realizado sem aplicação de pressão, em amostras deformadas compactadas. A compactação se deu em energia Proctor Normal no teor de umidade ótimo, obtido anteriormente pelo o ensaio de compactação.

Destaca-se ainda que toda água utilizada no ensaio de permeabilidade, tanto na preparação da amostra, como na saturação do corpo-de-prova, e como fluido percolante no ensaio propriamente dito, foi água destilada. A escolha por esta água foi devido à necessidade de coleta de efluente para as análises ambientais. Dessa forma, com o intuito de avaliar possíveis interações entre o fluido percolante e a amostra, que pudessem de alguma forma influenciar a condutividade hidráulica do material, inicialmente foram ensaiadas três amostras com água de torneira (água do abastecimento público), os resultados foram comparados com os ensaios realizados com água destilada. Como não houve variações significativas entre os valores aferidos, deu-se prosseguimento aos ensaios com água destilada.

### 3.3.2.7 Resistência - Cisalhamento Direto

Quando se fala em resistência e ruptura em solos, geralmente refere-se a resistência ao cisalhamento e ruptura por cisalhamento, uma vez que as deformações em um maciço de terra devem-se aos deslocamentos relativos entre as partículas do maciço.

É comum na geotecnia e em obras em gerais a preocupação em saber se o solo é capaz de resistir aos esforços a que está sendo solicitado, se ele é capaz de suportar o carregamento a ele imposto. A resistência do solo deve-se sobretudo a duas parcelas: o *atrito* e a *coesão*, que podem ser avaliadas quantitativamente por dois parâmetros: o *ângulo de atrito* ( $\phi$ ) e o *intercepto coesivo* ( $c$ ). Nos ensaios de resistência realizados em laboratório, busca-se justamente determinar esses dois parâmetros, e um desses ensaios é o ensaio de cisalhamento direto.

O ensaio, de forma bem sucinta, consiste basicamente em: uma amostra, que pode ser indeformada ou deformada (compactada nas condições de densidade e umidade especificadas) é colocada numa caixa metálica bipartida, em um arranjo no qual o corpo-de-prova (cp) moldado está entre pedras porosas e placas com ranhuras e perfuradas, ficando no meio entre a parte inferior e superior da caixa. Em seguida a célula bipartida já com o cp, é colocada em um carrinho transportador que, quando em movimento, a parte inferior da caixa fica fixa, enquanto a parte superior tem o movimento livre. Esse carrinho desliza sobre esferas em um trilho, permitindo o movimento longitudinal. Uma carga vertical, através de pesos, é então aplicada à amostra e mantida constante. Em seguida aplica-se uma força horizontal crescente até a ruptura do corpo-de-prova. O ensaio é então repetido para três ou mais corpos de prova idênticos, utilizando diferentes valores de carga vertical.

Não existe norma brasileira para esse ensaio, contudo, existem diversas metodologias amplamente difundidas no meio acadêmico, além de normas internacionais. Para os ensaios realizados no presente estudo seguiu-se as orientações técnicas previstas na norma da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D3080-11 (*Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*). No ensaio a amostra é adensada (consolidada) e é permitida a drenagem. O material utilizado na moldagem do cp passou integralmente na peneira com abertura de malha de 2,00 mm (n° 10). A amostra foi compactada no teor de umidade ótimo. Foram realizados três ensaios para três cargas distintas (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) por amostra como velocidade de cisalhamento de 0,3063 mm/min. Todos os ensaios foram realizados no LMSP na UFC.

### 3.3.2.8 Resistência – Ensaio de Compressão Triaxial

Assim como o ensaio de cisalhamento direto o ensaio de compressão triaxial orientou-se por norma da ASTM, especificamente a D7181/2011, que versa sobre o ensaio de compressão triaxial do tipo CD (Consolidado Drenado). Os ensaios triaxiais foram realizados para ratificar os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para a amostra de cinzas compostas, motivo pelo qual optou-se pelo ensaio Consolidado e Drenado (CD).

Simplificadamente, o ensaio se inicia com a moldagem dos corpos-de-prova cilíndricos, que foram compactados no teor de umidade ótima e com o peso específico seco máximo. O corpo de prova é então envolto por uma membrana (impermeável) de borracha, realizando em seguida a montagem da célula (FIGURA 30). Em seguida enche a célula de água, aplicando a pressão confinante do ensaio. Procede-se as etapas de saturação e adensamento.

Como o ensaio foi do tipo CD, após a aplicação da pressão confinante, aguardou-se que a poropressão fosse dissipada (fase de adensamento). Vale destacar que a fase de adensamento foi feita em estágios aplicando gradualmente as cargas até o estágio final de adensamento. A carga de ruptura é mesma carga do último estágio de adensamento. Durante o ensaio, permitiu-se a drenagem da água da amostra por meio de pedras porosas colocadas no topo e na base do corpo de prova. Deve-se ressaltar que durante a execução do ensaio, para permitir a drenagem e a dissipação das poropressões, a compressão triaxial é feita lentamente. O ensaio foi realizado para as mesmas três cargas do ensaio de cisalhamento direto (50 kPa, 100 kPa e 200 kPa) e com a mesma velocidade de cisalhamento de 0,3063 mm/min.

Figura 30 - Célula do Triaxial.



Fonte: Elias (2018)

### ***3.3.3 Caracterização físico-química***

As análises químicas do solo são realizadas mais frequentemente pelas ciências agrárias, que analisam, por exemplo, o efeito da Capacidade de Troca de Cátions e Ânions para avaliar a fertilidade do solo, a capacidade de absorção de nutrientes, sendo tais análises dotadas de metodologia própria com vistas aos seus propósitos.

As análises físico-químicas do ponto de vista da geotecnia ainda são pouco exploradas. Não há metodologia específica dessas análises que contemplem as especificidades da engenharia geotécnica, de maneira a tratar o solo segundo seu propósito de aplicação. Contudo, a maior complexidade das obras e dos processos tecnológicos em geral, além dos impactos que esses podem causar no meio-ambiente, vem fazendo com que análises desse tipo ganhem força, em especial no tocante à pesquisa tecnológica. Desse modo já existem diversos trabalhos visando adaptar ensaios físico-químicos que levem em consideração as particularidades atreladas ao uso do solo.

As análises químicas podem explicar, por exemplo, como a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) influencia fenômenos como a expansão de argilas bentoníticas, ou como o emprego das Zeólitas podem ajudar a tratar solos contaminados ou servir de barreiras reativas. Desse modo, o presente trabalho, propõe-se a analisar quimicamente as cinzas, não apenas no intuito de avaliar aspectos ambientais mais também de compreender melhor o comportamento desse material e suas interações com o solo.

As metodologias utilizadas em algumas análises são voltadas a propósitos específicos de uso do solo, que diverge do material de estudo (cinzas de carvão mineral) por se tratar de um resíduo. É necessário que tais ressalvas sejam feitas, pois tais análises podem não retratar com fidelidade as reais características e comportamento das cinzas, objeto de estudo desta pesquisa. No entanto, essas serão empregadas, não para retratar fielmente as características desse material, mas para servirem como indicativos, indícios, que apontem o melhor caminho para estudá-las e compreender melhor seu comportamento.

Destaca-se ainda que as análises do Capacidade de Troca Catiônica (CTC), e as análises de matéria orgânica foram realizadas apenas com as cinzas (uma amostra de superfície, uma amostra de profundidade, uma amostra de cinza composta e uma amostra de cinza leve). A escolha dessas amostras foi feita, por julgá-las representativas para todas as amostras de cinza coletadas, além da necessidade de respeitar recursos orçamentários e o planejamento.

As análises de superfície específica seguiram os mesmos critérios quanto à escolha das cinzas, e por se ter menos informações a respeito desse material, sobretudo quando comparado ao solo. Além disso cabe ressaltar que tais ensaios foram realizados em parceria com outros laboratórios e devido a demanda dos mesmos, acabou-se restringindo a quantidade de amostras a serem analisadas

As análises de lixiviação e solubilização e o procedimento adaptado de obtenção de extrato percolado, realizados pelo LMSP, LABOSAN e o LANASA, foram realizados, sobretudo para analisar a cinza composta e a mistura S70C30, uma vez que as análises e



classificação das amostras individuais de cinzas foram realizadas pela linha de pesquisa 3 (Relatório Final – Projeto Energia Pecém, 2018). Como propôs-se uma metodologia alternativa para análises ambientais, algumas amostras individuais de cinzas foram selecionadas aleatoriamente, com o intuito de validar a metodologia proposta.

### 3.3.3.1 pH e C.E.

O pH (potencial Hidrogênio) trata-se de um índice, um parâmetro, que indica o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade da solução. Ele consiste na determinação da concentração de íons de hidrogênio ( $H^+$ ), de modo que quanto menor o pH de uma substância, maior a concentração de íons  $H^+$  e menor a concentração de íons  $OH^-$ . O pH pode variar devido a fatores como a temperatura e composição das substâncias e pode influenciar processos diversos como a solubilização, por exemplo.

A determinação do pH das amostras foi realizada conforme Manual de Análises de Solo da EMBRAPA, que descreve todos os materiais e equipamentos utilizados, bem como a preparação reagentes e soluções, além de realizar observações. Vale destacar que determinações de pH, também foram realizadas nos ensaios de lixiviação e solubilização seguido a mesma metodologia empregada nas análises realizadas no Laboratório de Solos/Águas, fazendo-se uso do aparelho pHmetro (medidor de pH), constituído basicamente por um eletrodo e um potenciômetro. O potenciômetro é utilizado na calibração do aparelho com soluções de referência. A medida do pH é feita com a imersão do eletrodo na solução a ser analisada. Ou seja, a medição do potencial hidrogeniônico é realizado por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo-líquido (água, KCl), na proporção 1:2,5.

De forma sucinta, o procedimento consistiu em pesar 10 g cinza e adicionar em copo plástico de 100 ml. Em seguida adiciona-se 25 ml de água destilada (ou 25 ml de solução salina de KCl 1 mol.L<sup>-1</sup> ou CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol.L<sup>-1</sup>). Depois deve-se agitar a amostra com bastão de vidro individual por cerca de 60 segundos e deixar em repouso por 1 hora. Após o repouso, agitar ligeiramente cada amostra com bastão de vidro ou de teflon, mergulhar os eletrodos na suspensão homogeneizada e proceder a leitura do pH.

A Condutividade elétrica da solução foi medida de forma direta fazendo-se uso do condutímetro digital de leitura direta. Foi utilizada solução com a mesma quantidade de cinza e água da determinação do pH. Em seguida, mede-se a temperatura da solução ajustando o aparelho para essa temperatura. Liga-se então o condutímetro com certa antecedência e afere-se sua leitura com solução de KCl 0,01 mol.L<sup>-1</sup> (condutividade de 1,4 mS.cm<sup>-1</sup>). Depois lava-

se a célula de condutividade com água duas a três vezes. Seca-se e insere a célula na solução realizando-se a leitura direta da condutividade, em  $\text{mS cm}^{-1}$ .

Assim como na determinação do pH, a Condutividade Elétrica das amostras foi realizada conforme Manual de Análises de Solo da EMBRAPA. Medidas de Condutividade Elétrica, também, foram realizadas nos ensaios de lixiviação e solubilização seguido a mesma metodologia empregada nas análises realizadas no Laboratório de Solos/Águas fazendo uso do aparelho condutivímetro digital de leitura direta.

### 3.3.3.2 Complexo Sortivo (*S*, *CTC-T*, *PST*)

Complexo sortivo é o conjunto de partículas carregadas eletricamente (íons) presentes nos solos. Os íons quando carregados negativamente são chamados de ânions e quando carregados positivamente são chamados de cátions. As frações argilosas apresentando cargas elétricas em desequilíbrio, pode resultar em um excesso de cargas negativas ou positivas, conferindo ao solo a capacidade de reter partículas eletricamente carregadas (íons). Esse fenômeno é conhecido como troca ou adsorção iônica, chamado de catiônica quando favorece a troca de cátions ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , etc.) e aniônica quando favorece a troca de ânions ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , etc.). A Capacidade de Troca Catiônica é explicada mais detalhadamente no item 2.2.3.

Para determinar a CTC do solo é necessário primeiramente determinar a Soma de Bases Trocáveis (*S*) dada pelo somatório dos teores das bases cálcio, magnésio, potássio e sódio, em  $\text{cmolc.kg}^{-1}$ . Segundo o manual da EMBRAPA os demais cátions podem ser desprezados para o cálculo.

$$S = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+ \quad (3)$$

Onde:

*S*: soma de bases trocáveis, em  $\text{cmolc.kg}^{-1}$ .

$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ : teor de cálcio, magnésio, sódio e potássio trocáveis no solo, respectivamente, em  $\text{cmolc.kg}^{-1}$ .

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) efetiva, corresponde à CTC determinada ao pH natural do solo, e segundo o manual da EMBRAPA pode ser estimada somando-se as quantidades trocáveis dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ .

$$CTC_{\text{efetiva}} = S + \text{Al}^{3+} \quad (4)$$

Onde:

**CTC<sub>efetiva</sub>**: Capacidade de Troca de Cátions efetiva, em cmolc.kg<sup>-1</sup>;

**S**: Soma de Bases Trocáveis, em cmolc.kg<sup>-1</sup>;

**Al<sup>3+</sup>**: Concentração de Alumínio trocável no solo, em cmolc.kg<sup>-1</sup>

O Valor **T** é o total de cargas negativas que o solo pode adsorver, e é determinado pela soma entre o valor **S** e a acidez potencial (**H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>**).

$$T = S + (H^+ + Al^{3+}) \quad (5)$$

Onde:

**T**: Capacidade de troca de cátions total, em cmolc.kg<sup>-1</sup>;

**S**: soma de bases trocáveis, em cmolc.kg<sup>-1</sup>;

**(H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>)**: acidez potencial do solo, em cmolc.kg<sup>-1</sup>.

A metodologia empregada para medir as concentrações de cátions trocáveis e acidez potencial dos solos constam nos capítulos 3 e 4 respectivamente, da parte II, da 3ª edição do Manual de Análise dos Solos da EMBRAPA (2017). No capítulo 6, da parte II, do mesmo manual estão expressos os cálculos de **S**, **CTC<sub>efetiva</sub>** e **CTC<sub>Total</sub> (T)**. O valor **V** (percentagem de saturação por base), bem como a percentagem de saturação por alumínio (**m**) e a percentagem de saturação por sódio, também são apresentadas no referido manual e encontra-se no laudo fornecido pelo Laboratório de Solos/Água. Contudo, não serão apresentados, pois num primeiro momento fogem às análises realizadas.

### 3.3.3.3 Análises de Matéria Orgânica (C, N, M.O.)

A presença de matéria orgânica tem interferência direta no comportamento mecânico e hidráulico dos solos. A matéria orgânica presente no solo pode exercer influência direta ou indireta nos mesmos. Segundo Braida et. al. (2006) a influência direta atua principalmente sobre os processos físico-químicos, como por exemplo, a capacidade de troca catiônica do material, ou na elevada superfície específica. Já influência indireta incide sobre o comportamento físico do solo com efeitos na consistência, na agregação, e conseqüentemente, na distribuição dos poros.

Não diferentemente, o teor e matéria orgânica presente na cinza pode condicionar seu comportamento, tornando-se necessário avaliar o teor de matéria orgânica presente tanto no solo como nas cinzas antes de utilizá-los.

Segundo Fontana e Campos (2017), no solo, o carbono pode ser encontrado principalmente como componente mineral, em estruturas de carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , etc.) ou em estruturas orgânicas, oriundo de resíduos de animais e plantas em diversas fases de transformação. Ou ainda como carvão (carbono pirogênico) proveniente de eventos naturais de incêndios ou aplicado ao solo como biocarvão. Para determinação do carbono orgânico ( $\text{C}_{\text{org}}$ ) empregou-se a metodologia prevista Manual de Análises do Solo da EMBRAPA (2017).

Outro elemento importante para análise de matéria orgânica é o nitrogênio (N). A presença de N nos solos está intrinsecamente associada aos componentes da matéria orgânica, de modo que, assim como o carbono, também foi determinada a quantidade de N presente nas amostras. A metodologia seguida encontra-se no capítulo 2, parte III, do manual da EMBRAPA.

Para a determinação do teor de matéria orgânica seguiu-se a metodologia empregada no capítulo 5, parte III, do manual da EMBRAPA (2017). Nesse procedimento a amostra é submetida ao processo de combustão com aquecimento programado e perda de massa pela incineração em mufla, regido pelo Anexo B (Métodos de análises de solos adotados pela Embrapa Solos) do SiBCS. O teor de matéria orgânica é quantificado pela diferença entre a massa do solo seco em estufa e a massa do resíduo obtido após a incineração em mufla.

O procedimento consiste basicamente em incinerar a amostra. Pesa-se 5,00 g da amostra macerado e peneirado a 80 mesh. Em seguida coloca-se a amostra em um cadinho de porcelana e leva a estufa a 65 °C por 24 horas. Depois retira-se o material da estufa e o deixa no dessecador até esfriar. Pesar e anotar a massa do solo seco no cadinho de porcelana. Leva-se, então, a amostra seca no cadinho de porcelana para a mufla, regula-se a temperatura a 600 °C e deixa-o na mufla por 6 horas. Após feito isso retirar o cadinho de porcelana e deixar em dessecador até esfriar. Então pesa-se o resíduo (amostra incinerada) no cadinho de porcelana frio.

O cálculo do teor de matéria orgânica e dado por:

$$MOS = [(M_s - M_r) / M_s] \times 1000 \quad (6)$$

Onde:

**MOS**: concentração de matéria orgânica do solo, em  $\text{g.kg}^{-1}$ .

**M<sub>s</sub>**: massa do solo seco em estufa a 65 °C, em g.

**M<sub>r</sub>**: massa do resíduo após mufla a 600 °C, em g.

### 3.3.3.4 Superfície Específica e Porosidade

A análise da superfície específica e da porosidade (volume do poro, tamanho e distribuição de tamanho de poros) das cinzas baseou-se nos princípios da adsorção física, a partir da determinação da isotermas de adsorção-dessorção.

No processo de adsorção determina-se a área específica do sólido a partir da determinação da quantidade de adsorvato necessária para recobrir com uma monocamada a superfície de um adsorvente

De forma simplificada, a metodologia experimental consiste em três etapas: preparação da amostra, adsorção, dessorção. A etapa de preparação de amostra consiste na eliminação da superfície dos sólidos de impurezas, tais como gases que estejam adsorvidos, umidade excessiva, materiais voláteis, entre outros. Para tanto submete-se a amostra a vácuo por um determinado período e a uma dada temperatura.

A etapa de adsorção, consiste basicamente em expor o sólido a um gás em um sistema fechado a temperatura constante. Nesta fase em um recipiente contendo a amostra é colocada uma determinada quantidade de gás, mantendo-os confinados a uma temperatura constante. Conforme a adsorção se processa, a pressão do sistema diminui até que o equilíbrio seja restabelecido, ou seja, até o ponto onde a quantidade de gás adsorvido e a pressão assumam um valor constante. Repete-se o processo aumentando-se a quantidade de gás até que seja atingida a condensação. A terceira etapa é a fase de dessorção que trata-se do processo inverso da adsorção. Nesta fase, os pontos onde ocorrem o equilíbrio da quantidade de gás adsorvida e da pressão, nem sempre são coincidentes aos pontos de equilíbrio da fase de adsorção, levando à formação de uma histerese. Essa histerese deve-se a diferenças entre os mecanismos de condensação e evaporação, sendo sua forma determinada principalmente pela geometria dos poros (Teixeira *et al.*, 2001)

No presente trabalho foi utilizado para análise o equipamento Autosorb-1 Quantachrome. Iniciou-se a análise pela degaseificação do material, submetendo a amostra a uma temperatura de 200 °C por um período de 24 horas. Na etapa de adsorção foi empregado o método BET, sendo utilizado como adsorbato o gás N<sub>2</sub>, mantendo o sistema fechado a uma temperatura de 77 K. Em seguida realiza-se o processo de dessorção (processo inverso da adsorção). Determina-se a cada pressão a quantidade de N<sub>2</sub> adsorvido e desorvido, quantificando-se o volume de N<sub>2</sub> necessário para recobrir a superfície do adsorvente (cinza-carbono). Com os dados obtidos e fazendo-se uso da equação BET determina-se superfície

específica do sólido. Ainda com base no processo de adsorção determina-se volume de poros e distribuição de tamanhos de poros através do método BJH., citado no item 2.6.2.

### *3.3.3.5 Fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDX)*

Com o intuito de caracterizar quimicamente os materiais de estudo (cinzas e solo), torna-se necessário, primeiramente, analisar a composição química desses, tanto de elementos como de óxidos. Para isto, usou-se a técnica de “Espectrometria de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDX)”, cujo princípio foi explicado na seção 2.6.3.

As análises das amostras de cinzas e solo, através de um detector de Energia Dispersiva de Raio X (EDX ou EDS), foram realizadas juntamente com as análises de MEV no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Geologia da UFC.

O ensaio se dá basicamente por se fazer incidir um feixe de elétrons sobre o mineral presente na amostra, os elétrons mais externos dos átomos e íons que o constitui são excitados migrando para níveis energéticos superiores. Devido à instabilidade desse estado, os elétrons tendem a regressar ao estado fundamental (de energia mais baixa), e nesse regresso liberam a energia em excesso emitindo um fóton de X. A energia liberada é igual a diferença de energia de ligação de níveis entre os quais ocorreu a transição. Essa energia irradiada, em comprimento de onda no espectro de raios-x é característica de cada elemento. O detector instalado na câmara de vácuo do MEV, mede a energia associada a esse elétron, determinando assim os elementos químicos presentes no local de incidência do feixe, podendo assim identificar que mineral está sendo observado. Esse é um acessório, cujo o funcionamento baseia-se no princípio de Fluorescência por EDX, explicados no item 2.6.3.

Para realização desse ensaio se fez uso de um Espectrômetro de Raio-X, modelo ZSXMini II, marca Rigaku (FIGURA 31) para quantificação de elementos do Flúor ao Urânio. As referidas amostras estavam em pó e foram utilizadas cerca de 10g de cada material para realização das análises

Figura 31 - Espectrômetro de Raios-X.



Fonte: <http://goo.gl/upXfCc>.

### 3.3.3.6 Ensaio de lixiviação

Parte dos ensaios de lixiviação realizados neste trabalho seguiram o procedimento normatizado pela NBR 10005/2004. De maneira sucinta esse ensaio se dá por meio de lavagem “ou percolação”, de água (mili-q) através da matriz sólida, obtendo-se assim um extrato lixiviado, que será analisado para determinar a concentração de algumas substâncias previstas na norma NBR 10004/2004, afim de avaliar o potencial poluidor do sólido analisado.

No presente trabalho as cinzas e misturas foram submetidas a tal procedimento, visando diferenciar os resíduos e classificá-los como: resíduo classe I (perigoso) ou resíduo classe II (não perigoso). As concentrações das substâncias dissolvidas e carreadas presentes no extrato lixiviado foram comparadas com o limite máximo permitido dessas concentrações, constantes em listagem em anexo da norma NBR 10004/2004, cujo impacto sobre a saúde e ao meio ambiente são conhecidos.

O ensaio se inicia com alguns procedimentos preliminares de preparação das amostras. Como trata-se de amostra sólida a norma estabelece que o material passante em peneira de malha de 9,5mm já pode ser submetido a etapa de extração. Em seguida realiza-se a escolha da solução extratora, para tanto são colocados 5g da amostra (moída e peneirada) em um béquer de vidro e adiciona-se 96,5 ml de água mili-q, sendo a solução agitada vigorosamente por 5 min em agitador magnético e em seguida mede-se o pH da amostra. Se o  $\text{pH} \leq 5,0$  utiliza-se a solução extratora nº 1 especificada no item 4.2.6 da norma, caso o  $\text{pH} > 5,0$  adicionar 3,5 ml de HCl 1 N, homogeneizar a solução, cobrir com vidro de relógio, aquecer a 50°C durante 10 min. Espera-se esfriar a solução e medir o pH. Se o pH for  $\leq 5,0$  utilizar a

solução de extração nº 1 e se for  $> 5,0$  a solução de extração nº 2, também especificada na norma. Escolhida a solução extratora pesa-se  $(100 \pm 0,1)$  g de amostra preparada. Transfere-se a amostra para o frasco de lixiviação e utiliza-se uma quantidade de solução de extração, nº 1 ou nº 2, de acordo com o que foi determinado, igual 20 vezes a massa utilizada. Fecha-se o frasco, de forma que não haja vazamentos e o mantenha sob agitação durante  $(18 \pm 2)$  h à temperatura de até  $25^{\circ}\text{C}$  com uma rotação de  $(30 \pm 2)$  rpm no agitador rotatório especificado no item 4.1.1 da norma. Após esse período, filtrar a amostra. O filtrado obtido é denominado extrato lixiviado, do qual deve-se medir o pH, sendo as alíquotas obtidas, submetidas as análises. A depender do equipamento utilizado para as análises, restrições adicionais podem ser feitas.

No presente estudo foi utilizado para análise dos ânions o cromatógrafo iônico Dionex ICS-1100 da Thermo Fischer Scientific, que possui como restrição a condutividade elétrica de  $300 \mu\text{S}$ , sendo necessário diluir a amostra quando a CE for superior a esse valor. As análises dos cátions foram realizadas, no Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian AA240FS (FIGURA 32), que apresentou restrição quanto à presença de partículas sólidas no extrato lixiviado para evitar entupimentos no tubo capilar do equipamento, devendo a alíquota utilizada para o ensaio ser filtrada. No presente estudo foi utilizada membrana filtrante de  $45 \mu\text{m}$ . Destaca-se que neste trabalho considerou-se os resíduos contendo um teor de sólidos igual a 100%, seguindo, portanto, o procedimento prescrito no item 5.2 da referida norma.

Há também uma preparação para amostras em que são realizadas a extração de voláteis, procedimento esse não realizado no presente estudo.

Figura 32 - Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian AA240FS.



Fonte: Elias (2018).



### 3.3.3.7 *Ensaio de solubilização*

O ensaio de solubilização, assim como o ensaio de lixiviação, também é normatizado. A norma que o regulamenta é a NBR 10006/2004. Esta norma descreve o procedimento para obtenção do extrato solubilizado, buscando identificar as substâncias constituintes do resíduo ensaiado e as respectivas concentrações desse no extrato solubilizado.

De maneira semelhante ao que se procedeu no ensaio de lixiviação, no ensaio de solubilização, também, se comparou os resultados obtidos (a concentração das substâncias, oriundas do resíduo, presentes nos extratos solubilizados), com os requisitos mínimos pré-estabelecidos no Anexo G da NBR 10004/2004. Uma vez identificadas e comparadas as concentrações, a NBR 10004/2004, diferencia os resíduos e classifica-os como: resíduo classe II A (não inerte) e classe II B (inerte).

A NBR 10006/2004 prevê, entre outros procedimentos, a secagem da amostra até a temperatura de 42°C, além da utilização de material passante na peneira de malha 9,5mm. Assim como no ensaio de lixiviação a amostra passou por preparação prévia no LMSP, que consistiu em secar previamente a 42°C, triturar e peneirar a amostra. Em seguida pesa-se 250g da amostra assim preparada e a coloca em um frasco de 1500 ml. Adiciona-se 1000 ml de água mili-q ao frasco com a amostra, que deve ser agita em baixa velocidade por 5min. Como as amostras utilizadas neste trabalho não foram previamente secas, adicionou-se água ao frasco com 250g da amostra até completar 1000 ml, conforme prevê a norma, dando-se prosseguimento com a agitação a baixa velocidade por 5 min. Cobre-se então o frasco com filme de PVC deixando-o em repouso por 7 dias, em temperatura até 25°C. Após esse período deve-se filtrar a solução com aparelho de filtração guarnecido com membrana filtrante com 0,45 µm de porosidade. O filtrado assim obtido é denominado extrato solubilizado. Determina-se o pH após a obtenção do extrato solubilizado e retira-se a alíquota para as análises, que no presente trabalho foram realizadas nos mesmos equipamentos descritos no ensaio de lixiviação, respeitando suas respectivas restrições.

### 3.3.3.8 *Ensaio Ambiental (Adaptado) – Metodologia para obtenção de extrato percolado*

A proposta do presente trabalho é propor uma alternativa de ensaio, no qual a obtenção do fluido lixiviado represente mais fielmente a situação em campo, ou seja, leve em consideração sobretudo as características do solo compactado. A metodologia apresentada

abrangerá elementos dos ensaios de compactação, de permeabilidade e de obtenção de extrato lixiviado e seguirá as etapas dos referidos ensaios conforme suas respectivas normas.

A metodologia empregada para obtenção do extrato teve como referência o ensaio de coluna regido pela norma ASTM D 4874, bem como os procedimentos realizados por Knop (2003) e Cauduro (2003).

A preparação das amostras utilizadas nos ensaios ambientais seguiu os passos descritos pela Norma NBR 6457/2016. A moldagem dos corpos de prova foi realizada com material passante na peneira nº 10 e as amostras foram compactadas em molde cilíndrico com energia Proctor Normal nos teores de umidade ótima e com pesos específicos secos máximos respectivos de cada amostra obtidos a partir de ensaios de compactação realizados segundo a NBR 7182/2016. Posteriormente procedeu-se a realização do ensaio de permeabilidade à carga variável, segundo a NBR 14545/2000 (método B).

A norma NBR 14545/2000 recomenda que tal ensaio seja empregado para materiais com permeabilidade inferior à  $10^{-3}$  cm/s, que se aplica aos materiais utilizados neste trabalho.

Assim como na etapa de moldagem do corpo-de-prova e nas demais etapas do ensaio, a água utilizada foi água destilada.

No ensaio para determinação do coeficiente de permeabilidade a norma recomenda que sejam utilizados gradientes hidráulicos entre 2 e 15, sendo tanto maior o gradiente quanto menor a permeabilidade do corpo-de-prova, uma vez que gradientes hidráulicos elevados acima desse limite podem acarretar em carreamento de finos resultante das forças de percolação. Neste trabalho foi aplicado um gradiente de 2.

A saturação do corpo-de-prova foi feita (com água destilada) pela aplicação de um fluxo descendente, sem a aplicação de pressão e durou 24h.

A água que percolou através do corpo de prova na etapa de saturação foi coletada sendo essa a primeira amostra de lixiviado para análise ambiental. Após esta etapa, procedeu-se a aplicação de uma carga hidráulica no topo do corpo de prova e a realização do ensaio de permeabilidade a carga variável com fluxo descendente. Durante a execução do ensaio, são feitas no mínimo três leituras de tempo e volume percolado, para o cálculo do coeficiente de permeabilidade, procedimento esse que, com o propósito da análise ambiental e levando em conta as características do material, se repetiu a cada 24h. Deve-se realizar esta etapa por quantos dias se julgar necessário.

No presente trabalho todo o procedimento contando com a saturação durou 72h, sendo realizadas 3 coletas de material para análise. Em cada coleta do extrato percolado deve-se obter algo em torno de 150 ml, que deve ser armazenado em recipiente higienizado,

identificando a amostra, data e hora da coleta, e acondicioná-la em ambiente com temperatura média de 4 °C. Após a coleta, o material será submetido a análise ambiental, medindo-se a concentração de contaminantes. Neste trabalho foram avaliados apenas os parâmetros inorgânicos de ânions e de cátions.

A análise dos ânions ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) foi realizada em cromatógrafo iônico e a análise de cátions ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Ni}$ , e  $\text{Pb}^{2+}$ ) foi realizada com o emprego da técnica de espectrometria de absorção atômica. Cabe ressaltar que a análise de ânions foi realizada no Laboratório de Saneamento Ambiental (Labosan) da Universidade Federal do Ceará (UFC) no cromatógrafo iônico Dionex ICS-1100 da Thermo Fischer Scientific, enquanto a análise de cátions foi realizada no Laboratório de Análise de Águas (Lanasa), também na UFC, no Espectrofotômetro de Absorção Atômica Varian AA240FS.

Antes de submeter as amostras às análises, foram realizadas medidas de pH e condutividade elétrica. A condutividade elétrica deve ser inferior a 300  $\mu\text{S}$ , limite superior para que a amostra seja inserida no cromatógrafo. O pH, além de influenciar nos fenômenos de lixiviação e solubilização, estabelece também qual a solução extratora deve ser utilizada no ensaio de lixiviação conforme estabelece a norma NBR 10005/2004.

### ***3.3.4 Caracterização mineralógica***

A mineralogia, o arranjo das partículas, a textura, assim como a composição química estão intrinsicamente ligadas às propriedades físicas e químicas dos materiais. Todavia, tais características exercem influência também nas características geotécnicas, bem como no comportamento mecânico e hidráulico do material., Ou seja, há uma interdependência entre a mineralogia, arranjo espacial de partículas entre outras características físico-químicas, que impactam diretamente em propriedades como coesão, atrito, plasticidade, potencial de solubilização, e influenciando determinados parâmetros como ângulo de atrito, índice de plasticidade, coeficiente de permeabilidade, entre outros.

Dessa forma, o conhecimento prévio das características mineralógicas dos materiais conduz a uma melhor compreensão das demais características e propriedades desses, permitindo dessa forma uma melhor aplicação desses materiais otimizando seus usos de acordo com suas características, justificando-se, portanto, o emprego de técnicas como a Difração de raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura e outras já apresentadas como a Fluorescência de raios-X

### 3.3.4.1 Difração de raios-X

A técnica de difratometria de raios-X é uma das mais avançadas técnicas de caracterização microestrutural e análise química em uso. Essa técnica baseia-se num padrão de difração da radiação, característico de cada estrutura cristalina, cujo princípio foi explicado no item 2.6.4. Baseado nesse padrão é possível identificar e quantificar substâncias químicas sólidas cristalinas presentes nas amostras analisadas.

As análises de Difração de Raios-X deste trabalho, foram realizadas no Laboratório de Raios-X do Departamento de Física, na Universidade Federal do Ceará. O Equipamento utilizado foi o Difratômetro para amostras policristalinas, modelo XPert Pro MPD, marca Panalytical (FIGURA 33). A preparação prévia do material foi realizada no LMSP, consistindo em secagem do material em estufa, trituração das amostra e peneiramento. Foi utilizado cerca de 10g do material passante na peneira n° 200 (abertura de malha de 0,074 mm).

Figura 33 - Difratômetro para amostras policristalinas.



Fonte: <http://goo.gl/EZMF1T>

As difrações de raios-X realizadas, forneceram uma análise semiquantitativa dos minerais cristalizados presentes nas amostras, determinando os elementos e óxidos presentes nessas, baseado no padrão de difração das mesmas. Foram realizadas análises em 5 (amostras) amostras, uma de cinza composta, uma amostra de cinza leve (Pecém I), uma amostra do solo

(ASMOC), além de uma amostra de superfície (PA-17) e uma de profundidade (PP-2 (1,00-1,25m)).

Após a análise das amostras pelo difratômetro foi gerado um arquivo *.xrdml*, o qual continha os dados da análise realizada. Tais dados foram tratados pelo software X'Pert HighScore Plus, através do qual analisou-se os difratogramas das amostras, sendo possível identificar a composição mineralógica das mesmas, e obter informações como porcentagem de cada constituinte, distância interplanar, entre outras.

#### 3.3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de microscopia deste trabalho foram feitas com a utilização do microscópio eletrônico de varredura cujo princípio de funcionamento foi explicado sucintamente no item 2.6.5. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Microscopia do Departamento de Geologia da UFC. O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico de Varredura com detector de EDS, modelo TM3000, da marca Hitachi (FIGURA 34).

Figura 34 - Microscópio eletrônico de varredura com detector de EDS.



Fonte: <http://goo.gl/Zply9o>.

Não há normas para a realização desse ensaio. A preparação prévia das amostras submetidas as análises foram realizadas no LMSP, e seguiu as recomendações dos técnicos e profissionais do laboratório de Microscopia Eletrônica. Tal preparação consistiu em secagem prévia, trituração e peneiramento da amostra. O material passante na peneira de abertura 2,00

mm foi compactado no teor de umidade ótima e com energia Proctor normal, em anéis de 5,00 cm de diâmetro e 2,00 cm de altura.

Foram submetidas a análise de microscopia com EDS uma amostra de cinza composta, uma amostra de cinza leve, uma amostra da mistura S50C50 e outra da S70C30 e uma amostra do solo (ASMOC), estando todas as misturas no estado compactado.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nesta seção optou-se por apresentar primeiramente as análises mineralógicas, morfológicas e físico-químicas, uma vez que estas análises permitem interpretar melhor os resultados obtidos nos ensaios geotécnicos e ambientais, apresentados na sequência.

### 4.1 Difração de raios-X

As difrações de raios- x permite uma análise da mineralogia do material. Além da identificação de compostos cristalinos (minerais), é possível inferir a respeito do grau de cristalinidade, do tamanho das partículas, aspectos relativos a substituição isomórfica, podendo-se ainda quantificar os minerais presentes na amostra.

O estudo mineralógico de cinzas de carvão mostrou que elas podem apresentar uma mineralogia complexa e variada, variabilidade essa influenciada por aspectos como a composição do carvão, ambientes de armazenamento, calcinação, processos de queima, etc. É observado em cinzas a presença de constituintes vítreos sílico-aluminosos, quartzos, mulita, magnetita e hematita predominantemente, além de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre outros.

Nas cinzas estudadas observou-se a predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcita e gipsita, característica do linhito (lignito), além da presença de silicatos de alumínio, isso explica, por exemplo, a alta disponibilidade de cálcio intercambiável (TABELA 14).

Ubaldo (2005) e Mendonça (2007) avaliando as cinzas volantes obtidas da queima do carvão na Usina Termoelétrica Jorge Lacerda, encontram como constituintes mineralógicos da cinza, os minerais *quartzo*, *caulinita*, *muscovita*, *gipsita* e *pirita*. Como citado anteriormente, a composição mineralógica do carvão mineral e conseqüentemente das cinzas, pode variar de região para região e de jazida para jazida. As cinzas analisadas pelos autores são o resíduo da combustão do carvão brasileiro (predominantemente a hulha) o que pode explicar as diferenças mineralógicas encontradas.

A análise mineralógica do solo identificou o quartzo (mineral presente em toda amostra de solo) característico da fração grosseira da amostra, além da caulinita, argilomineral predominante na amostra de solo analisada. Além dessas, foram encontrados minerais secundários como albita e o diopsídio. Essas características explicam, por exemplo, a baixa expansão do solo, a baixa capacidade de troca catiônica, evidenciando a importância do estudo mineralógico.

A partir dessas análises pode-se inferir mais sobre a textura e estrutura dos solos, além de compreender melhor suas propriedades físico-químicas e seu comportamento geotécnico.

Tabela 14 - Resultados da difração de raios-X.

AMOSTRA	NOME DO MINERAL	NOME DO COMPONENTE	FÓRMULA QUÍMICA
PA-17	Calcita	Carbonato de Cálcio	Ca(CO <sub>3</sub> )
	Quartzo	Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>
	Gipsita	Sulfato de Cálcio Hidratado	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
PP-2 (1,00-1,25m)	Calcita	Carbonato de Cálcio	Ca(CO <sub>3</sub> )
	Gipsita	Sulfato de Cálcio Hidratado	Ca(SO <sub>4</sub> ).2H <sub>2</sub> O
	Quartzo	Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>
	Silimanita	Silicato de Alumínio	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>
Pecém 1	Gipsita	Sulfato de Cálcio Hidratado	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
	Calcita	Carbonato de Cálcio	Ca(CO <sub>3</sub> )
	*Zeólita	Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>
	Quartzo	Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>
CC	Quartzo	Óxido de Silício	SiO <sub>2</sub>
	Calcita	Carbonato de Cálcio	Ca(CO <sub>3</sub> )
	Gipsita	Sulfato de Cálcio Hidratado	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
	Silimanita	Silicato de Alumínio	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>
	-	Sulfato de Cálcio	Ca(SO <sub>4</sub> )
Solo ASMOC	Quartzo	Óxido de Silício	Si O <sub>2</sub>
	Caulinita	Hidróxido de Silicato de Alumínio	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>
	Albita (Plagioclásios)	Silicato de Alumínio e Sódio	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
	Diopsídio (Clinopiroxenos)	Silicato de Cálcio Magnésio, Ferro	Ca <sub>1.022</sub> (Mg <sub>0.906</sub> Fe <sub>0.095</sub> )(Si <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.099</sub> )O <sub>6</sub>

Fonte: Elias (2018).



## 4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Através da Microscopia Eletrônica de Varredura foi possível observar características morfológicas e inferir sobre a textura e estrutura dos materiais. A microscopia foi realizada em pequenos fragmentos compactados de amostras de cinza composta, cinza leve, solo e para as misturas S50C50 e S70C30.

A figura 35 mostra as micrografias da cinza composta no estado compactado. Nelas é possível observar a forma esférica das partículas e uma quantidade de vazios consideráveis, evidenciando a mesoporosidade do material. É possível notar também que apesar da compactação são observadas pequenas aglomerações de partículas, além de ser possível notar também alguns fragmentos de partículas esféricas quebradas, frutos do processo de cominuição, mas que corroboram o fato de tratar-se de esferas ocas.

Figura 35 - MEV Cinza Composta (Amostra Compactada): (a) Micrografia ampliada x100 (Continua).

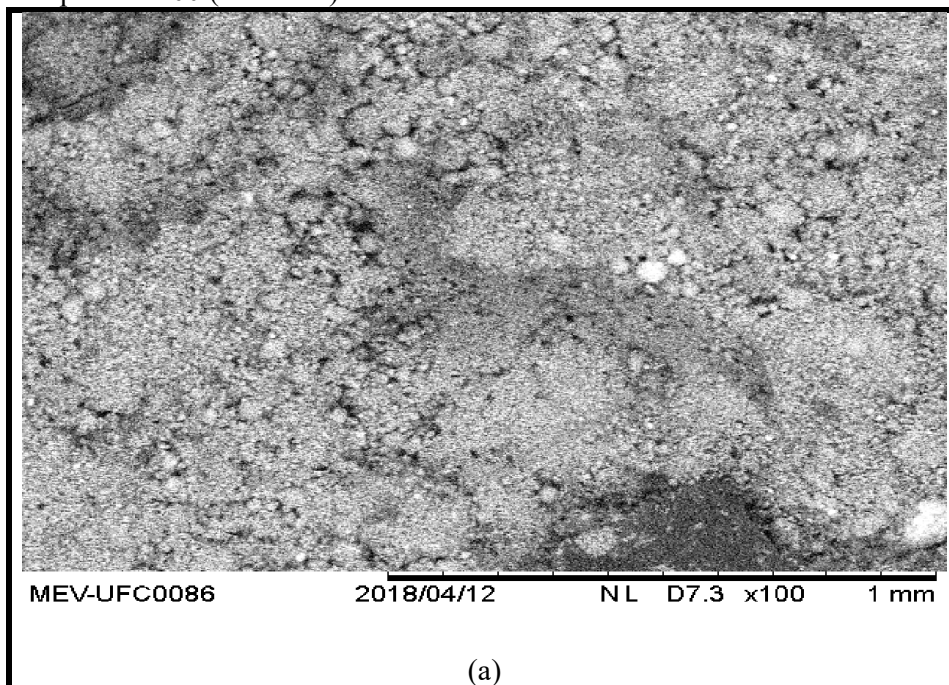
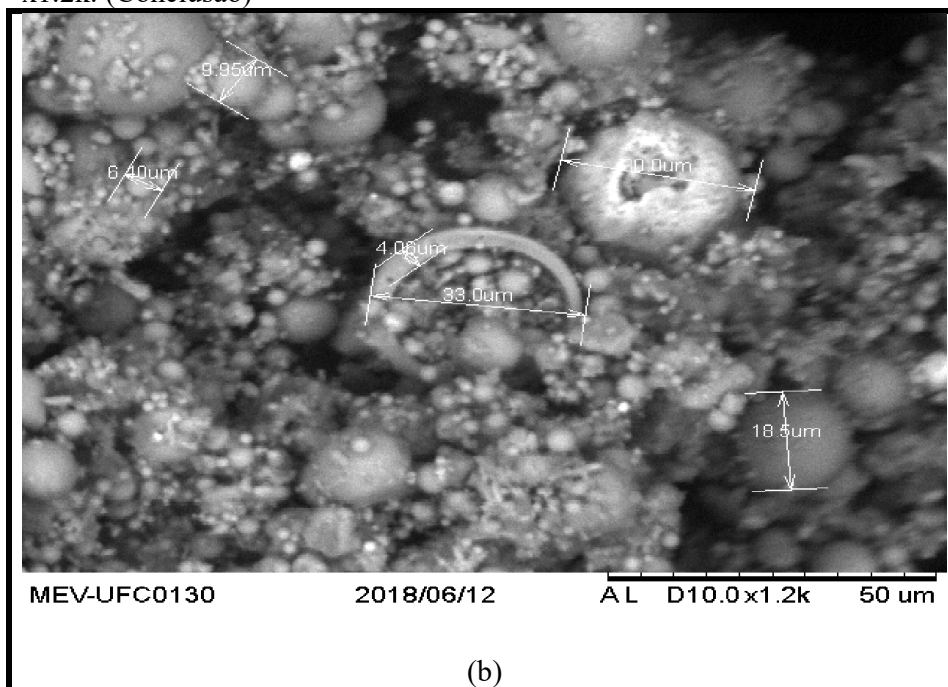


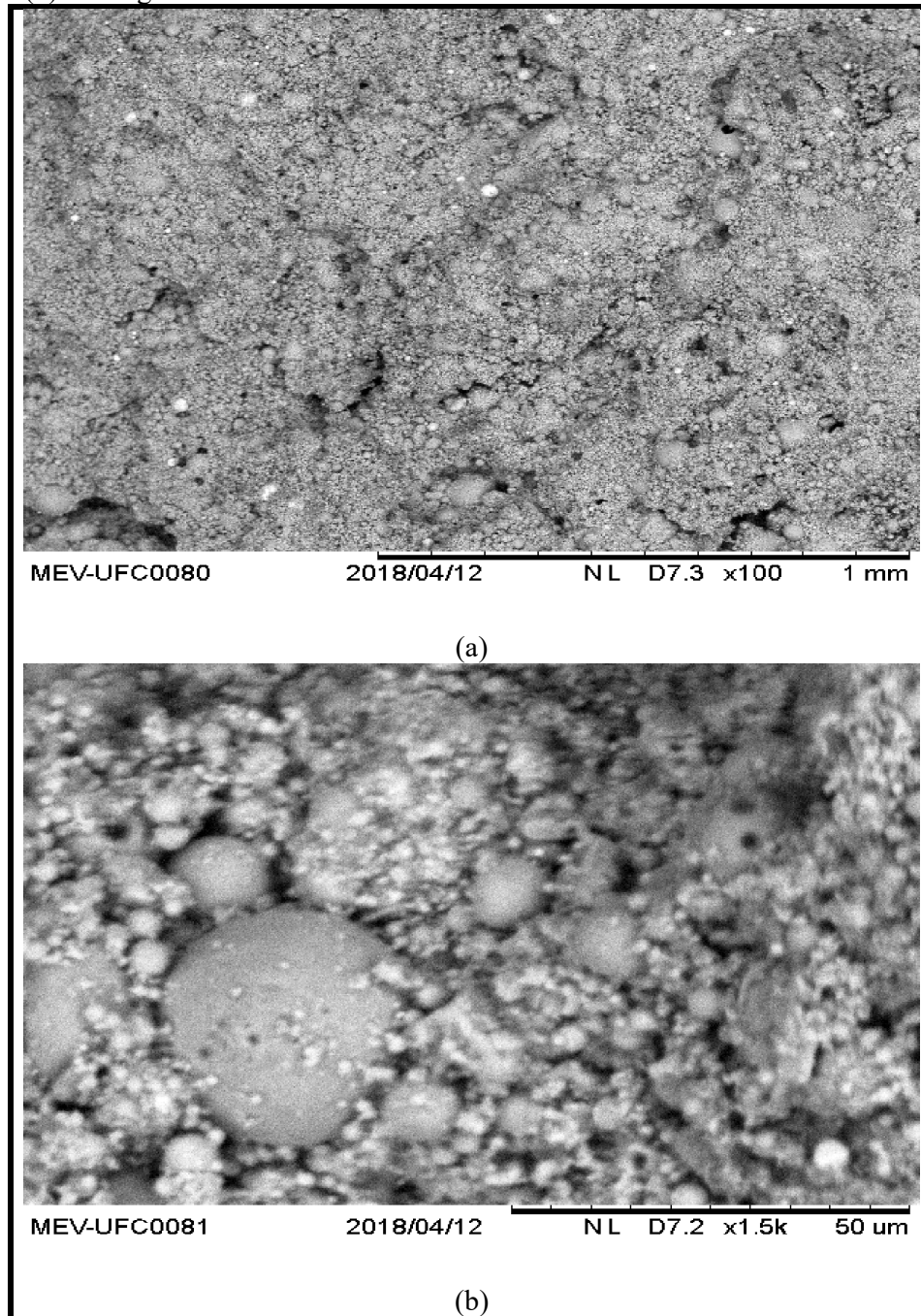
Figura 35 - MEV Cinza Composta (Amostra Compactada): (b) Micrografia x1.2k. (Conclusão)



Fonte: Elias (2018)

A figura 36 apresenta as micrografias da cinza leve. Nota-se novamente a predominância de partículas esféricas, contudo, menos floculada que a amostra de cinza composta e com algumas aglomerações e poros aparentemente menores. Ao comparar-se a figura 35a com Figura 36a, que são micrografias mais superficiais (aumentadas 100x), é possível notar certas semelhanças nas topografias das amostras, mesmo tratando-se a primeira de uma amostra de cinzas composta e a outra uma amostra de cinzas leves.

Figura 36 - MEV Cinza Leve (Amostra Compactada): (a) Micrografia x100; (b) Micrografia x1.5k.

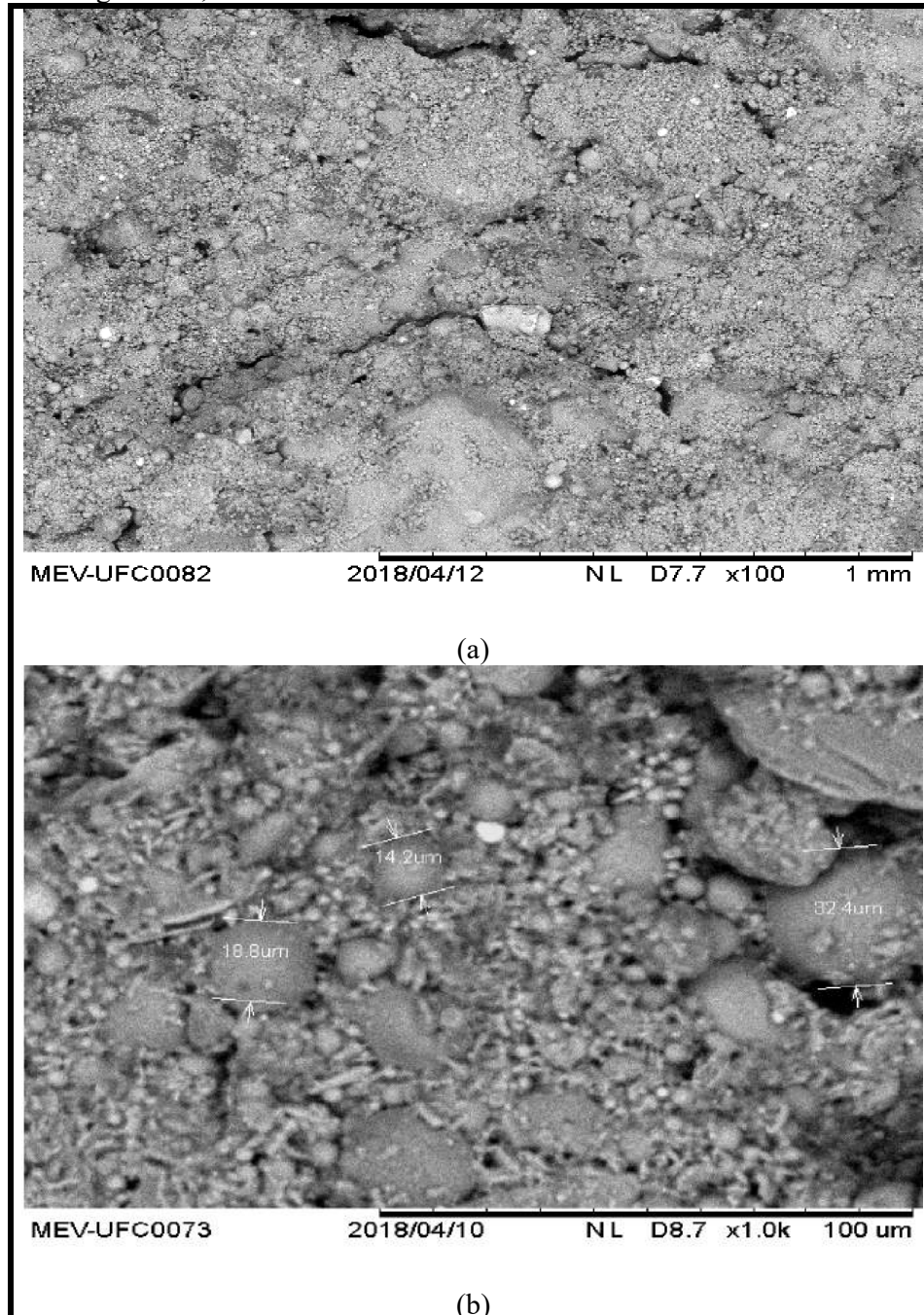


Fonte: Elias (2018)

A figura 37 apresenta micrografias da amostra S70C30. Nelas são possíveis notar a presença tanto de partículas esféricas como de partículas lamelares oriundas do solo em particular da fração argila, além de partículas angulares e subangulares correspondentes a fração quartzosa do solo. A presença de partículas esféricas impede que a estrutura assumira um estado mais disperso, apresentando uma certa floculação. A figura 37a mostra a superfície da amostra

S70C30, que apresenta um aspecto mais denso do que as amostras de cinza composta e de cinza leve, levando-se a presumir a ocorrência de cimentação. As descontinuidades apresentadas devem-se a fragmentação das amostras para análise no microscópio eletrônico, não sendo representativa para análise de vazios da amostra.

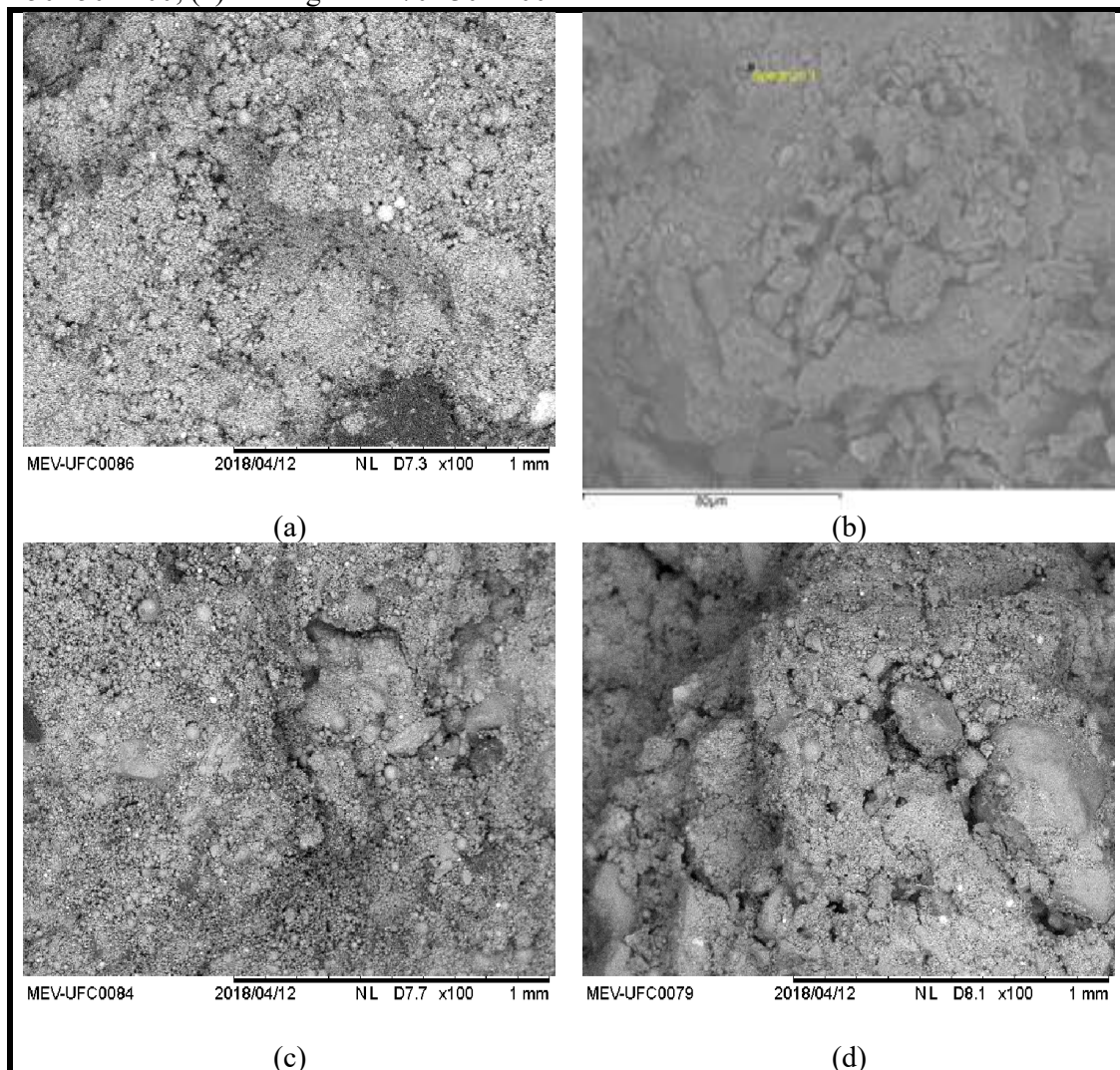
Figura 37 - MEV S70C30 (Amostra Compactada): (a) Micrografia x100; (b) Micrografia x1,0k.



Fonte: Elias (2018)

Na figura 38 é possível observar como as características de cada material (cinza e solo) influenciam as características morfológicas das misturas. A figura 38a apresenta a micrografia de uma amostra de cinza composta e a figura 38b mostra uma micrografia da superfície de uma amostra do solo aumentada 50x. A figura 38c é referente a mistura S50C50, sendo possível notar uma presença maior de partículas esféricas do que a amostra S70C30 (FIGURA 38d), devido a maior fração de cinza composta. É possível notar também uma porosidade aparentemente maior na micrografia da S50C50. Na micrografia da amostra S70C30 nota-se uma aglomeração maior de partículas com uma estrutura com aspectos de cimentação. Essas características podem, por exemplo, contribuir para explicar porque a condutividade hidráulica da S50C050 é superior à da S70C30.

Figura 38 - MEV: (a) Micrografia CC x100; (b) Micrografia ASMOC x50; (c) Micrografia S50C50 x100; (d) Micrografia S70C30 x100.



Fonte: Elias (2018).

É importante ressaltar que os resultados dos ensaios apresentados não devem ser avaliados de maneira isolada. A correta interpretação do comportamento do material, bem como a identificação de suas características, perpassa por uma análise conjunta de diferentes fatores, que buscou-se abranger a partir de uma série de ensaios. Dessa forma uma análise da estrutura porosa do material depende tanto do MEV como dos ensaios de adsorção. O comportamento hidráulico só pode ser compreendido, a partir de análises de permeabilidade, granulométricas e físico-químicas. As análises ambientais dependem tanto dos ensaios de lixiviação e solubilização como das análises químicas. Ou seja, deve-se contemplar o maior número de informações possíveis a respeito do material para que possamos conferir maior representatividade aos resultados obtidos.

### 4.3 Superfície Específica

No apêndice B são apresentadas as isotermas obtidas para amostras de cinzas individuais (PA17 e PP-2 (1)), para amostra de cinzas leves e para amostra de cinzas compostas. As isotermas apresentam a relação entre a quantidade de gás adsorvida ou dessorvida pelo sólido, a uma temperatura constante, em função da pressão do gás. Normalmente expressa-se a quantidade de gás adsorvida ou dessorvida pelo seu volume ( $V$ ), em condições normais de temperatura e pressão ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $760\text{mmHg}$ ), enquanto a pressão é dada pela pressão relativa ( $P/P_0$ ), ou seja, pela relação entre a pressão de trabalho e a pressão de vapor do gás na temperatura utilizada (TEXEIRA *et al.* 2001). As isotermas obtidas para as amostras de cinzas são semelhantes a isotermas do tipo IV (item 2.6.2), onde observa-se dois ramos distintos: o ramo inferior expressa a quantidade de gás adsorvida com o aumento da pressão relativa, ao passo que o ramo superior mostra a quantidade de gás dessorvida no processo inverso. A histerese (diferença nos caminhos) apresentada entre os processos de adsorção e dessorção, está associada a dispersão no tamanho dos poros sendo maior quanto maior for a dispersão.

No apêndice B são apresentados, também, os gráficos da equação de BET, que são expressos em  $P/[V(P_0 - P)]$  versus  $P/P_0$ , para faixas de valores de pressão relativa, onde a relação é linear (0,05 a 0,35).

A determinação de distribuição do tamanho dos poros, considerando o material como mesoporoso, foi feita segundo o método BJH. Vale destacar que o estudo da estrutura porosa do material deve ser complementado pela análise topográfica do material através da microscopia eletrônica de varredura (MEV), uma vez que por meio desta técnica é possível a visualização do tamanho e da distribuição dos agregados de microesferas.

Os ensaios de adsorção, realizados com as cinzas, mostraram partículas com áreas superficiais na mesma faixa das partículas do argilomineral caulinita, com área entre 10-30 m<sup>2</sup>/g. As análises das amostras de cinza apresentaram isotermas que se assemelham a uma isoterma do tipo IV, característicos de materiais mesoporosos. As superfícies específicas das amostras estimadas pelo método BET ficaram relativamente próximas com exceção da cinza leve que apresentou a menor superfície específica. Ressalta-se que para o cálculo da área considerou-se apenas a faixa de valores de pressão relativa entre 0,05 e 0,35

Segundo Burgess *et al.* (1989 *apud* CESSA *et al.* 2009) a histerese apresentada nas isotermas das amostras (semelhantes a isotermas do tipo IV) é comum a classe de mesoporos e deve-se ao formato interno e condensamento do gás nos mesoporos em partículas esferoidais de tamanho uniforme, compactadas ou aglomeradas.

A partir das análises dos dados obtidos pelos ensaios e dos gráficos, apresentados elaborou-se a tabela 15 que apresenta os valores de área específica, do volume dos poros e do diâmetro médio dos poros.

Tabela 15 - Superfície específica, volume de poros, diâmetro médio dos poros das amostras selecionadas.

AMOSTRA	Superfície específica (m <sup>2</sup> /g) (Método BET)	Volume de Poros (cc/g) (Método BJH)	Diâmetro médio dos poros (Å)
PA-17	19,82	0,1377	156
PP-2 (1,00-1,25m)	27,00	0,1309	97
CL-1 (Pecém 1)	2,49	0,0280	239
CC	17,62	0,1036	119

Fonte: Elias (2018)

Essas características de área superficial e porosidade têm influência direta nas propriedades e comportamento geotécnico do material, como densidade e condutividade hidráulica.

#### 4.4 Fluorescência de raios-X

A análise de fluorescência forneceu a composição em % de massa dos óxidos presentes nas amostras (TABELA 16). Como era esperado, observou-se predominância do SiO<sub>2</sub> (associado ao conteúdo de argilomineral e quartzo), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (associado a sulfetos) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (associado ao conteúdo de argilomineral), algo comum em amostras e cinzas de carvão mineral,

observado também por Mendonça (2007) e Elias (2015). Todavia, a alta porcentagem de CaO, é um tanto quanto incomum, quando comparado a outras cinzas de carvões minerais brasileiros.

Tabela 16 - Composição em % de massa dos óxidos presentes nas amostras analisadas

ÓXIDOS	AMOSTRAS				
	CC	CL-1	PA-17	PP-2 (1)	ASMOC
SiO <sub>2</sub>	44,8527	27,7812	34,8527	34,4588	56,0941
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,9179	15,0183	15,2719	13,2378	9,7277
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,0223	8,9254	12,9768	12,3981	23,4378
CaO	17,5326	32,5083	25,5751	29,9245	3,7381
SO <sub>3</sub>	4,0307	12,3102	6,5097	5,3489	0,3198
K <sub>2</sub> O	2,5317	1,735	2,3604	2,1263	3,4057
TiO <sub>2</sub>	2,1119	1,3814	1,5929	1,7238	2,6213
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4372	-	0,2772	0,283	-
SrO	0,266	0,257	0,171	0,2039	0,0382
MnO	0,1286	-	0,164	0,1115	0,1083
ZnO	0,0854	-	0,0631	0,0675	-
NiO	0,0829	-	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	0,1849
Cl <sup>-</sup>	-	0,0832	0,1853	0,116	0,324

Fonte: Elias (2018)

Segundo Kihara (1983) as cinzas podem ser divididas em dois grupos: (a) as silico-aluminosas, ricas em SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, originadas da combustão da hulla (carvão característico da região sul do Brasil) e (b) as sulfocálcicas, na qual predomina o CaO e SO<sub>3</sub> produtos da combustão do lignito. Não se tem informação a respeito do tipo do carvão utilizado nas UTE's Pecém I e II, sabe-se apenas que sua origem é colombiana.

Outro fator que pode contribuir para os elevados teores de CaO nas amostras de cinzas analisadas é o processo de dessulfuração. Concentrações consideráveis de óxido de cálcio (CaO), estão ligadas às fases mineralógicas de anidrita (CaSO<sub>4</sub>) e calcita (CaCO<sub>3</sub>). Segundo ROCHA *et al.* (2012) a presença de anidrita nas cinzas está associada ao processo de dessulfuração interna utilizado durante a queima do carvão mineral, onde há inserção de calcário (CaCO<sub>3</sub>) ao longo dessa queima, a fim de diminuir as emissões de gases SO<sub>x</sub> para a atmosfera, conforme as reações apresentadas nas equações 7 e 8:





As variações na composição das amostras individuais de cinza podem ser atribuídas a diversos fatores, como: variações do processo de queima, processos de dessulfuração, variação na quantidade de cada tipo de resíduo na amostra (as amostras eram compostas principalmente por cinzas de fundo, mas contendo também, cinzas volantes e resíduos de dessulfuração), etc. A cinza composta apresentou uma composição percentual em massa de óxidos um pouco diferente das demais (amostras individuais). Essas diferenças estão associadas às variações na composição das amostras individuais, como pode-se observar no anexo B, onde são apresentadas as fluorescências realizadas com todas as amostras de cinzas individuais realizadas pela linha de pesquisa 1. Analisando os resultados da fluorescência da linha 1, observou-se dispersões significativas para os principais componentes das amostras ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), como, por exemplo, para o  $\text{CaO}$ , que apresentou percentual em massa variando no intervalo de 10,2% a 43,4%, apresentando desvio padrão de 10,1 e coeficiente de variação 38,9%, sendo tal comportamento observado também outros componentes. Vale ressaltar que foram observadas variações no percentual em massa dos constituintes inclusive para amostras do mesmo ponto de coleta, ratificando a heterogeneidade do material quanto à sua composição.

O solo utilizado na mistura apresentou também como principais constituintes sílica (ou óxido de silício -  $\text{SiO}_2$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e alumina (ou óxido de alumínio -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), compondo 89,26% da amostra analisada. O óxido de silício e alumínio são, provavelmente, oriundos dos minerais quartzosos (fração areia), da sílica livre e dos argilominerais presentes na amostra. Conforme foi visto na análise difração, o principal argilomineral presente na amostra de solo analisada é a caulinita, um argilomineral do tipo 1:1 formado pela intemperização de micas e feldspatos. Os feldspatos podem ser potássicos (ortoclásio,  $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) ou calco-sódicos (plagiocásios:  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) - albita, e  $\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  anortita), o que explica a presença em menor quantidade de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), e óxidos de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ).

A complexidade de composição de elementos em menores proporções é decorrente de associação orgânica e inorgânica relacionadas com reações físico-químicas e bioquímicas ligadas as características do ambiente e do processo de formação do solo.

Comparando a composição química das amostras do presente trabalho com amostras de Cinza de Fundo (CF) e Cinza Volante (CV) oriundas de outras termoeletricas brasileiras, apresentadas por Chies *et al.* (2003, *apud* UBALDO, 2005) é possível notar diferenças consideráveis entre as composições químicas das cinzas (TABELA 17). Como as cinzas analisadas por Chies *et al.* (2003) também devem ter sido submetidas a processos de dessulfuração, mesmo que diferentes, não seriam suficientes para variações tão significativas

na composição, de modo que as discrepâncias apresentadas podem ser atribuídas também ao tipo de carvão mineral, destacando-se que as usinas de Copesul, Tubarão, Charqueadas e Candiota, fazem uso do carvão mineral nacional (hulla), enquanto a UTE Porto Pecém faz uso de carvão colombiano, que pelos resultados apresentados, provavelmente possui mineralogia diferente.

Tabela 17 - Composição química de cinzas de diferentes termelétricas

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE CINZAS (%)										
Óxidos	Copesul		Tubarão		Charqueadas		Candiota		Pecém	
	CF <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	CF <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	CF <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	CF <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	CC	CL-1
SiO <sub>2</sub>	64,40	66,40	59,20	56,50	63,30	62,20	66,70	65,70	44,85	27,78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,00	18,20	24,60	28,00	24,50	26,00	19,20	24,30	13,02	8,93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,10	6,50	8,20	6,40	4,50	2,90	9,00	4,60	14,92	15,02
TiO <sub>2</sub>	0,89	0,80	1,20	1,31	0,98	1,10	0,72	0,69	2,11	1,38
CaO	1,70	2,15	1,34	0,92	1,31	1,26	0,60	0,37	17,53	32,51
MgO	0,40	0,88	0,41	0,45	0,40	0,35	0,30	0,46	-	-
K <sub>2</sub> O	1,15	1,41	2,40	2,50	1,60	1,41	1,20	1,12	2,53	1,74
Na <sub>2</sub> O	0,14	0,34	0,23	0,23	0,14	0,18	0,13	0,10	-	-
C	0,33	0,14	2,32	0,21	3,13	1,09	0,34	0,05	-	-
S	0,12	0,09	0,09	<0,05	0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
SO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	4,03	12,31

Fonte: Chies *et al.* (2003, *apud* UBALDO, 2005). Adaptada por Elias (2018).

Segundo Lopes (2011), a variabilidade das características físico-químicas das cinzas pode ser atribuída a fatores diversos como composição do carvão, moagem do carvão, operação de caldeiras, entre outros. Ainda segundo Gothe (1990 *apud* ELIAS 2015) as cinzas podem variar sua composição de uma jazida para outra, de uma usina para outra e até mesmo de uma caldeira para outra dentro de uma mesma usina. Todavia, essas características de composição podem ajudar a compreender melhor o comportamento da cinza, como, baixa expansão, elevada capacidade de troca catiônica (elevados teores de cálcio intercambiável), baixa condutividade hidráulica entre outros.

#### 4.5 Análise Química (pH, CE, Complexo Sortivo, CTC e Matéria Orgânica)

A tabela 18 abaixo apresenta os resultados das análises químicas realizadas, para as quatro amostras de cinza selecionadas. Os resultados de pH, mostram a alcalinidade das amostras, algo característico das cinzas de carvão mineral. O elevado pH poderá exercer influências diversas no comportamento do material como na aglomeração de partículas e na

solubilização de substâncias poluentes. A cinza composta mostrou um pH inferior quando comparado com as cinzas individuais, o que pode ter contribuído para o menor valor de CTC, apresentado.

Tabela 18 - Análise química – pH, CE, C, N e MO

AMOSTRA	pH (Água)	CE (dS/m)	C (g/kg)	N (g/kg)	C/N	MO (g/kg)
PA-17	9,1	4,28	19,02	2,01	9	32,79
PP-2 (1,00-1,25m)	12,7	4,52	16,56	1,75	9	28,55
CL-1	12,8	6,42	11,1	1,7	9	19,14
CC	8,5	3,5	18,3	1,95	9	31,55

Fonte: Elias (2018)

CE – Condutividade Elétrica; C – Carbono (Teor); N – Nitrogênio (Teor); C/N – Relação Carbono-Nitrogênio; MO – Matéria Orgânica.

A condutividade elétrica é uma medida através da qual pode-se avaliar a quantidade de sais presentes no solo, de forma que quanto maior a quantidade de sais presentes em solução do solo maior o valor de condutividade elétrica obtida (BRANDÃO, 2002). Os sais podem levar a mudanças na estrutura do solo principalmente devido a presença de sódio. Segundo Andrade e Cruciane (1996), pode haver interferência na condutividade hidráulica devido aos efeitos do sódio adsorvido sobre a expansão, dispersão e migração de argilas. Dessa forma a CE é mais um fator que pode ajudar a compreender o comportamento hidráulico e a resistência mecânica das cinzas e da mistura, além de embasar as análises e conclusões realizadas. Ela pode explicar, por exemplo, porque a condutividade hidráulica da cinza composta é ligeiramente inferior as das amostras individuais e de cinza leve, já que sua condutividade elétrica também é ligeiramente inferior à dessas amostras.

Há diversos trabalhos como os Quirk e Schofield (1955), Oster e Shainberg (1980) e Girdhar e Yadav (1980) que afirmaram que solos com alto teor de cálcio trocável podem apresentar expansão muito inferior a solos com sódio intercambiável. O processo de expansão reduz a condutividade hidráulica, através do fechamento dos poros inter-agregados. Além disso o processo de expansão gera pressões, que empurram as partículas de argila aproximando umas das outras, modificando a estrutura, que passa a ser mais dispersa, desfazendo-se os agregados de partículas. Uma vez desagregadas as partículas finas podem movimentar-se livremente de maneira desuniforme nos poros do solo reduzindo a permeabilidade do mesmo. Isso explica porque cinzas com alto teor de cálcio, como as do presente trabalho, mesmo com a adição significativa de materiais argilosos, muitas vezes não conseguem atingir uma baixa

condutividade hidráulica. Esse comportamento foi observado por Elias (2015), ao avaliar misturas de cinza e bentonita (argila 2:1). Contudo, o mesmo não foi observado no presente estudo, uma vez que o argilomineral predominante na amostra de solo utilizada era a caulinita (argila 1:1) que possuía baixa capacidade de expansão.

O carbono e o nitrogênio do solo têm forte relação com os aspectos como fertilidade do solo, atividades microbiológicas, nutrição de espécies vegetais, entre outras. Todavia, é possível também estabelecer relações com solo como elemento geotécnico. Há uma estreita relação entre os teores de C e N e a matéria orgânica. A relação C/N é um índice que permite avaliar o grau de evolução da matéria orgânica do solo e sua mineralização, além de possibilitar também, avaliar a atividade microbiológica do solo. Essas características podem influenciar fortemente a textura e estrutura do solo, determinando, por exemplo, a densidade do material. Esta análise ganha especial importância uma vez que o carvão mineral contém matéria orgânica de origem fóssil, permitindo-se dessa forma inferir a respeito da fração mineral presente nas cinzas e do teor de matéria orgânica, que influenciaram no comportamento hidráulico e mecânico do material. Observou-se que a relação C/N para as amostras foi basicamente a mesma para todas as amostras analisadas. Análises similares realizadas por Mendonça (2007) com amostras de cinza grossa mostraram uma relação C/N (17,4) quase o dobro da relação C/N (9) das cinzas do presente trabalho, o que se deve principalmente ao maior teor de nitrogênio total das cinzas ensaiadas.

Para aplicação de um material como cobertura, a relação C/N, torna-se um importante parâmetro para avaliação do mesmo, uma vez que uma baixa C/N indica maior facilidade de decomposição da matéria orgânica além de disponibilizar mais nitrogênios, favorecendo o desenvolvimento de espécies vegetais. Para aplicação como *liner*, a relação C/N não possui tanta importância, mas pode ajudar nas análises da textura e estruturas dos materiais, que influenciará no comportamento geotécnico tanto das cinzas como das misturas.

Quanto a matéria orgânica, a cinza apresentou teores entre 1,9 a 3,2% evidenciando que não houve a combustão total. Valores similares foram encontrados por Mendonça (2007). Esses teores não são significativos o suficiente para influenciar parâmetros tais como a superfície específica, a CTC e a condutividade hidráulica, propriedades fortemente influenciadas pela presença de MO.

A análise do complexo sortivo (TABELA 19) mostra que o  $\text{Ca}^{2+}$  é cátion trocável mais abundante nas amostras de cinzas, que não apresentaram como cátion trocáveis nem o hidrogênio, nem o alumínio, de modo que a soma de bases (S) é igual ao de cátions trocáveis (T).

Tabela 19 - Complexo Sortivo e CTC das amostras analisadas.

AMOSTRA	Complexo Sortivo (cmol/kg)							
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	Al <sup>3+</sup>	S	T
PA-17	98,7	24,6	9,37	5,41	0	0	138,1	138,1
PP-2 (1,00-1,25m)	172,4	21,2	5,16	2,96	0	0	201,7	201,7
CL-1	119,2	3,8	3,61	20,46	0	0	127,1	127,1
CC	69	41,7	5,93	5,41	0	0	120	120

Fonte: Elias (2018).

S – Soma de bases; T – CTC (Capacidade de Troca Catiônica)

Os valores de cátions trocáveis das cinzas são bastante elevados, variando de 120 a 201,7 cmolc/kg, para as amostras analisadas, sendo superiores aos valores de CTC de argilas do tipo 2:1. Segundo Lopes e Guilherme (2004) os valores de CTC para minerais de argila, por exemplo, variam de 10 a 150 cmolc/kg, e de 2 a 5 cmolc/kg para sesquióxidos (óxidos que contém 3 átomos de oxigênio combinados a dois átomos do outro elemento constituinte) de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), comuns em solos brasileiros.

Diversos fatores influenciam a CTC, além da espécie e quantidade de argila e material orgânica, a superfície específica e o pH são outros fatores que muito contribui para os valores de CTC.

Nos solos observa-se uma tendência de aumento de CTC a medida que aumenta a superfície específica (LOPES e GUILHERME, 2004). Comparando a relação entre a superfície específica e a CTC da cinza e da montmorilonita, observa-se um contrassenso, pois à princípio, esperava-se valores de CTC das cinzas inferior à do argilomineral citado. Porém, como foi mencionado, existem outros fatores que podem contribuir para a CTC. Ainda segundo Lopes e Guilherme (2004), o pH tem grande contribuição na CTC, sendo maior sua influência, quanto maior for teor de matéria orgânica e a presença de espécies de minerais de argila com a dominância de cargas dependentes do pH.

É possível observar portanto, que o valor de CTC dependerá de uma série de condições, devendo-se ressaltar que apesar da similaridade do material com os solos, as particularidades mineralógicas, morfológicas, texturais, estruturais, e sobretudo de formação do material, confere a cinza características singulares, o que torna difícil a comparação do material com o comportamento dos solos sobre esse quesito, e contribuem para as diferenças encontradas.

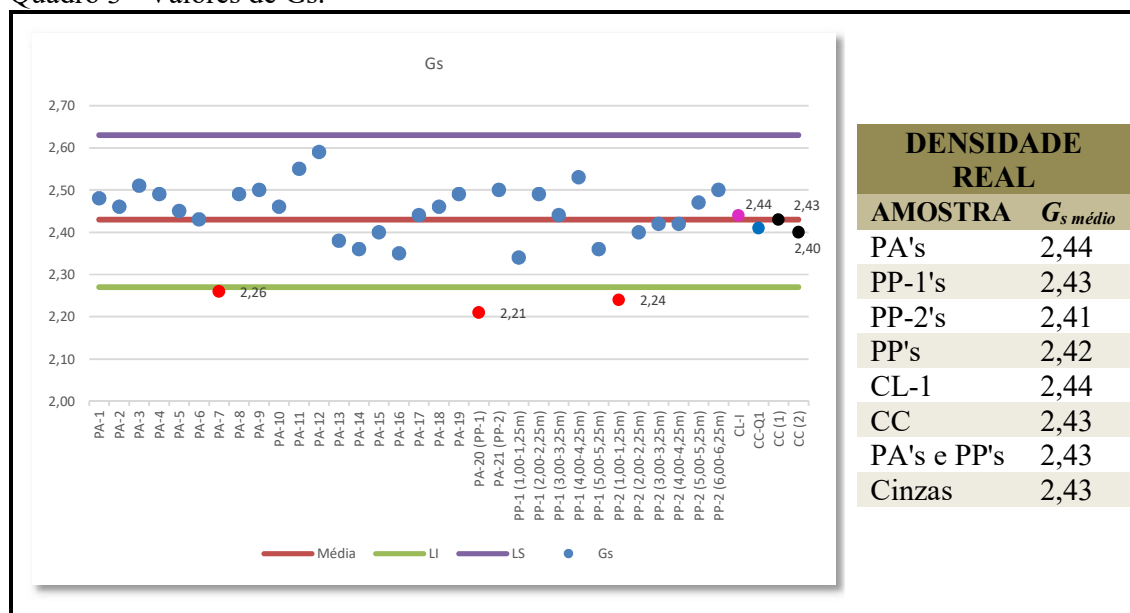
Entretanto, algumas inferências podem ser feitas a respeito do comportamento da cinza, a partir da CTC. A elevada CTC juntamente com pH pode determinar a formação de

aglomerado de partículas (estruturas mais floculadas ou dispersas), que influenciaram na condutividade hidráulica e na resistência ao cisalhamento das cinzas e das misturas.

#### 4.6 Massa Específica Real dos Grãos

As análises de massa específica real dos grãos foram realizadas com todas as amostras coletadas, e ainda com as amostras de cinza composta, com solo coletado no ASMOC e com os materiais compósitos (misturas de solo e cinza). No quadro 3 estão os resultados desta análise sendo apresentado também valores médios de  $G_s$ .

Quadro 3 - Valores de  $G_s$ .



Fonte: Elias (2018).

O valor ficou um pouco mais distante dos valores de densidade real obtidos por UBALDO (2005) e LOPES (2011), tanto para cinzas de fundo como para cinzas volantes oriundas da UTE de Tubarão (TABELA 20). Todavia, pesquisas anteriores realizadas por Elias (2015), em cinzas volantes coletadas na UTE Porto Pecém I, apresentaram, valores de densidade real dos grãos similares às apresentadas no quadro 1. Essas diferenças podem ser atribuídas ao fato do material de estudo se tratar de uma mistura de cinzas leves, de fundo e resíduos de FGD. Além disso, a proximidade aos valores obtidos por ELIAS (2015), que analisou apenas cinzas leves, torna-se um indicativo de que tais diferenças podem também ser

frutos de fatores como: mineralogia do carvão de origem, diferenças no processo de queima, entre outras.

Tabela 20 - Valores de  $G_s$  para cinzas de carvão mineral obtidos por outros autores.

DENSIDADE REAL ( $G_s$ )						
Ubaldo (2005)		Lopes (2011)		Elias (2015)	Elias (2018)	
CG	CL	CG	CL	CL	CC	CL
2,043	2,090	1,988	2,105	2,464	2,423	2,443

Fonte: Elias (2018)

A densidade real dos grãos foi um dos parâmetros que menos sofreu variação, evidenciado pelo baixo desvio padrão ( $\sigma = 0,08$ ). O valor médio foi de  $G_s = 2,43$ , sendo que o máximo valor obtido (não-outlier) foi de 2,59. Os valores obtidos estão ligeiramente abaixo dos valores de densidade real das partículas de solo (QUADRO 4). Essa diferença pode estar associada a maior porosidade do material e sua mineralogia.

Quadro 4 - Análise estatística – massa específica real dos grãos ( $G_s$ ).

$G_s$	
<i>Média</i>	2,43
<i>Erro padrão</i>	0,01
<i>Mediana</i>	2,44
<i>Modo</i>	2,49
<i>Desvio padrão</i>	0,08
<i>Variância da amostra</i>	0,01
<i>Curtose</i>	1,12
<i>Assimetria</i>	-0,90
<i>Intervalo</i>	0,38
<i>Mínimo</i>	2,21
<i>Máximo</i>	2,59
<i>Soma</i>	87,55
<i>Contagem</i>	36,00
<i>Maior (1)</i>	2,59
<i>Menor (1)</i>	2,21
<i>Nível de confiança (95,0%)</i>	0,03

Fonte: Elias (2018).

O valor obtido para cinza composta foi o mesmo valor da média das amostras ( $G_s = 2,43$ ) e para o solo obteve-se uma densidade real de 2,62. Para as misturas os valores médios variaram de 2,39 para a mistura S30C70 a 2,46 para a mistura S70C30, ou seja, um aumento

no valor de  $G_s$  a medida que aumentava-se a fração de solo na mistura. A mistura S30C70 apresentou o valor inesperado uma vez que o mesmo estava abaixo das densidades das CC e do solo (Tabela 21).

Tabela 21 - Valores de  $G_s$ , para os materiais e misturas.

AMOSTRA	$G_s$
CC	2,43
CC-Q1	2,41
Solo ASMOC	2,62
S30C70	2,39
S50C50	2,45
S70C30	2,46
S70C30Ca5	2,55

Fonte: Elias (2018)

#### 4.7 Análise Granulométrica

As cinzas encontravam-se em um estado “sinterizado”, ou seja, as partículas em contato mútuo, sob a ação de esforços mecânicos, temperatura e reações físico-químicas, passaram a apresentar-se como blocos íntegros e de maior resistência mecânica, que não foi possível distinguir os tamanhos das partículas. A coleta das amostras foi realizada com o auxílio de escavadeiras mecânicas, que ao removê-las as fragmentava em blocos de dimensões variadas. Somado a isso, no local de deposição dos resíduos não era feita nenhuma distinção ou seleção quanto ao tipo de resíduo, sendo depositado no mesmo local cinzas leves, de fundo, resíduos de FGD e outros. No local também havia o descarte de águas servidas utilizadas na UTE.

Face ao exposto, optou-se no presente trabalho por submeter as amostras aos processos de cominuição que levariam à fragmentação do material e sua conseqüente redução, conforme citado no item 3.3.1. Sob as perspectivas de aplicação do mesmo e baseado no fato que a fração mais fina é, normalmente, a responsável pelas principais características e comportamento dos materiais, escolheu-se trabalhar com o material passante na peneira de nº 10 (abertura de malha de 2,00 mm). Para a moagem do material utilizou-se um mini britador de mandíbula.

No processo de cominuição o material é reduzido pela combinação de impacto, compressão, abrasão e atrito. Estas ações combinadas podem levar à quebra de algumas



partículas e condicionar a caracterização e o comportamento do material. Sendo assim buscou-se minimizar ao máximo os efeitos desse processo, de forma que foram realizados procedimentos prévios à moagem do material, como o quarteamento, destorroamento com mão de gral e umedecimento do material, de modo que somente a fração do material que não era passível de desagregação por meio desses procedimentos era submetido a moagem.

Foram realizados ensaios granulométricos com todas as amostras coletadas e em amostras de cinza composta, solo e misturas de solo e cinza. As composições granulométricas são apresentadas na tabela 22. As curvas obtidas estão apresentadas no apêndice C.

Tabela 22 - Distribuição granulométrica das amostras individuais de cinzas.

AMOSTRA	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Final (%)	Silte (%)	Argila (%)	% #200	Gs	SUCS
<b>PA</b>	<b>Pontos de Superfície (0,50 &lt; p &lt; 0,75m)</b>								
PA-1	0	0	8	11	78	3	81	2,48	ML
PA-2	0	0	3	12	82	4	86	2,46	ML
PA-3	0	0	6	6	84	4	88	2,51	ML
PA-4	0	0	25	11	59	5	64	2,49	ML
PA-5	0	0	18	9	69	5	74	2,45	ML
PA-6	0	0	7	11	62	20	82	2,43	ML
PA-7	0	0	1	8	87	5	92	2,26	ML
PA-8	0	0	1	6	83	10	93	2,49	ML
PA-9	0	0	5	10	78	7	85	2,50	ML
PA-10	0	0	8	15	69	8	77	2,46	ML
PA-11	0	0	5	9	81	5	86	2,55	ML
PA-12	0	0	12	5	79	3	82	2,59	ML
PA-13	0	0	2	8	77	13	90	2,38	ML
PA-14	0	0	1	7	81	11	92	2,36	ML
PA-15	0	0	5	7	76	12	88	2,40	ML
PA-16	0	0	1	8	75	15	90	2,35	ML
PA-17	0	0	19	10	63	8	71	2,44	ML
PA-18	0	0	17	14	66	3	69	2,46	ML
PA-19	0	0	12	8	75	5	80	2,49	ML
PA-20 (PP-1)	0	0	11	24	47	18	65	2,21	ML
PA-21 (PP-2)	0	0	4	11	80	5	85	2,49	ML
<b>PP-1 (PA-20)</b>	<b>Pontos em Profundidade (&gt; 1,00m) (1)</b>								
PP-1 (1,00-1,25m)	0	0	8	14	68	10	78	2,34	ML
PP-1 (2,00-2,25m)	0	0	3	11	66	20	86	2,49	ML
PP-1 (3,00-3,25m)	0	0	9	9	76	6	82	2,44	ML
PP-1 (4,00-4,25m)	0	0	7	11	80	2	82	2,53	ML
PP-1 (5,00-5,25m)	0	0	0	7	88	5	93	2,36	ML
<b>PP-2 (PA-21)</b>	<b>Pontos em Profundidade (&gt; 1,00m) (2)</b>								
PP-2 (1,00-1,25m)	0	0	10	8	76	6	82	2,24	ML
PP-2 (2,00-2,25m)	0	0	1	9	87	3	90	2,40	ML
PP-2 (3,00-3,25m)	0	0	16	13	62	10	72	2,42	ML
PP-2 (4,00-4,25m)	0	0	3	14	78	5	83	2,42	ML
PP-2 (5,00-5,25m)	0	0	12	10	75	3	78	2,46	ML
PP-2 (6,00-6,25m)	0	0	7	17	71	5	76	2,47	ML
<b>CL</b>	<b>Cinza Leves</b>								
Pecém 1 (CL-1)	0	0	0	4	95	1	96	2,44	ML

Fonte: Elias (2018)

Em todas as amostras de cinzas analisadas a porcentagem de finos (material passante na peneira de abertura de malha de 0,074 mm) foi superior a 60%. Nos solos, notadamente, seu comportamento hidráulico e mecânico é regido pela fração fina presente, em particular pela presença de argilas. As partículas finas são dotadas de características singulares como alta superfície específica, fenômenos interfaciais de superfície (troca ou adsorção iônica, dupla camada difusa, intensa atividade elétrica...), entre outras, que são responsáveis, por exemplo, pela formação de agregados, atrito entre partículas, capacidade e retenção de água, capacidade de expansão e retração. Dessa forma a caracterização granulométrica torna-se essencial para compreender e prever o possível comportamento do material, dada sua aplicação.

A partir da granulometria observou-se que as cinzas são compostas principalmente por partículas do tamanho de silte, com frações menores de argila, areia fina e média, com porcentagem de finos acima de 60%. Com base nessa observação agrupou-se as amostras segundo o teor de finos, as separando em quatro grupos associados a quatro faixas de porcentagens de finos (TABELA 23). Esse foi o principal critério para seleção de amostras que seriam submetidas às demais análises, como explicado na seção *Materiais e Métodos*.

Tabela 23 - Faixas Granulométricas e amostras de cinzas selecionadas.

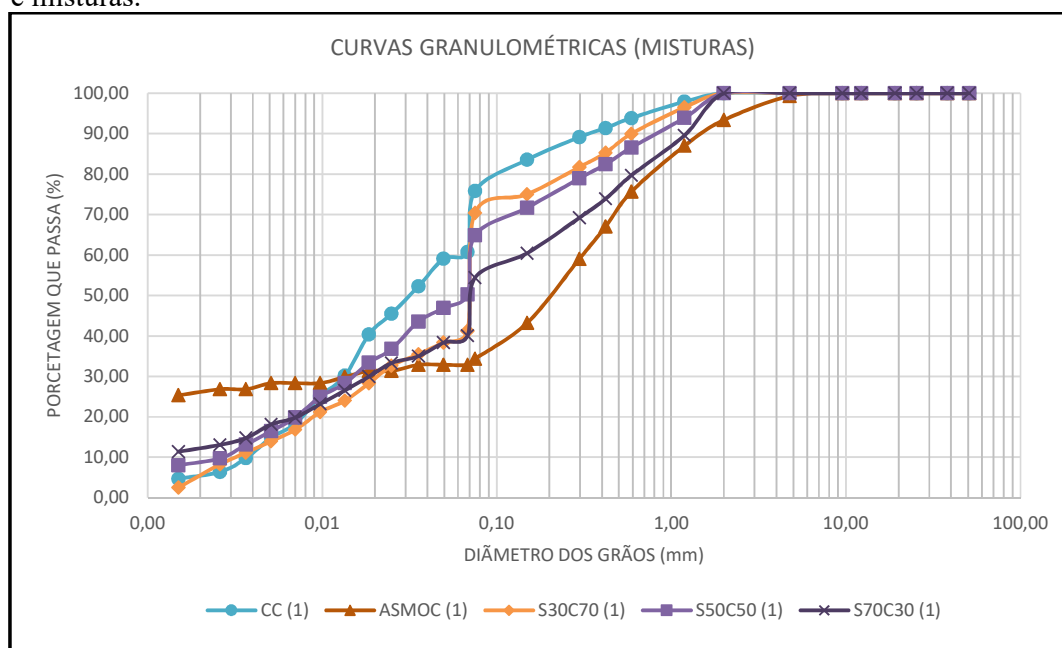
GRUPO	FAIXA (% FINOS)	AMOSTRAS POR FAIXA	AMOSTRAS SELECIONADAS
GRUPO 60	60 – 69%	PA-4; PA-18 e PA-20 (PP-1)	PA-4
GRUPO 70	70 – 79%	PA-1; PA-5; PA-10; PA-17; PP-1 (1,00-1,25m); PP-2 (3,00-3,25m); PP-2 (6,00-6,25m)	PA-17
GRUPO 80	80 – 89%	PA-2; PA-3; PA-6; PA-9; PA-12; PA-15; PA-19; PA-21 (PP-2); PP-1 (2,00-2,25m); PP-1 (3,00-3,25m); PP-1 (4,00-4,25m); PP-2 (1,00-1,25m) e PP-2 (5,00-5,25m)	PA-9; PP-1 (2,00-2,25m) e PP-2 (1,00-1,25m)
GRUPO 90	90 – 99%	PA-7; PA-8; PA-11; PA-13; PA-14; PA-16; PP-1 (5,00-5,25m) e PP-2 (2,00-2,25m)	PA-7 e PP-1 (5,00-5,25m)

Fonte: Elias (2018).

É possível notar nas curvas granulométricas (APÊNDICE C) um trecho quase vertical que compreende partículas com dimensões entre 0,06 mm e 0,08 mm, que pode estar associado as particularidades da própria técnica de sedimentação, como por exemplo, o tipo de defloculante (CUNHA *et al.*, 2014). Além disso, pode tal comportamento ter relação também com o processo de cominuição do material.

As cinzas compostas (mistura de todas as amostras de cinza) apresentaram uma porcentagem de finos superior a 70%. O solo utilizado apresentou um elevado teor de argila (aproximadamente 30%), além de uma pequena porcentagem de silte e com frações elevadas de areia média e fina. As misturas apresentaram curvas granulométricas de transição entre a curva do solo e da cinza composta (FIGURA 39), de acordo com a porcentagem de cada material presente, de modo que aumentava gradativamente a fração de partículas de tamanho de siltes, à medida em que a porcentagem de cinza aumentava na composição da mistura

Figura 39 - Curvas granulométricas das amostras de cinza composta (CC), solo (ASMOC) e misturas.



Fonte: Elias (2018).

Na tabela 24 são apresentadas a distribuição granulométrica da cinza composta, do solo e das misturas.

Tabela 24 - Distribuição granulométrica da CC, solo e misturas.

AMOSTRA	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Final (%)	Silte (%)	Argila (%)
CC	0	0	9	16	61	15
ASMOC	1	6	26	31	6	29
S30C70	0	0	15	15	56	14
S50C50	0	0	18	18	48	16
S70C30	0	0	26	20	36	18

Fonte: Elias (2018).

#### 4.8 Limites de Atterberg (LL & LP)

Os limites de liquidez e plasticidade são de suma importância para compreensão do comportamento do material. A coesão, e conseqüentemente, a resistência ao cisalhamento do solo tem relação direta com a plasticidade desse, uma vez que está associada com a deformação.

As cinzas submetidas aos ensaios para determinação dos limites de Atterberg, apresentaram-se como materiais sem liquidez (NL) e sem plasticidade (NP). Esse comportamento pode ser atribuído à sua mineralogia, composta principalmente por quartzos minerais pouco ativos. A textura e estrutura do material, composto essencialmente por partículas do tamanho de silte, com superfície específica relativamente baixa (quando comparado com materiais argilosos) e forma esférica, associada à sua estrutura cristalina, também contribuiu para os resultados obtidos. Vale ressaltar que o material em questão foi submetido a altas temperaturas, o que acredita-se também está relacionado ao comportamento apresentado.

O solo utilizado na composição das misturas possui um LL = 23,8 e um LP = 15,8, devido à presença da caulinita com outras mineralogias pouco ativas como o quartzo.

Os valores da mistura variam de acordo com a proporção de cada material presente na mistura. A amostra S30C70, devido ao elevado teor de cinza, mostrou-se não líquida e não plástica. As amostras S50C50 e S70C30 apresentariam em sua granulometria teores de argilas muito próximos, contudo as frações de areia média e fina conferiram à S70C30 uma menor plasticidade. Com a adição de cal, esperava-se um aumento do limite de plasticidade e/ou uma redução no limite de liquidez (VIZCARRA, 2010; NOGUEIRA *et al.*, 2016). Todavia, além do aumento do limite de plasticidade, houve também um aumento do limite de liquidez, que pode estar associado às interações entre as partículas dos constituintes, sobretudo no que diz respeito a troca iônica.

A tabela 25 apresenta os limites de liquidez e plasticidade para as cinzas, solos e misturas analisadas.

Tabela 25 - Limites de Atterberg (Continua).

<b>LIMITES DE ATTERBERG</b>			
<b>Amostras</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
<i>PA's</i>	NL	NP	-
<i>PP's</i>	NL	NP	-
<i>CC</i>	NL	NP	-
<i>CC-QI</i>	NL	NP	-

Tabela 25 - Limites de Atterberg (Conclusão).

<b>LIMITES DE ATTERBERG</b>			
<b>Amostras</b>	<b>LL</b>	<b>LP</b>	<b>IP</b>
<i>CL-1</i>	NL	NP	-
<i>Solo ASMOC</i>	23,75	15,77	7,98
<i>S30C70</i>	NL	NP	-
<i>S50C50</i>	31,01	28,28	2,73
<i>S70C30</i>	25,80	24,60	1,20
<i>S70C30Ca5 (1)</i>	33,95	32,71	1,24

Fonte: Elias (2018).

#### 4.9 Classificação SUCS

Os sistemas de classificação de solos fazem uso das características do material para agrupá-los de forma a facilitar sua identificação e propor aplicações para o mesmo.

Um desses sistemas de classificação é o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) oriundo do sistema de classificação de Casagrande, adaptado para uso em laboratório e em campo pelas agências americanas "*Bureau of Reclamation*" e "*U.S. Corps of Engineers*". O sistema faz uso dos resultados dos ensaios de determinação do Limite de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) (e do Índice de Plasticidade), associados às características granulométricas de cada material para classificar o solo. Trata-se de um sistema de classificação frequentemente utilizado na engenharia geotécnica e, portanto, pode auxiliar bastante na hora de propor uma utilização de determinado material para aplicação em uma obra de engenharia. Desse modo, os materiais e misturas, objetos deste trabalho, foram classificados segundo o SUCS, classificação essa apresentada na tabela 26.

Tabela 26 - Classificação SUCS das amostras de CC, solo e misturas.

<b>AMOSTRA</b>	<b>LL (%)</b>	<b>LP (%)</b>	<b>IP (%)</b>	<b>GRANULOMETRIA</b>	<b>SIMB. DO GRUPO</b>	<b>NOME DO GRUPO</b>
Cinza Composta	NL	NP	-	Material Fino	ML	Silte de baixa Compressibilidade
Solo ASMOC	24	16	8	Solo Fino	SC	Areia Argilosa
S30C70	NL	NP	-	Material Fino	ML	Silte de Baixa Compressibilidade
S50C50	31	28	3	Material Fino	ML	Silte de Baixa Compressibilidade
S70C30	26	25	1	Material Fino	ML	Silte de Baixa Compressibilidade
S70C30Ca5	34	33	1	Material Fino	ML	Silte de Baixa Compressibilidade

Fonte: Elias (2018).

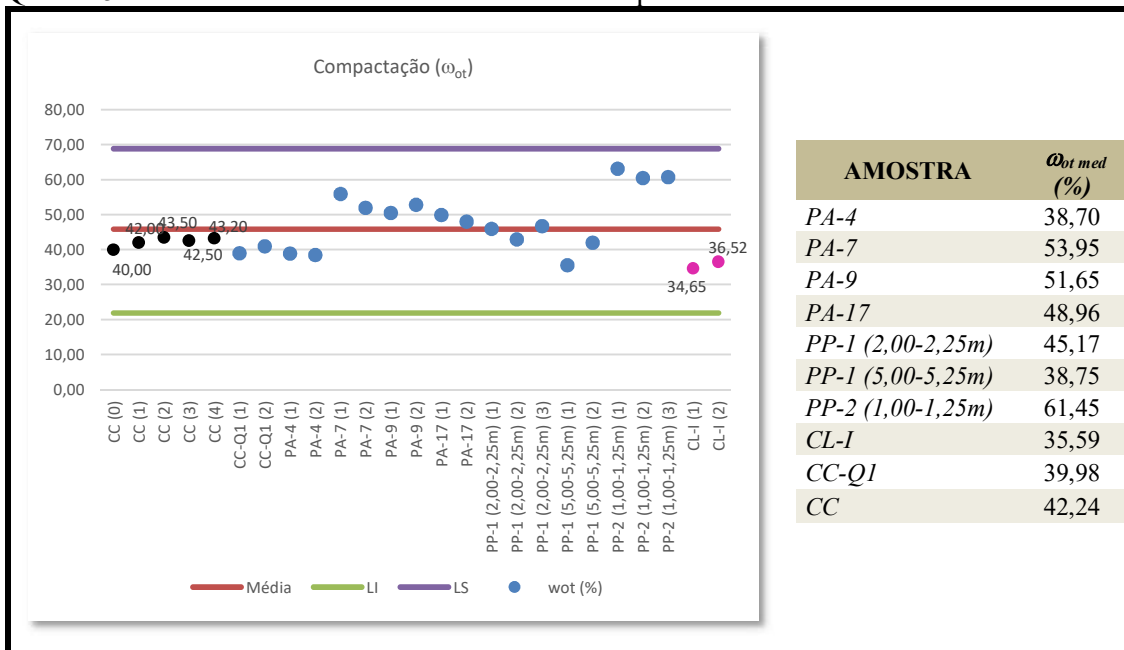
A cinza segundo o SUCS é classificada como um silte de baixa plasticidade (ML), enquanto o solo foi classificado como uma areia argilosa (SC). As misturas foram todas classificadas como ML, o que demonstra a maior influência das cinzas nas misturas, no que diz respeito às características granulométricas e plásticas do material.

Todavia, é possível observar, a partir dos resultados de outros ensaios, que apesar da mesma classificação SUCS, as misturas apresentam mudanças no comportamento do material com a adição do solo, o que contribuiu, por exemplo, para diminuição na condutividade hidráulica das misturas, como será visto em seções posteriores. Dessa forma, apesar da importância dos sistemas de classificação, esses não devem ser avaliados de maneira isolada e absoluta, devendo-se levar em consideração outros aspectos importantes, como estrutura das partículas, porosidade, interações entre as partículas, fenômenos interfaciais de superfície entre outros, para que um material com potencial para determinada aplicação não seja desprezado. É importante ressaltar que o sistema é algo aplicado para solos e o material em questão apesar das similaridades com solo, trata-se de um resíduo e que suas particularidades podem influenciar na classificação, gerando distorções quanto às suas propriedades e potenciais de aplicações.

#### **4.10 Compactação**

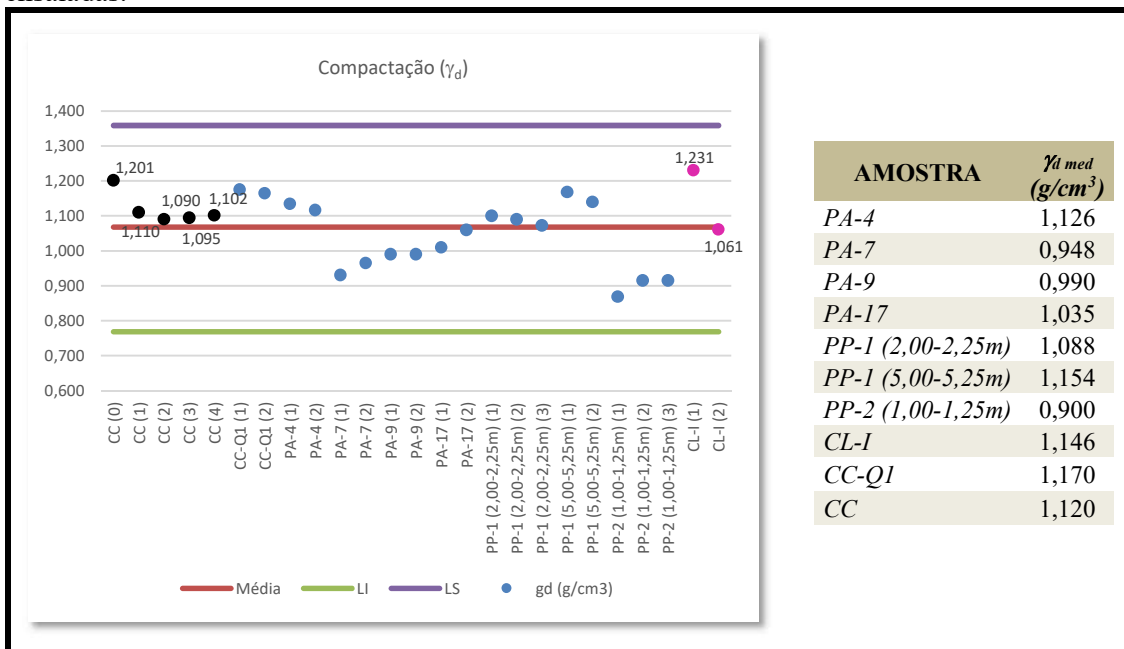
Nos quadros 5 e 6 são apresentados os valores de umidade ótima ( $\omega_{ot}$ ) e peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ), respectivamente, obtidos das amostras ensaiadas. Os ensaios de compactação foram feitos em duplicata, sendo apresentados também os valores médios dos referidos parâmetros.

Quadro 5 - Valores de umidade ótica determinados para as amostras ensaiadas.



Fonte: Elias (2018).

Quadro 6 - Valores de peso específico aparente seco máximo determinados para as amostras ensaiadas.



Fonte: Elias (2018).

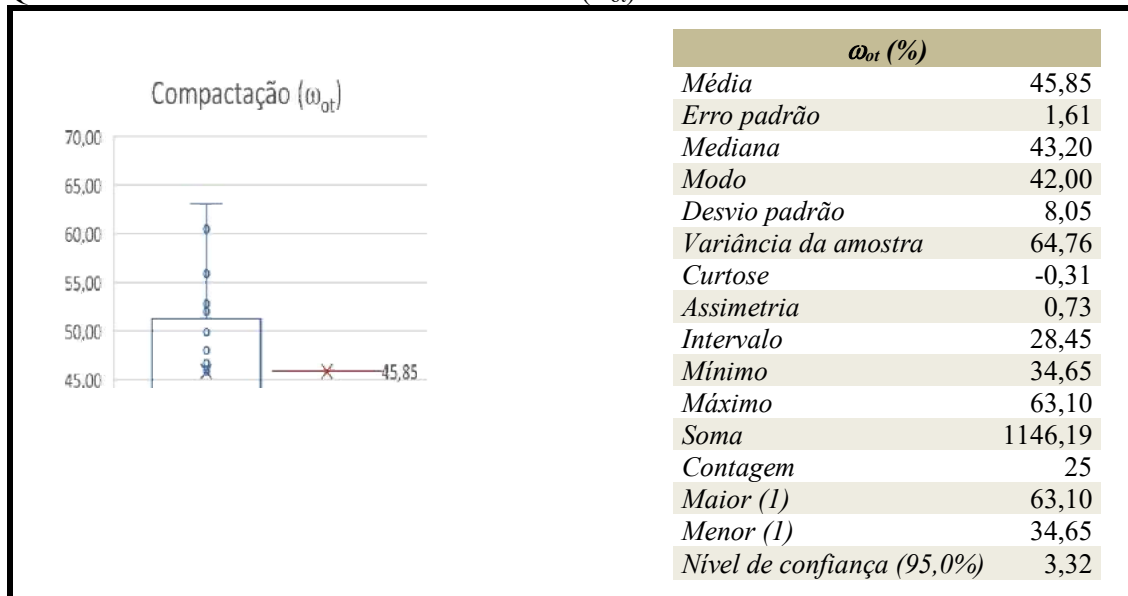
Os valores de umidade ótica e peso específico seco máximo encontrados são característicos de cinzas grossas (material mais presente nas amostras de cinzas ensaiadas).

A cinza composta apresentou valores próximos às médias, distante dessa menos que 1 desvio padrão, tanto para umidade ótica como para o peso específico seco máximo,

reforçando a proximidade entre a determinação estatística (QUADROS 7 e 8) e os valores obtidos através dos ensaios normatizados para o material compósito (cinza composta).

Apesar da variação significativa, a dispersão dos valores foi relativamente baixa para ambos os parâmetros obtidos pelos ensaios. Os dados mostram coeficientes de variação inferior a 25%, ou seja, com valores de desvio padrão relativamente baixos.

Quadro 7 - Análise estatística – umidade ótima ( $\omega_{ot}$ ).



Fonte: Elias (2018).

Quadro 8 - Análise estatística – peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_d$ ).

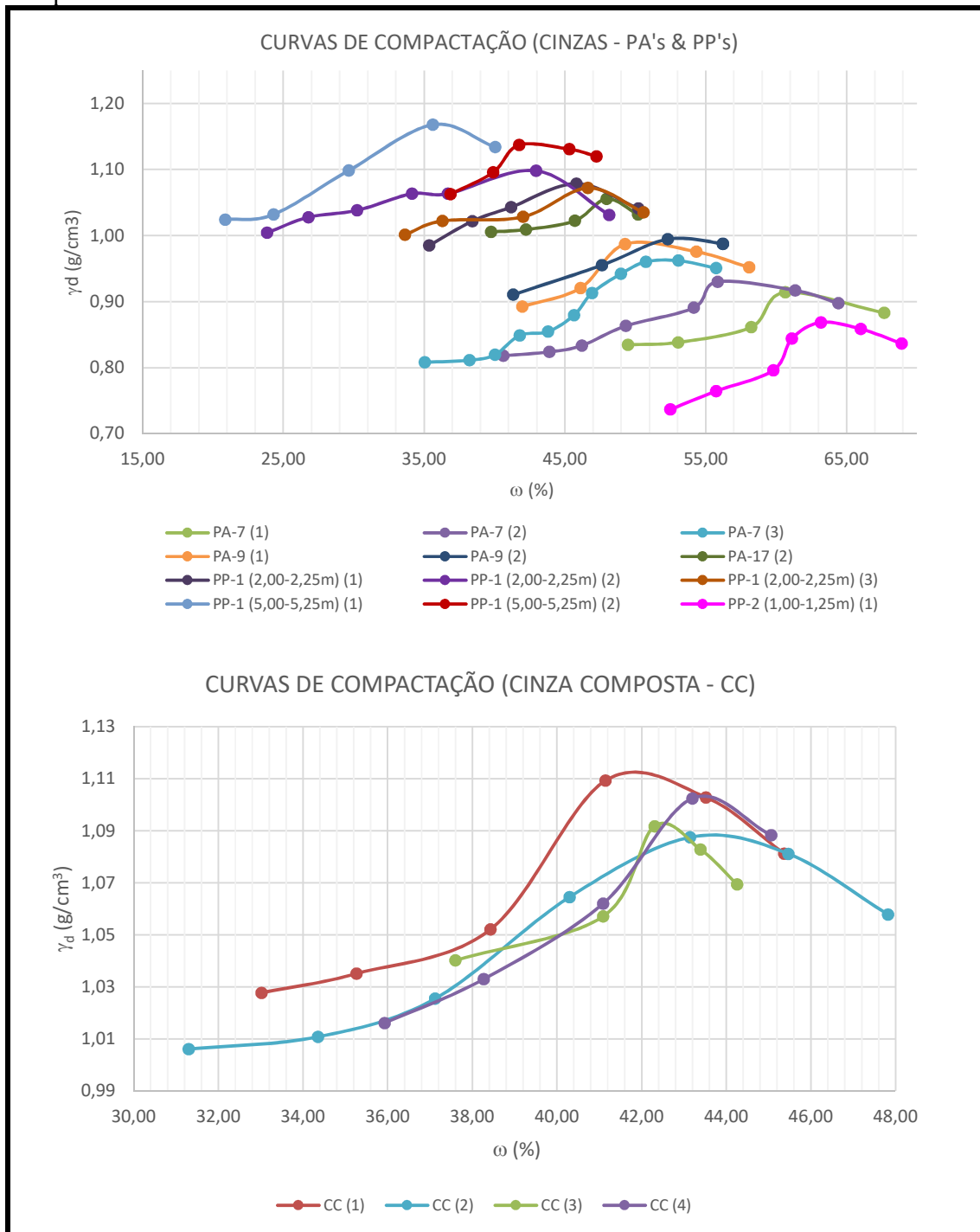
$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	
Média	1,068
Erro padrão	0,019
Mediana	1,090
Modo	1,090
Desvio padrão	0,097
Variância da amostra	0,009
Curtose	-0,590
Assimetria	-0,451
Intervalo	0,362
Mínimo	0,869
Máximo	1,231
Soma	26,698
Contagem	25
Maior (I)	1,231
Menor (I)	0,869
Nível de confiança (95,0%)	0,040

Fonte: Elias (2018).



A umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo obtidos através do ensaio de compactação foram os parâmetros com a maior variação nas amostras individuais de cinzas. Contudo, foi possível observar um padrão nas curvas de compactação (FIGURA 40).

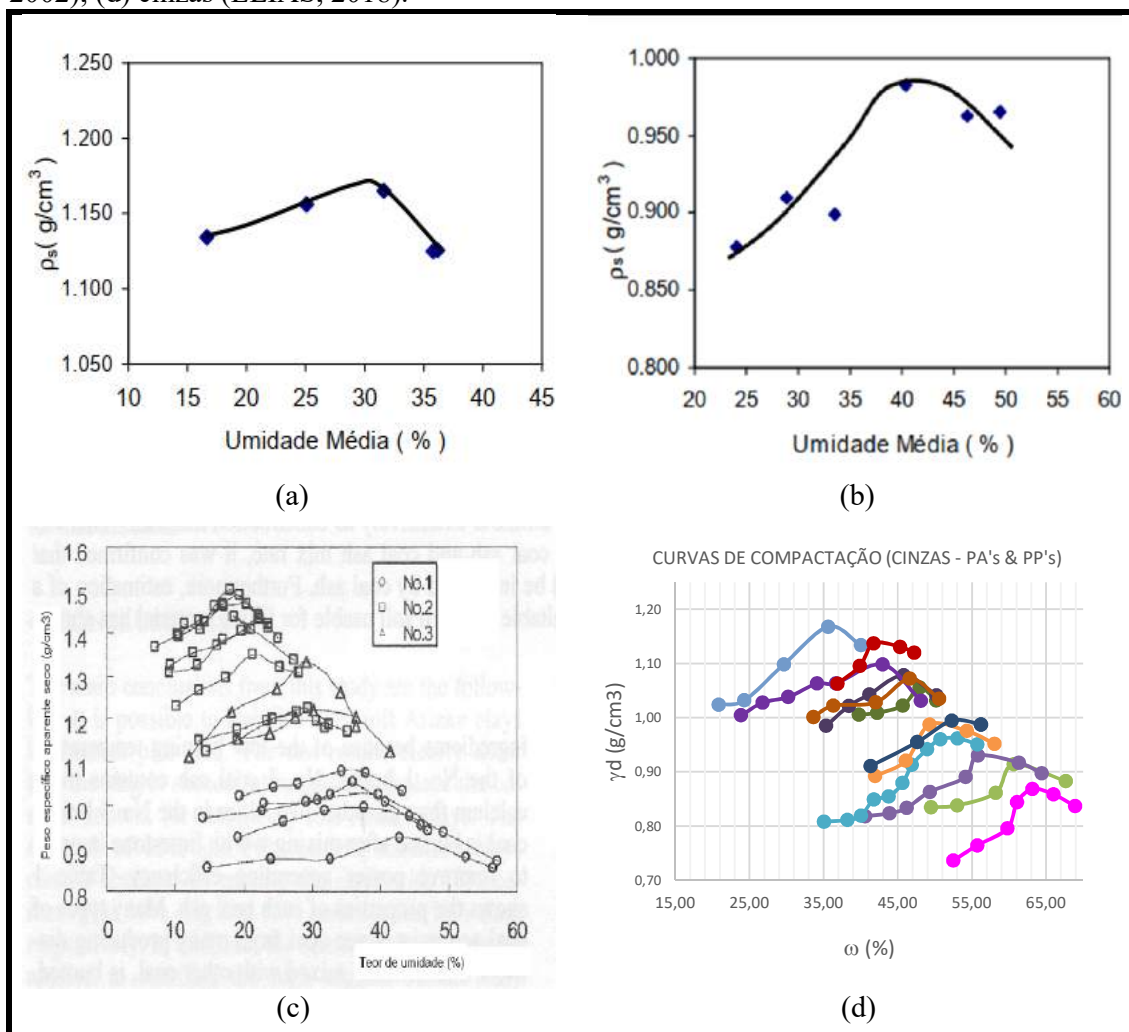
Figura 40 - Curvas de compactação das amostras selecionadas de cinzas individuais e de cinzas compostas.



Fonte: Elias (2018).

Esse comportamento foi observado tanto nas amostras ensaiadas no presente estudo, como nas curvas obtidas (para cinzas diferentes) por outros autores, como Ubaldo (2005) e Nieshikawa *et al.* (2002 *apud* MENDONÇA, 2007) (FIGURA 41). Da mesma forma os autores encontraram valores elevados de teores de umidade ótima, bem como valores similares de peso específico seco, variando dentro do intervalo de valores obtidos no presente estudo ( $0,869 < \gamma_d < 1,231 \text{ g/cm}^3$ ). Deve-se destacar que as amostras ensaiadas são uma mistura de resíduos variados (cinza grossa, cinza fina e resíduos de FGD), logo, é possível observar a presença dos dois tipos de curvas obtidas por Ubaldo (2005), para cinza grossa e cinza fina, entre as amostras ensaiadas.

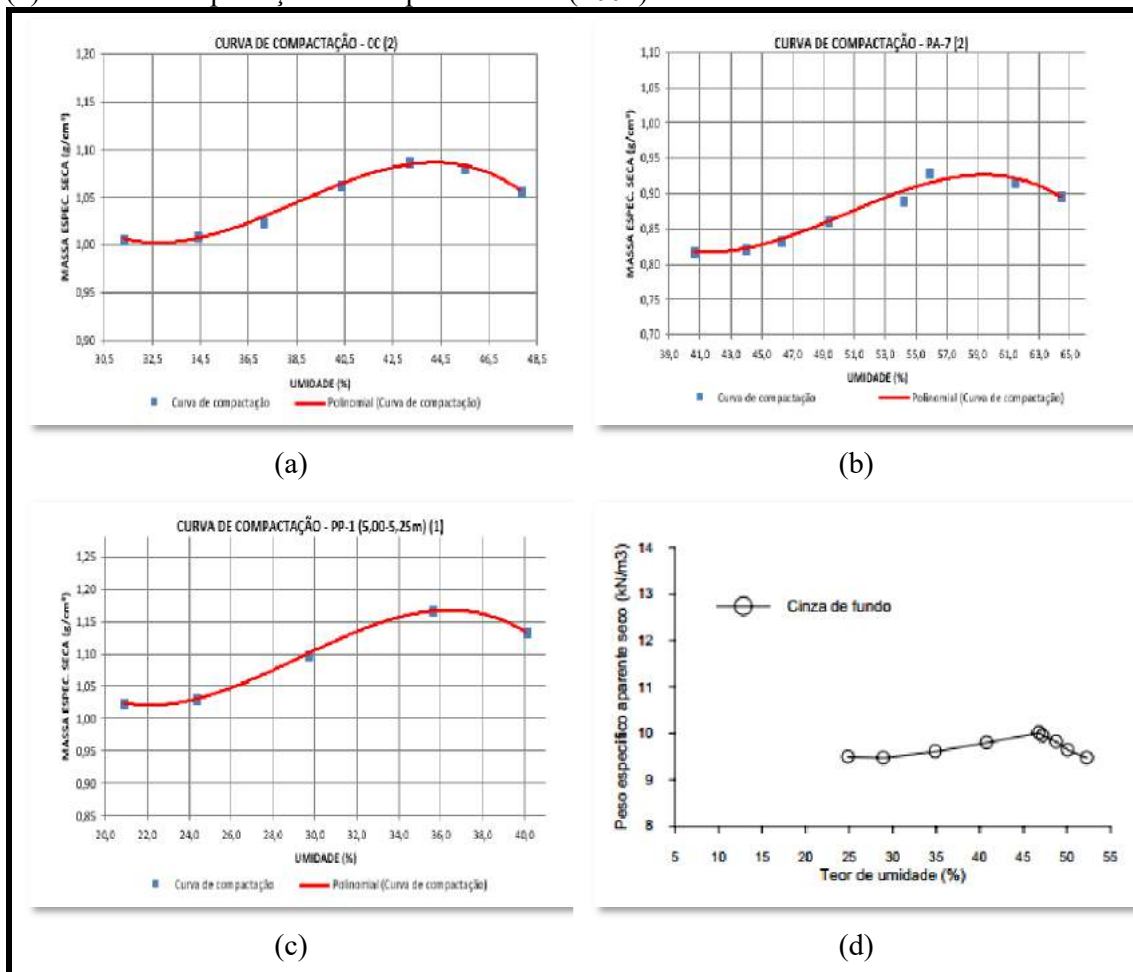
Figura 41 - Curvas de compactação obtidas por diferentes autores: (a) cinzas leves (UBALDO, 2005); (b) cinzas grossas (UBALDO, 2005); (c) cinzas sem distinção (NIESHIKAWA *et al.*, 2002); (d) cinzas (ELIAS, 2018).



Fonte: Elias (2018).

Para solos, curvas no formato parabólico são as que melhor descrevem as variações numéricas para os parâmetros obtidos através do ensaio. Ou seja, a parábola é o gráfico que melhor se adequa à distribuição dos pontos obtidos experimentalmente, sendo o modelo matemático que melhor descreve o fenômeno físico de variação do peso específico seco com a variação do teor de umidade com a aplicação da técnica de compactação. No tratamento dos dados do ensaio de compactação das cinzas, pôde-se observar que curvas polinomiais de 3° grau foram as curvas que melhor descreveram as variações (do peso específico seco com a umidade) durante a compactação do material. Esse foi o modelo matemático que melhor descreveu o comportamento mecânico do material, que como descreve Heineck (2002), apresenta elevados teores de umidade ótima e um pico de densidade máxima pouco pronunciado (FIGURA 42).

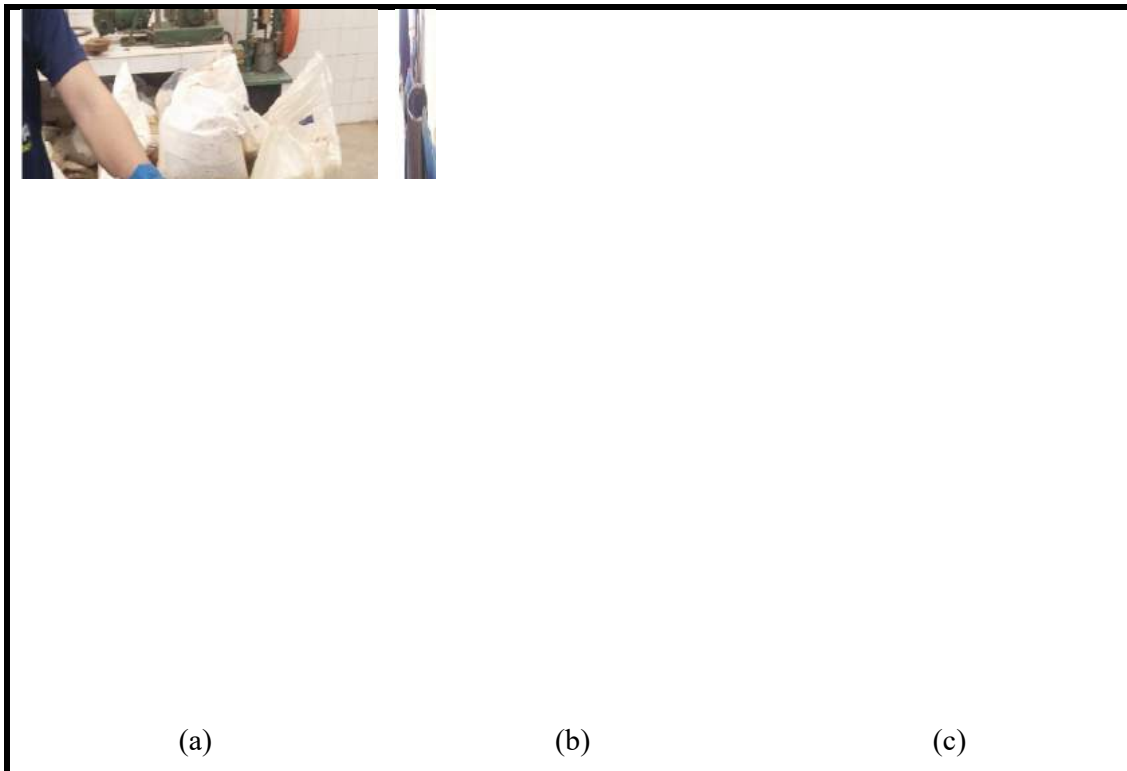
Figura 42 - Curvas polinomiais de 3° grau ajustadas aos pontos obtidos no ensaio de compactação para diferentes amostras: (a) cinza composta; (b) PA-7; (c) PP-1 (5,00-5,25m); e (d) curva de compactação obtida por Heineck (2002).



Fonte: Elias (2018).

As cinzas de uma forma geral apresentaram algumas particularidades durante o ensaio. Os pontos correspondentes aos valores de umidade ótima estão associados a um material com um aspecto de elevada saturação. Durante a moldagem do corpo de prova, nesse ponto, havia dificuldades de moldagem e trabalhabilidade do material, sendo observada também pequena exsudação (FIGURA 43). Visualmente o ponto que o material apresentava aspectos de estar na umidade ótima (teor de umidade para o qual o material apresenta melhor comportamento mecânico e hidráulico) estava abaixo do teor de umidade ótima encontrada pelo ensaio.

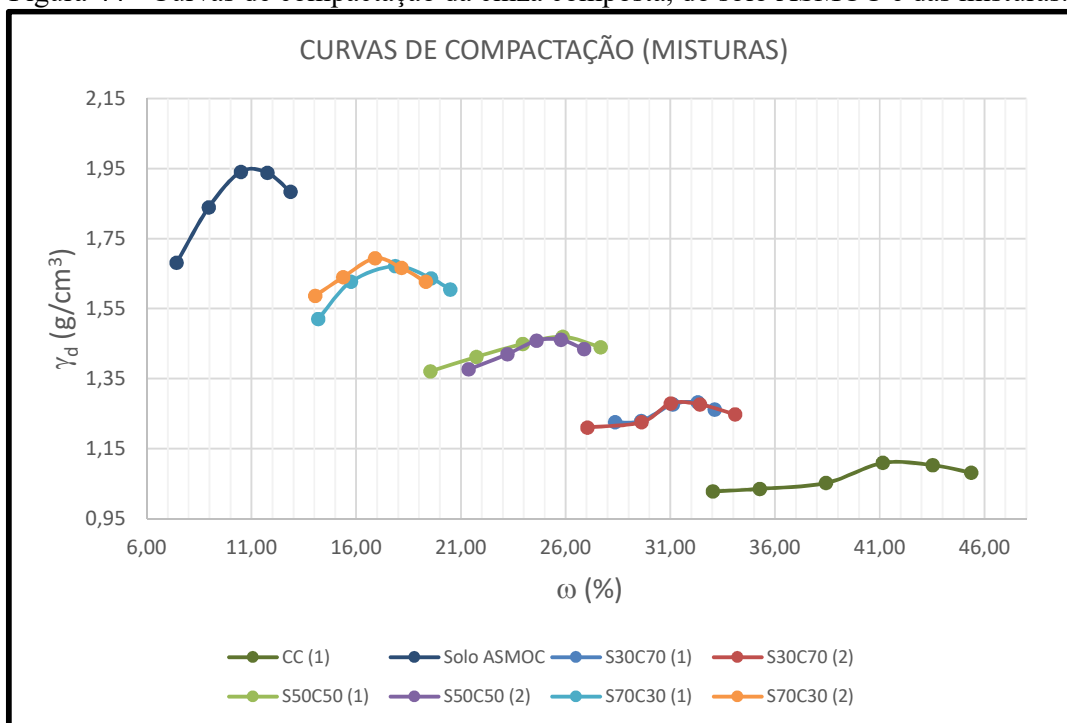
Figura 43 - Aspectos táteis e visuais observados nos pontos de umidade ótima das amostras de cinzas ensaiadas.



Fonte: Elias (2018).

Os ensaios de compactação do solo (ASMOC) retornaram valores característicos do material ensaiado, argila arenosa. As misturas apresentaram valores tanto de umidade ótima quanto de peso específico seco máximo entre os valores da cinza composta e do solo, sendo tanto menor a umidade e maior o peso específico quanto maior for a quantidade de solo presente nas misturas (FIGURA 44).

Figura 44 - Curvas de compactação da cinza composta, do solo ASMOC e das misturas.



Fonte: Elias (2018).

Os ensaios para todas as amostras foram feitos em duplicatas, de modo que na tabela 27 são apresentados a média dos valores obtidos para a umidade ótima e peso específico seco máximo.

Tabela 27 - Valores médios de  $\omega_{ot}$  e  $\gamma_d$  da CC, solo ASMOC e misturas.

AMOSTRA	$\omega_{ot}$ méd (%)	$\gamma_d$ méd (g/cm <sup>3</sup> )
CC	42,24	1,120
Solo ASMOC	11,00	1,951
S30C70	32,10	1,285
S50C50	25,82	1,457
S70C30	17,45	1,679
S70C30Ca5	21,95	1,574

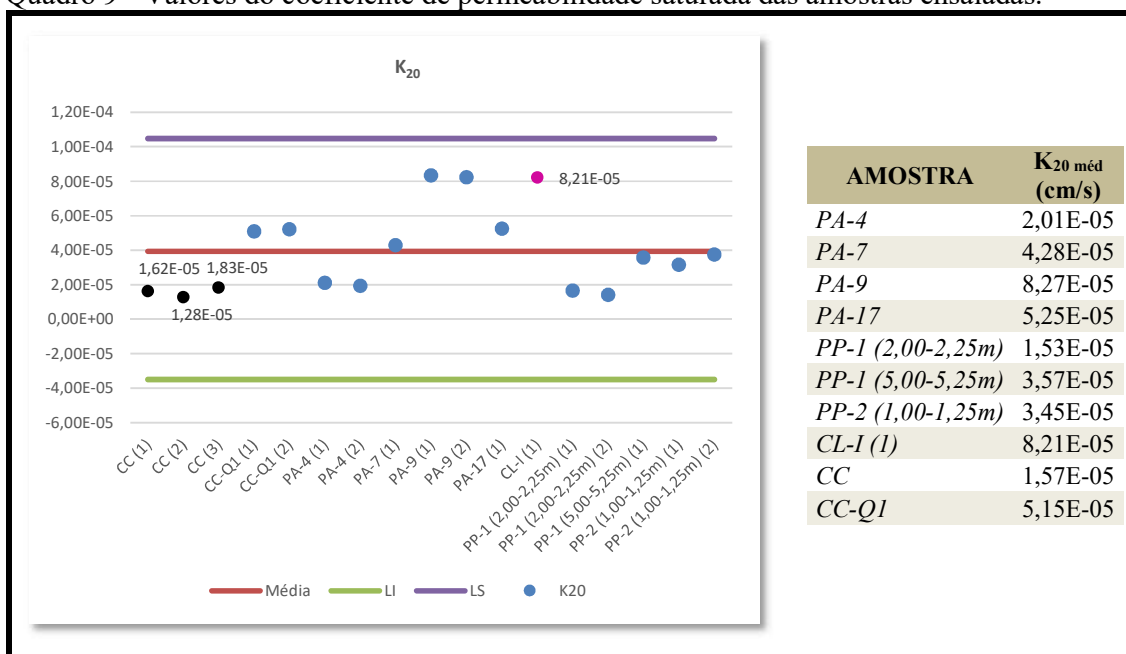
Fonte: Elias (2018)

#### 4.11 Condutividade Hidráulica

Apesar de se tratar de um material com elevada proporção de finos, a condutividade hidráulica das cinzas é alta quando comparada a outros materiais com a mesma distribuição granulométrica, com valores de permeabilidade semelhante a materiais granulares (QUADRO

9). Isso pode ser atribuído a diversos fatores como: forma esférica das partículas, observado no ensaio de microscopia eletrônica de varredura, a não formação de aglomerados, fenômenos interfaciais de superfície menos intensos, material de meso a macroporoso corroborado pelo ensaio de adsorção, entre outros motivos.

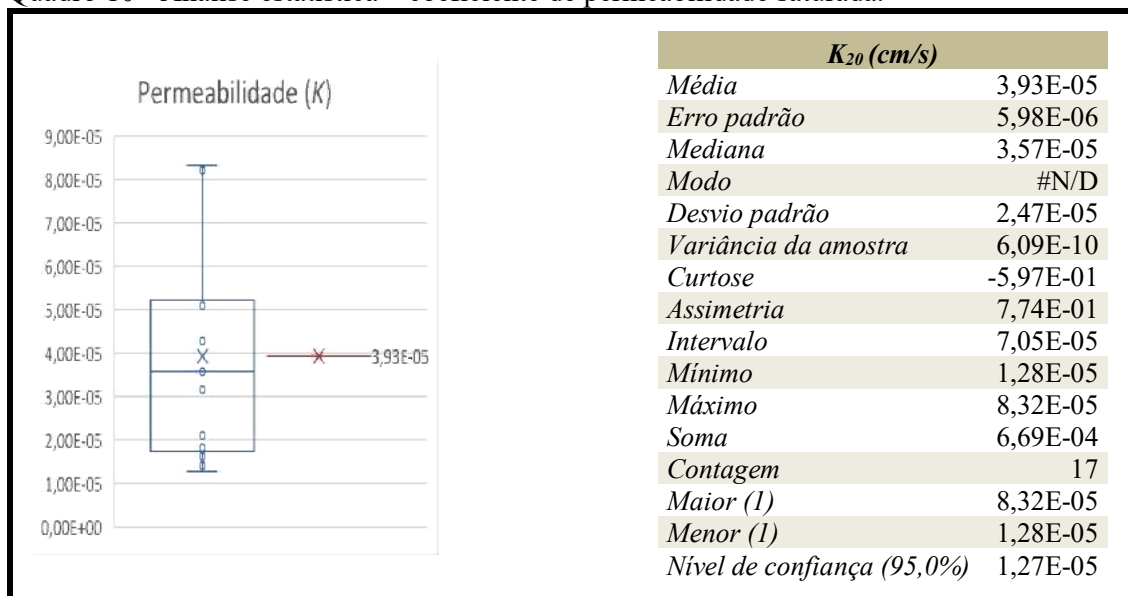
Quadro 9 - Valores do coeficiente de permeabilidade saturada das amostras ensaiadas.



Fonte: Elias (2018).

A análise estatística (QUADRO 10), mais uma vez retornou valores médios próximos dos valores da cinza composta. A permeabilidade dessa ficou distante da média menos que 1 desvio padrão, o que mostra que a proposta de um material composto da mistura de todas as cinzas pode apresentar valores representativos para todo material.

Quadro 10 - Análise estatística – coeficiente de permeabilidade saturada.



Fonte: Elias (2018).

A condutividade hidráulica das cinzas foi da mesma magnitude da condutividade encontrada em outros estudos para cinzas leves, como pode ser visto na tabela 28. Deve-se lembrar que o material aqui utilizado foi submetido a um processo de cominuição trabalhando-se apenas com material passante na peneira n° 10 (abertura de malha de 2,00mm). Isso explica o fato do material possuir condutividade hidráulica menor do que a cinza grossa.

Tabela 28 - Coeficientes de permeabilidade saturada de cinzas obtidos em outros estudos.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA – <i>K</i> (cm/s)							
Heineck (2002)		Cruz (2004)		Ubaldo (2005)		Elias (2018)	
CG	CL	CG	CL	CG	CL	CC	CL
1,78x10 <sup>-4</sup>	5,67x10 <sup>-5</sup>	8,44x10 <sup>-5</sup>	5,43x10 <sup>-5</sup>	2,45x10 <sup>-4</sup>	6,0x10 <sup>-5</sup>	1,57x10 <sup>-5</sup>	8,21x10 <sup>-5</sup>

Fonte: Elias (2018).

CG – Cinzas Grossas; CL – Cinzas Leves; CC – Cinzas Compostas.

O solo utilizado nos ensaios foi retirado da cobertura do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC). Trata-se de um solo com um teor de argila em torno de 30%, de modo que o ensaio de permeabilidade saturada apresentou um coeficiente de permeabilidade de  $1,09 \times 10^{-7}$  cm/s, magnitude a qual credencia o material para o emprego como *liner*. As misturas de solo e cinzas em diferentes proporções mostraram que um aumento gradativo da quantidade de solo resultou na diminuição da condutividade hidráulica da mistura. Foram avaliadas três proporções distintas de mistura de solo e cinzas, uma com 30% de solo,

outra com 50%, e a última com 70% de solo. A amostra que apresentou a menor coeficiente de permeabilidade saturada foi a mistura S70C30 com  $4,26 \times 10^{-7}$  cm/s (TABELA 29).

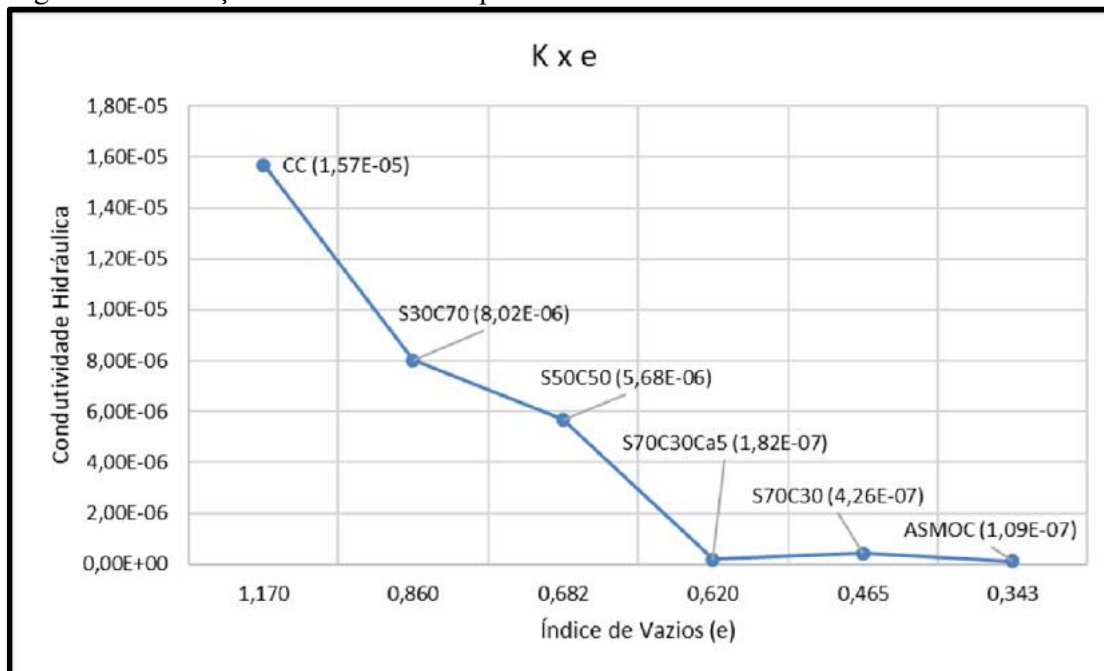
Tabela 29 - Coeficientes de permeabilidade saturada das amostras de CC, solo e misturas.

AMOSTRA	$K_{20} \text{ méd (cm/s)}$	$\omega_{ot} \text{ méd (\%)}$	$\gamma_d \text{ méd (g/cm}^3\text{)}$	Gs	e
CC (1)	1,57E-05	42,24	1,120	2,43	1,170
Solo ASMOC (1)	1,09E-07	11,00	1,951	2,62	0,343
S30C70 (1)	8,02E-06	32,10	1,285	2,39	0,860
S50C50 (1)	5,68E-06	25,82	1,457	2,45	0,682
S70C30 (1)	4,26E-07	17,45	1,679	2,46	0,465
S70C30Ca5	1,82E-07	21,95	1,574	2,55	0,620

Fonte: Elias (2018).

Essa redução deve-se a fatores como a formação de aglomerados de partículas, a presença do argilomineral caulinita, de modo que as partículas apresentam forma lamelar e menores dimensões preenchendo assim os vazios deixados pelas partículas esféricas, diminuindo o índice de vazios (FIGURA 45).

Figura 45 - Variação do coeficiente de permeabilidade de acordo com o índice de vazios.



Fonte: Elias (2018).

A adição de cal a misturas de solo e cinza é amplamente estudada, sobretudo para utilização em camadas de pavimento, em especial pelo aumento considerável da resistência do



material (BARROS, 2015; VASCONCELOS, 2018). Neste trabalho foi avaliado também a influência de cal na condutividade hidráulica do material.

A S70C30 foi a mistura que apresentou o menor coeficiente de permeabilidade saturada entre as misturas analisadas, e, portanto, foi a ela adicionada o teor de 5% de cal em massa. Observou-se uma redução no coeficiente de permeabilidade, que passou de  $4,26 \times 10^{-7}$  cm/s, sem a adição da cal, para  $1,82 \times 10^{-7}$  cm/s, com 5% de cal em massa. Dessa forma a amostra S70C30Ca5, mostrou-se, também, adequada para uso como barreira impermeabilizante.

Elias (2015) adicionou bentonita a cinzas leves, e observou que mesmo com adição de elevados teores de bentonita (até 20%), não houve reduções significativas na permeabilidade da mistura. O autor concluiu que a cinza, devido a fenômenos como a troca iônica, inibia o inchamento da bentonita, de modo que para cinza leve pura obteve um coeficiente de permeabilidade saturada de  $8,5 \times 10^{-5}$  cm/s, a permeabilidade da bentonita era de  $1,0 \times 10^{-12}$  cm/s, e a mistura com 20% de bentonita foi a que apresentou a menor permeabilidade,  $1,2 \times 10^{-6}$  cm/s.

O solo misturado à cinza composta tem como principal argilomineral presente na sua constituição a caulinita. Como trata-se de um argilomineral, onde fenômenos de superfície como a troca iônica e dupla camada difusa são menos intensos do que em outros argilominerais, como a montmorilonita, que possui uma superfície específica consideravelmente maior, as interações entre o solo e as cinzas também foram menores, sendo a condutividade hidráulica obtida inferior à das misturas de cinzas com bentonita, tornado a S70C30, uma mistura com características hidráulicas consideradas satisfatórias para seu emprego como *liner*.

#### 4.12 Cisalhamento Direto

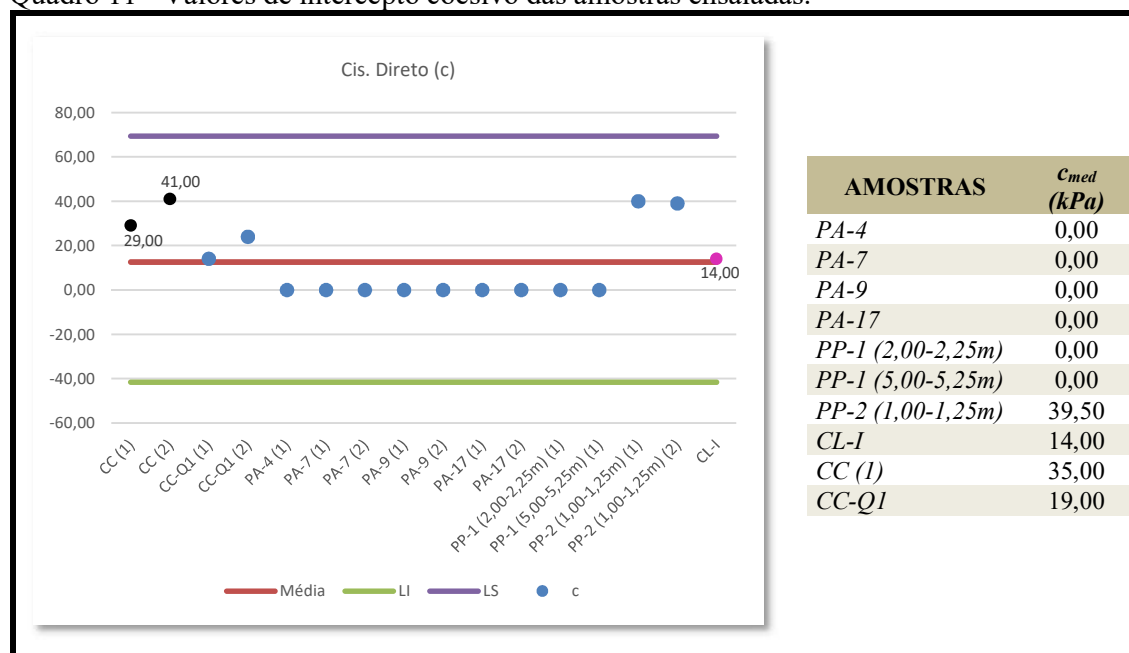
Devido à grande quantidade de amostras de cinzas coletadas, em diferentes locais da bacia de armazenamento, optou-se pela realização de ensaios em uma quantidade limitada de amostras, que podem não refletir totalmente a variação dos parâmetros de resistência das cinzas. Essa variação pode ser maior devido a diversos fatores como: a presença de contaminantes inorgânicos, matéria orgânica, interação entre partículas, fenômenos físico-químicos, que dentre outros motivos podem ter levado aos valores de intercepto coesivo apresentados pelo material. Além disso, há em algumas amostras, resíduos de dessulfuração, o que significa a presença de óxido de cálcio, que com a cinza (material pozolânico) pode levar a cimentação do material, influenciando o comportamento mecânico do mesmo.

Na impossibilidade de realizar análises com todas as amostras individualmente, e da realização de ensaios triaxiais com todas as amostras selecionadas, optou-se pela realização de ensaio triaxial tipo CD, em duplicata, para amostra de cinza composta. O principal objetivo é comparar os resultados obtidos com os do ensaio de cisalhamento direto, devido principalmente aos valores de intercepto coesivo obtidos nesse.

Os ensaios de cisalhamento direto retornaram, para a maioria das amostras individuais de cinzas analisadas, valores característicos de materiais granulares, algo já esperado pelas características texturais e morfológicas do material. Todavia, para as cinzas compostas, cinzas leves e a amostra PP-2 (1,00-1,25m) observou-se valores de intercepto coesivo que diferiu dos demais resultados encontrados.

Os valores de intercepto coesivo (QUADRO 11) para as cinzas individuais analisadas apresentaram-se dentro do valor esperado, exceto para PP-2 (1,00-1,25m).

Quadro 11 - Valores de intercepto coesivo das amostras ensaiadas.

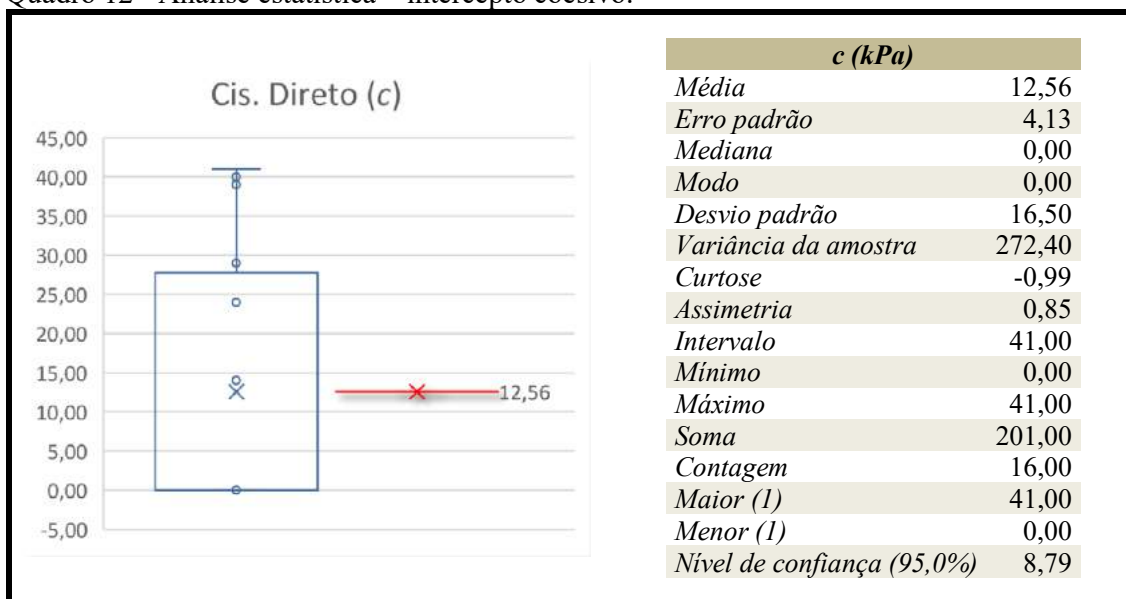


Fonte: Elias (2018).

Por se tratar de um material granular, com partículas de forma arredondada, não plástico, a maioria das amostras apresentou intercepto coesivo nulo. Entretanto, as amostras de cinza composta, de cinza leve e PP-2 (1,00-1,25m) apresentaram interceptos coesivos não nulos. Esse não era um resultado esperado, uma vez que essas amostras apresentaram características texturais e morfológicas semelhantes às outras amostras individuais e não apresentaram plasticidade. Por esse motivo a análise estatística (QUADRO 12) retornou um

elevado desvio padrão para esse parâmetro o que levou a média para um valor mais distante da coesão da cinza composta.

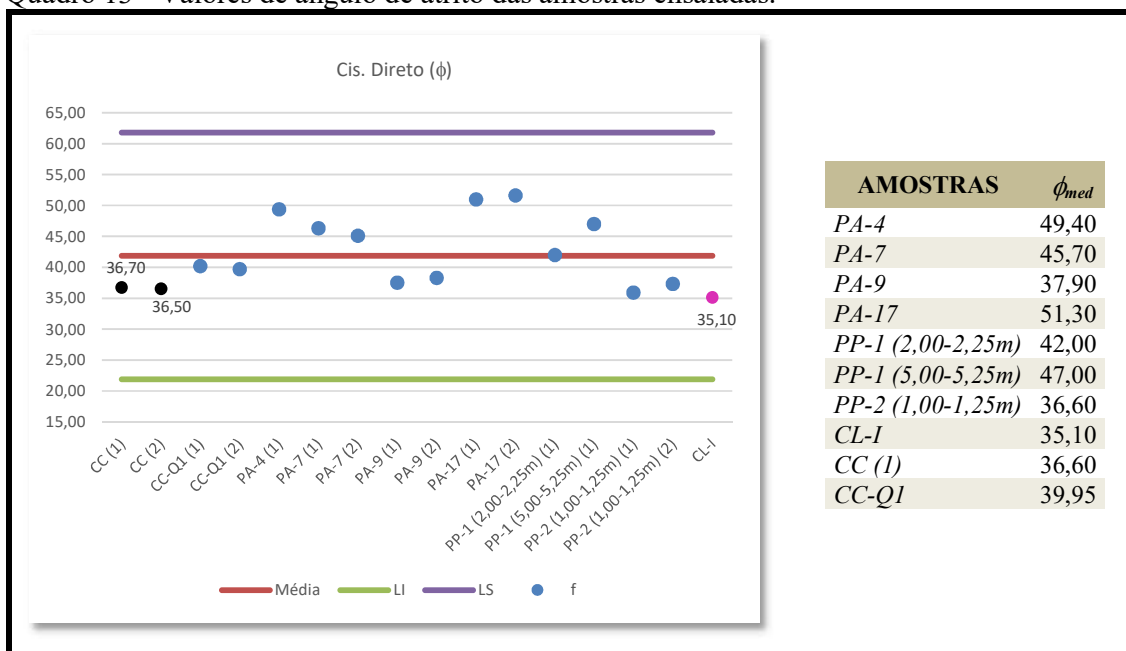
Quadro 12 - Análise estatística – intercepto coesivo.



Fonte: Elias (2018)

Os valores de ângulo de atrito encontrados nos ensaios (QUADRO 13) estão dentro de um intervalo de solos granulares medianamente compactos a muito compactos.

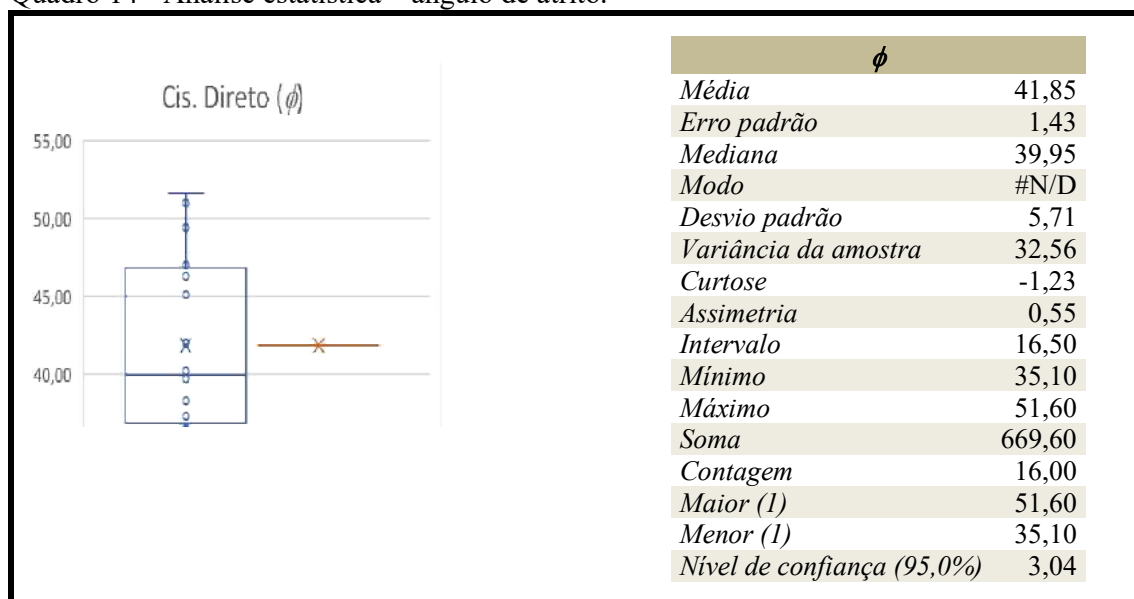
Quadro 13 - Valores de ângulo de atrito das amostras ensaiadas.



Fonte: Elias (2018)

A análise estatística para o parâmetro ângulo de atrito (QUADRO 14), novamente retornou um o valor médio próximo ao valor encontrado para cinza composta, distante desse menos que 1 desvio padrão, estando os valores dentro da faixa de materiais medianamente compactos a compactos.

Quadro 14 - Análise estatística – ângulo de atrito.



Fonte: Elias (2018)

O ensaio de resistência ao cisalhamento do solo retornou os valores esperados para as características do material, uma areia argilosa. Para as misturas os ângulos de atrito apresentaram os valores esperados dentro da proporção de cada material. Entretanto, para intercepto coesivo mais uma vez obteve-se valores diferentes do que se esperava, com base nos resultados que vinha sendo apresentados. A amostra S30C70 apresentou um resultado plausível para o intercepto coesivo, partindo da premissa da maior porcentagem de cinzas compostas (material sem plasticidade), da qual esperava-se um valor de intercepto coesivo nulo. No entanto, o valor de intercepto coesivo obtido para a mistura ( $c = 0$  kPa) contradiz os resultados obtidos para cada material (solo e cinza composta) que apresentaram intercepto coesivo diferente de zero. Já as misturas S50C50 e S70C30 apresentaram valores coerentes com a composição das mesmas. Na tabela 30 são apresentados os valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo obtidos para as amostras de CC, solo e misturas, através do ensaio de cisalhamento direto.

Tabela 30 - Valores de ângulo de atrito e intercepto coesivo para as amostras de CC, solo e misturas.

AMOSTRAS	$\varphi$	$c$	$\varphi_{med}$	$c_{med}$
CC (1)	36,7	29	36,6	35
CC (2)	36,5	41		
CC-Q1 (1)	40,2	14	39,95	19
CC-Q1 (2)	39,7	24		
Solo ASMOC	29,1	45	29,1	45
S30C70 (1)	39,4	0	38,85	0
S30C70 (2)	38,3	0		
S50C50 (1)	32,2	41	32,2	41
S70C30 (1)	30,0	17	29,8	32,5
S70C30 (2)	29,6	48		
S70C30Ca (1)	58,5	17	58,5	58,5

Fonte: Elias (2018)

Em diversos estudos com cinzas de carvão mineral, sobretudo os que avaliam a utilização desse material em camadas de pavimento (LOPES, 2011; BARROS, 2015 e VASCONCELOS, 2018), foi adicionado à mistura, a cal, um agente cimentante. A adição da cal produz, entre outros fenômenos, a aglomeração e floculação de partículas, mudando a textura do material. Através das análises realizadas os autores observaram que a adição da cal à mistura resultou em um aumento da resistência.

Com intuito de avaliar o comportamento da mistura com adição de cal a partir de uma perspectiva geotécnica, foi adicionada a melhor mistura S70C30 (para aplicação como barreira impermeabilizante) 5% de cal em massa. O que se observou a partir dos ensaios de cisalhamento direto da mistura S70C30Ca5, foram ganhos significativos na resistência do material, o que juntamente com suas características hidráulicas confere ao material potencial para aplicação como barreira impermeabilizante.

Para barreiras impermeabilizantes, além dos estudos de condutividade hidráulica, é igualmente importante a determinação dos parâmetros de resistência. Solicitações devido a acomodação e o peso próprio dos resíduos, cargas pontuais, mudanças de temperatura, características do fluido percolante, entre outras, atuando sobre essa camada, em especial sobre os taludes, pode levar ao aparecimento de uma superfície de deslizamento ou ruptura, sendo imprescindível a determinação dos parâmetros de resistência para avaliar a estabilidade de barreiras impermeabilizantes.

Como já foi dito anteriormente, dois ensaios de compressão triaxial do tipo CD foram realizados, com o intuito de verificar a validade dos resultados obtidos pelo ensaio de

cisalhamento direto, além de avaliar os resultados apresentados pelas amostras de cinza composta.

#### 4.13 Compressão Triaxial

Os ensaios triaxiais realizado no presente trabalho, foram feitos exclusivamente para cinza composta. Os resultados dos ensaios de compressão triaxial apresentaram valores de ângulos de atrito próximos aos encontrados pelos ensaios de cisalhamento direto (TABELA 31). O intercepto coesivo, no entanto, foi nulo, o que era esperado e que não se observou no ensaio de cisalhamento direto. Contudo, a partir de todas as análises realizadas, tanto das cinzas como do solo e das misturas, aliados as características dos ensaios e dos materiais, não se deve desconsiderar os valores de intercepto coesivo encontrados nos ensaios de cisalhamento direto. Há ainda um outro aspecto importante a se considerar nas análises realizadas, o tempo, tanto para saturação como para o adensamento da amostra

Tabela 31 - Parâmetros de resistência ( $\phi$  e  $c$ ) encontrados através do ensaio de compressão triaxial e cisalhamento direto.

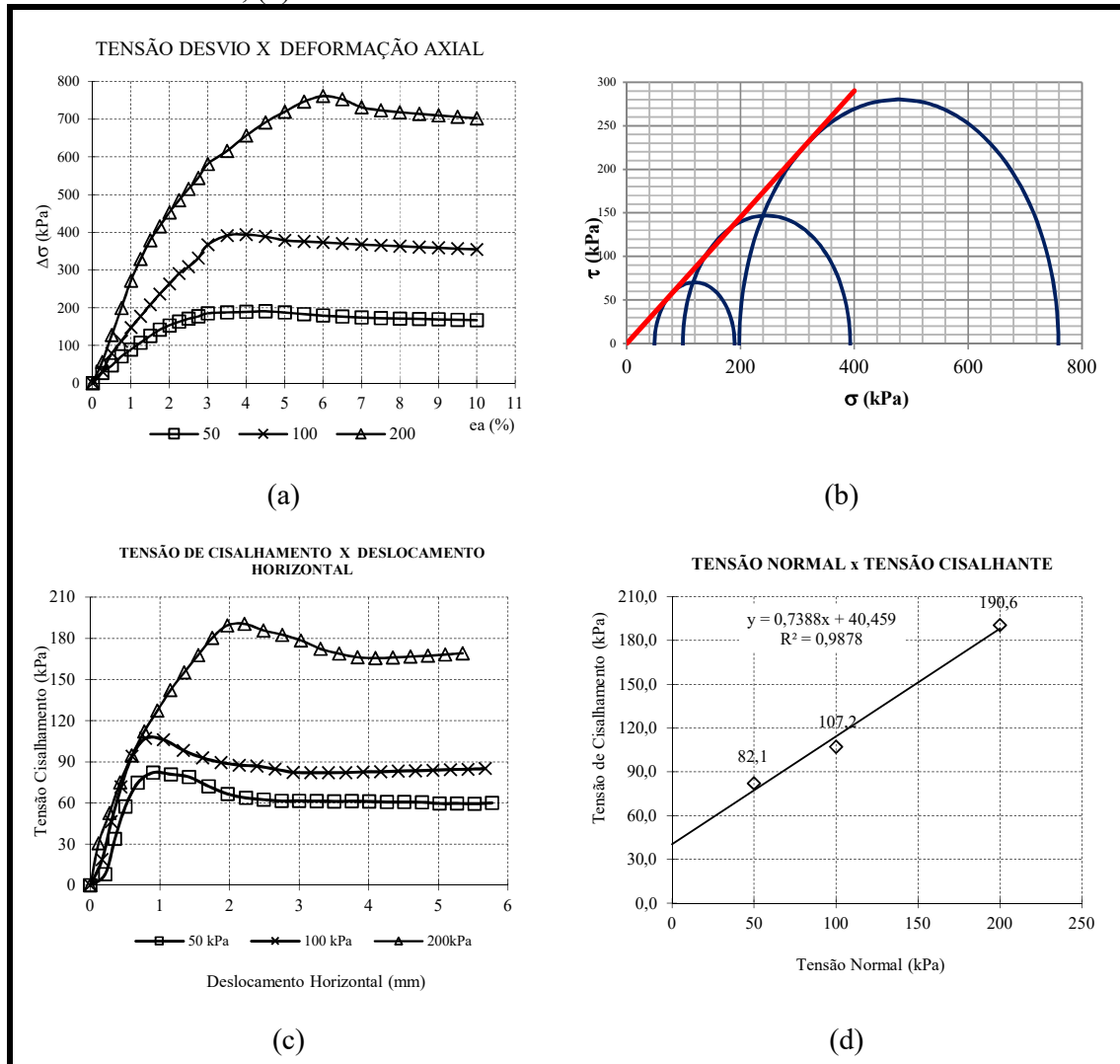
ENSAIOS DE RESISTÊNCIA				
AMOSTRA	Triaxial		Cisalhamento Direto	
	$\phi$	$c$ (kPa)	$\phi$	$c$ (kPa)
CC (1)	35,7	0	36,7	29
CC (2)	35,9	0	36,5	41

Fonte: Elias (2018).

Apesar da permeabilidade relativamente alta do material, para garantir uma completa saturação e adensamento da amostra e por uma questão do procedimento prático do ensaio, optou-se por esperar um mínimo de 8 horas de saturação e 16 horas de adensamento nos ensaios de cisalhamento direto. Nos ensaios triaxiais, com a aplicação das contrapressões, o tempo tanto para saturação quanto para o adensamento foi de 4 horas para cada. Acredita-se que o maior tempo para as etapas citadas no ensaio de cisalhamento direto, pode ser responsável pelos valores de intercepto coesivo obtidos. Com mais tempo em cada etapa, mais partículas podem ser hidratadas, mais reações de natureza diversas podem ser processadas, como a cimentação, reações pozolânicas, além de poderem ocorrer mudanças mais significativas na textura e estrutura do material, que entre outros aspectos, podem ter contribuído diretamente para os valores de intercepto coesivo encontrados.

Na figura 46 são apresentadas as curvas *tensão desvio vs. deformação axial* e as envoltórias obtidas para ambos os ensaios.

Figura 46 - (a) Curva tensão desvio x deformação axial – ensaio triaxial; (b) envoltória de ruptura – ensaio triaxial; (c) Curva tensão de cisalhamento x deslocamento horizontal – ensaio cisalhamento direto; (d) tensão cisalhante x tensão normal – ensaio cisalhamento direto.



Fonte: Elias (2018)

#### 4.14 Lixiviação, solubilização e ensaio ambiental adaptado

As análises ambientais realizadas no presente estudo, não tinham como objetivo avaliar todas as cinzas quanto à sua toxicidade e periculosidade. Análises desse tipo já haviam sido realizadas pela mesma linha de pesquisa do presente projeto (Projeto ENEVA – Relatório Final, 2018), sob a supervisão do Prof. Dr. André Bezerra. A partir do trabalho desenvolvido

pela linha 3, através da análise do extrato lixiviado (ABNT NBR 10005/2004) e solubilizado (ABNT NBR 10006/2004) realizou-se a classificação dos resíduos sólidos, conforme a norma ABNT NBR 10004/2004, que segundo essa podem ser classificados como Perigosos (Classe I), Não Perigoso e não Inerte (Classe II A) e Não Perigoso e Inerte (Classe II B).

Destaca-se que todas as análises realizadas sob essas metodologias avaliaram apenas parâmetros inorgânicos. Deve-se ressaltar também que, devido às limitações técnicas e operacionais, nem todos os parâmetros exigidos pela norma puderam ser avaliados. Substâncias como cianeto, sulfetos em alguns metais não foram analisados. Os resultados das análises realizadas e constantes no relatório do projeto (Projeto ENEVA – Relatório Final, 2018) encontra-se no anexo A deste trabalho.

Ainda segundo as análises, 18% das amostras individuais (PA-2, PA-5, PA-9, PA-12, PP-2 (1)) foram classificadas como resíduos perigosos (Classe I), apresentando concentrações acima do Valor Máximo Permitido (VMP) para o Fluoreto (F<sup>-</sup>). As demais amostras foram classificadas como resíduo não perigoso e não inerte (Classe II-A), apresentando pelo menos um componente acima do VMP no extrato solubilizado. Todavia, observou-se que ao misturar todas as amostras de cinzas individuais (PA's e PP's), exceto as amostras de cinzas leves, a cinzas classificadas como perigosas não eram determinantes para a classificação da cinza composta que foi classificada como resíduo classe II-A

No presente trabalho, foram realizados ensaios ambientais adicionais, em amostras individuais, em amostras de cinzas compostas, além misturas solo-cinza e solo-cinza-cal, considerando o material compactado, condição essa que não é verificada em ensaios de lixiviação e solubilização.

Uma metodologia simplificada foi adotada para obtenção de extrato percolado, por imposição de fluxo através de amostra compactada durante o ensaio de permeabilidade. Algumas limitações técnicas impediram que todos os parâmetros previstos por norma fossem avaliados, sendo analisados apenas alguns deles. Além dos parâmetros exigidos disponíveis, foi avaliado também a concentração de Ni (não previsto em norma) na composição dos extratos, além do Cu<sup>2+</sup>, que apesar de previsto em norma e analisado, não apresentou concentrações significativas assim como nos demais ensaios. Destaca-se ainda, que amostras individuais de cinza no estado solto (as mesmas analisadas no estado compactado) foram ensaiadas com o intuito de validar e corroborar as análises anteriormente feitas. Mudanças de operador, mudanças no preparo das amostras (sem fugir das exigências da norma), parâmetros diferentes, inclusão de novos artifícios metodológicos, entre outras modificações podem alterar os



resultados, sendo necessário a realização das referidas análises com o intuito de aumentar a confiabilidade dos resultados.

As tabelas abaixo mostram os resultados obtidos pelos ensaio de lixiviação, solubilização e ensaio ambiental adaptado, de parâmetros inorgânicos tanto de ânions (TABELA 32) e como de cátions (TABELA 33).

Tabela 32 - Concentração (mg.L<sup>-1</sup>) de parâmetros inorgânicos (ânions) de extratos lixiviados solubilizado e percolados das amostras analisadas.

AMOSTRAS	Ânions						
	Br <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
PA-9 (1)	9,688	2405,087	3,278	-	219,622	-	4603,070
PA-9 (2)	3,104	711,949	1,540	19,355	40,730	-	750,914
PA-9 (3)	0,929	251,342	1,719	5,963	10,267	10,373	2854,986
PA-9 (L)	<0,24	16,209	1,347	<0,27	5,227	<0,50	623,924
PA-9 (S)	0,764	77,482	1,654	3,814	<0,25	<0,50	2281,811
PP-1 (2,00-2,25m) (1)	18,342	3197,475	1,963	12,020	106,243	<0,50	2081,028
PP-1 (2,00-2,25m) (2)	25,120	2098,835	3,621	15,148	69,736	<0,50	2237,686
PP-1 (2,00-2,25m) (3)	21,971	1378,447	3,612	12,188	45,224	<0,50	1472,341
PP-1 (2,00-2,25m) (L)	<0,24	86,665	8,787	<0,27	8,787	<0,50	1641,444
PP-1 (2,00-2,25m) (S)	10,759	167,992	3,282	7,538	12,200	<0,50	1930,494
PP-1 (5,00-5,25m) (1)	<0,24	166,547	3,223	7,751	37,589	<0,50	3297,700
PP-1 (5,00-5,25m) (2)	2,406	<0,23	1,775	4,617	134,732	<0,50	2305,537
PP-1 (5,00-5,25m) (L)	<0,24	180,265	23,170	<0,27	<0,25	<0,50	1509,097
PP-1 (5,00-5,25m) (S)	4,524	657,275	16,821	9,258	<0,25	<0,50	8492,232
CC (1)	4,350	838,317	1,042	<0,27	110,789	<0,50	2546,251
CC (2)	1,077	311,973	4,435	7,040	<0,25	12,274	2682,033
CC (3)	<0,24	61,042	2,750	<0,27	<0,25	12,529	2487,332
CC (L)	<0,24	36,562	1,083	<0,27	3,376	<0,50	427,457
CC (S)	1,319	125,163	1,837	3,617	7,930	<0,50	2265,715
S70C30 (1)	<0,24	411,290	2,035	<0,27	0,900	11,573	2206,040
S70C30 (2)	5,617	248,422	1,843	<0,27	0,670	<0,50	1274,841
S70C30 (L)	<0,24	51,976	2,275	<0,27	5,481	<0,50	480,350
S70C30 (S)	0,418	130,214	1,561	1,465	<0,25	<0,50	2241,359
S70C30Ca5 (1)	<0,24	179,632	4,165	<0,27	2,469	8,522	149,041
S70C30Ca5 (2)	23,504	198,783	0,864	9,476	25,148	18,322	32,457
S70C30Ca5 (L)	<0,24	69,355	0,824	<0,27	4,605	<0,50	542,343
S70C30Ca5 (S)	<0,24	285,276	4,425	<0,27	23,077	<0,50	1294,430
VMP	-	250,0 (S)	150,0 (L) /1,50 (S)	-	10,0	-	250,0 (S)
LQ	0,24	0,23	0,05	0,27	0,25	0,50	0,27

Fonte: Elias (2018)

Tabela 33 - Concentração (mg.L<sup>-1</sup>) de parâmetros inorgânicos (cátions) de extratos lixiviados solubilizado e percolados das amostras analisadas.

AMOSTRAS	Cátions				
	Cd <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe	Ni	Pb <sup>2+</sup>
PA-9 (1)	0,055	<0,18	0,008	0,118	0,380
PA-9 (2)	0,061	<0,18	0,054	0,144	0,320
PA-9 (3)	0,068	<0,18	0,047	0,117	0,240
PA-9 (L)	0,037	<0,18	0,221	0,297	0,620
PA-9 (S)	0,060	<0,18	<0,05	0,168	0,290
PP-1 (2,00-2,25m) (1)	0,044	<0,18	0,138	0,183	0,340
PP-1 (2,00-2,25m) (2)	0,053	<0,18	0,306	0,124	0,100
PP-1 (2,00-2,25m) (3)	0,058	<0,18	0,118	0,194	<0,06
PP-1 (2,00-2,25m) (L)	<0,03	<0,18	11,740	0,176	0,260
PP-1 (2,00-2,25m) (S)	-	-	-	-	-
PP-1 (5,00-5,25m) (1)	0,059	<0,18	0,067	0,118	0,220
PP-1 (5,00-5,25m) (2)	0,059	<0,18	<0,05	0,150	0,190
PP-1 (5,00-5,25m) (L)	<0,03	<0,18	0,916	0,062	0,080
PP-1 (5,00-5,25m) (S)	0,054	<0,18	<0,05	0,099	0,110
CC (1)	0,055	<0,18	0,068	0,235	0,190
CC (2)	0,060	<0,18	0,056	0,064	<0,06
CC (3)	0,062	<0,18	0,054	0,099	<0,06
CC (L)	<0,03	<0,18	0,108	0,132	0,220
CC (S)	0,047	<0,18	<0,05	0,088	0,200
S70C30 (1)	0,068	<0,18	<0,05	0,044	0,040
S70C30 (2)	0,066	<0,18	0,068	0,125	<0,06
S70C30 (L)	0,044	<0,18	0,421	0,184	0,490
S70C30 (S)	0,060	<0,18	<0,05	0,111	0,250
S70C30Ca5 (1)	0,051	0,300	0,057	0,218	0,170
S70C30Ca5 (2)	0,064	<0,18	0,051	0,252	0,140
S70C30Ca5 (L)	0,044	<0,18	0,075	0,150	0,610
S70C30Ca5 (S)	0,060	<0,18	0,086	0,129	0,280
VMP	0,50 (L) / 0,005 (S)	2,00 (S)	0,30 (S)	-	1,00 (L) / 0,01 (S)
LQ	0,03	0,18	0,05	-	0,06

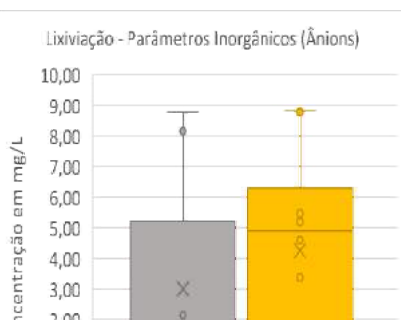
Fonte: Elias (2018).

Com base nos dados apresentados, assim como nas análises de cinza individuais a cinza composta mostrou ser um Resíduo Classe II-A (Não Perigoso e Não Inerte), com concentrações nos extratos solubilizados, por exemplo, de sulfatos e fluoretos acima dos limites máximos permitidos por norma. Além disso, comparando as concentrações dos parâmetros analisados da cinza composta e de cinzas individuais (tanto as analisadas pela linha de pesquisa

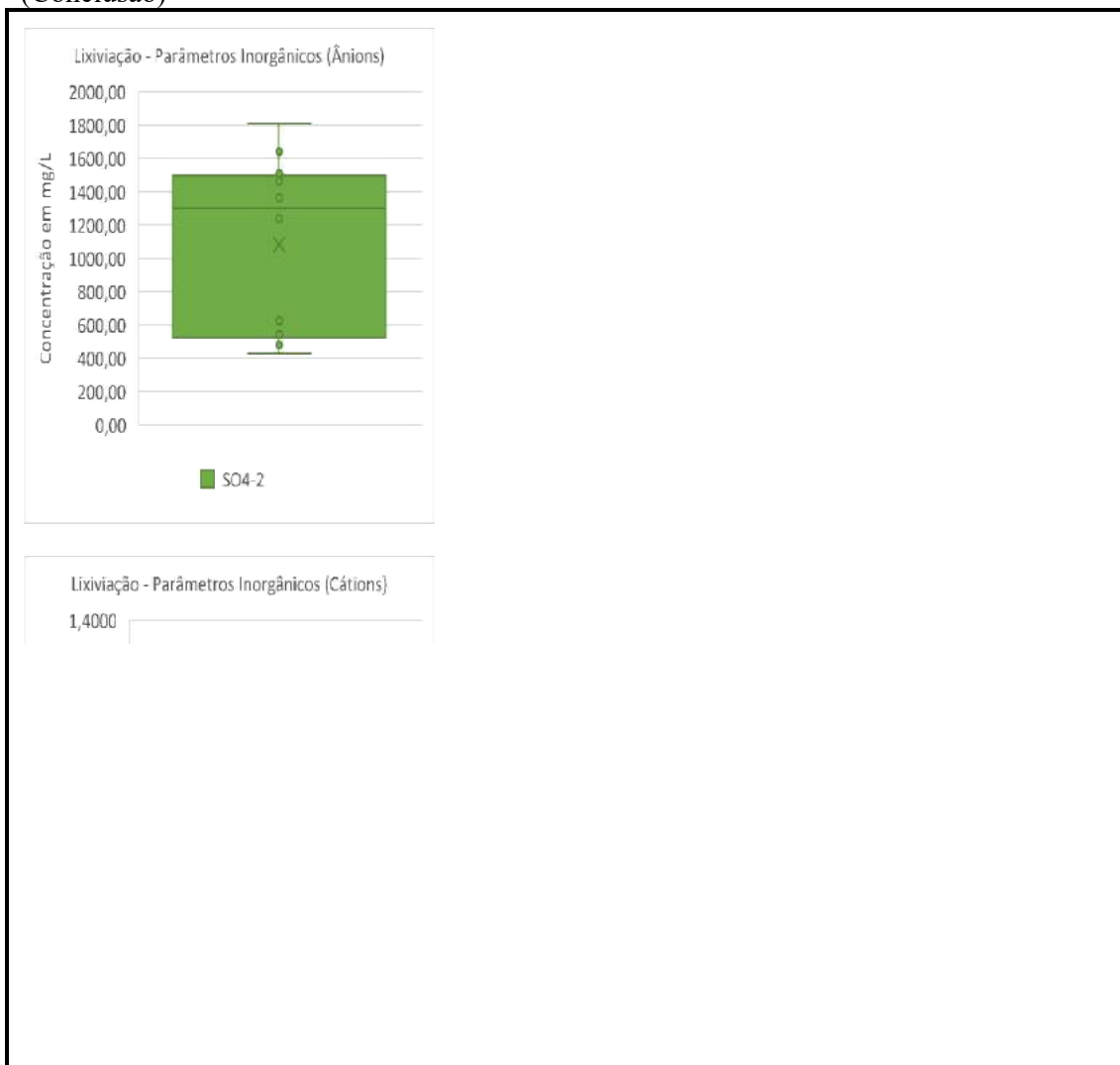
3, como as amostras individuais analisadas no presente trabalho) é possível observar reduções das concentrações em 90% dos parâmetros analisados nas amostras de cinza composta.

O quadro 15 apresenta os *boxplot's* das concentrações dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions). Através deles é possível observar como essas concentrações variaram nas amostras analisadas.

Quadro 15 - Boxplot's dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) analisados nas amostras (Continua)



Quadro 15 - Boxplot's dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) analisados nas amostras (Conclusão)



Fonte: Elias (2018).

A liberação de componentes poluidores dos resíduos para água pura (solubilização) ou para o meio, solo e águas subterrâneas (lixiviação), é dependente de vários fatores, como pH, condutividade elétrica, capacidade de troca iônica, aglomeração de partículas, presença de agentes cimentantes, temperatura, entre outros. Cada um desses fatores influencia a dinâmica de uma substância constituinte de forma diferente. Sendo assim, torna-se difícil identificar um padrão de variação das concentrações desses elementos no ensaio ambiental adaptado, diferentemente dos ensaios normatizados onde pode haver um maior controle desses fatores.

Todavia, foi possível ainda, observar uma tendência nas variações das concentrações nas análises realizadas, segundo a metodologia proposta. Em 90% das amostras as concentrações dos constituintes no 3º dia de coleta eram menores que a do 1º e em 100% das

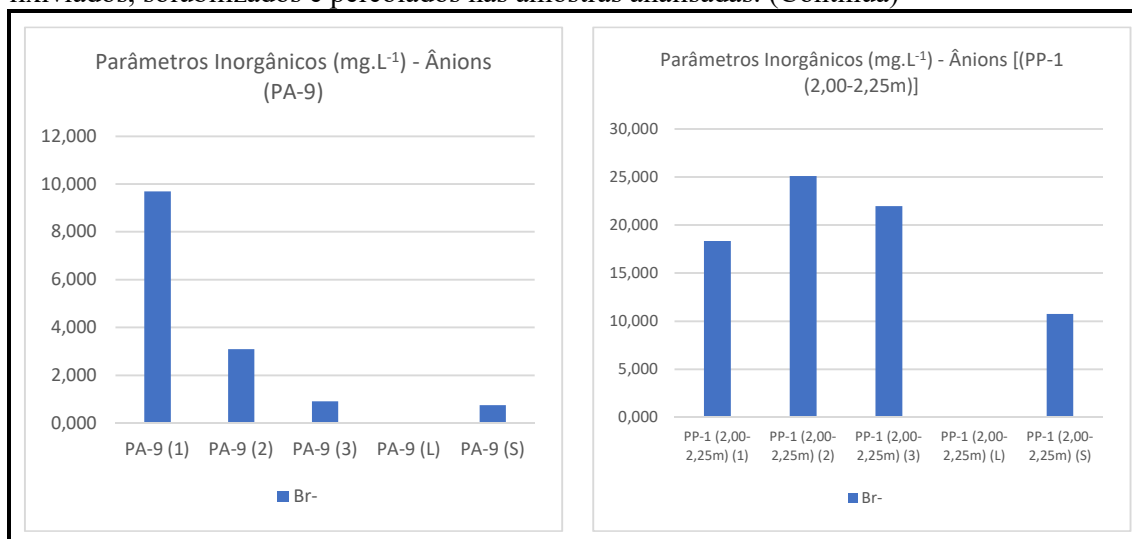
amostras era inferior a concentração do primeiro 1º dia ou do 2º dia. É importante ressaltar que na metodologia proposta, no extrato coletado há constituinte liberados tanto pela lixiviação como pela solubilização. Isto aliado ao fato de que cada constituinte possui um grau de solubilização diferente e depende das condições do meio, pode ter contribuído para algumas amostras apresentarem concentrações maiores no 2º dia, por exemplo.

Observou-se também, que para parâmetros inorgânicos aniônicos, a compactação não foi capaz de conter a liberação dos mesmos, de forma que comparando as concentrações dos extratos lixiviados e solubilizados normatizados, com as do extrato percolado obtido pelo ensaio adaptado, a concentração desse último foi ainda maior que a dos anteriores. Esse não era um resultado esperado, sendo imprescindível a realização de ensaios adicionais com um número maior de amostras para corroborar os resultados aqui obtidos.

O comportamento apresentado pode ter causas variadas, podendo ter sido ocasionado, por exemplo, por fenômenos de superfície, como a troca iônica, fenômenos de natureza elétrica devido à estrutura da amostra compactada, ou ainda ter sido influenciado pelas tensões as que as amostras foram submetidas. Devem ser realizadas análises adicionais variando esses parâmetros, para verificar a influência de cada um no comportamento observado.

O quadro 16 apresenta a variação das concentrações dos parâmetros inorgânicos (ânions) através de gráficos de barras, de forma a permitir a visualização da dinâmica das concentrações de poluentes nos ensaios realizado

Quadro 16 - Concentração dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) nos extratos lixiviados, solubilizados e percolados nas amostras analisadas. (Continua)



Quadro 16 - Concentração dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) nos extratos lixiviados, solubilizados e percolados nas amostras analisadas. (Continuação)



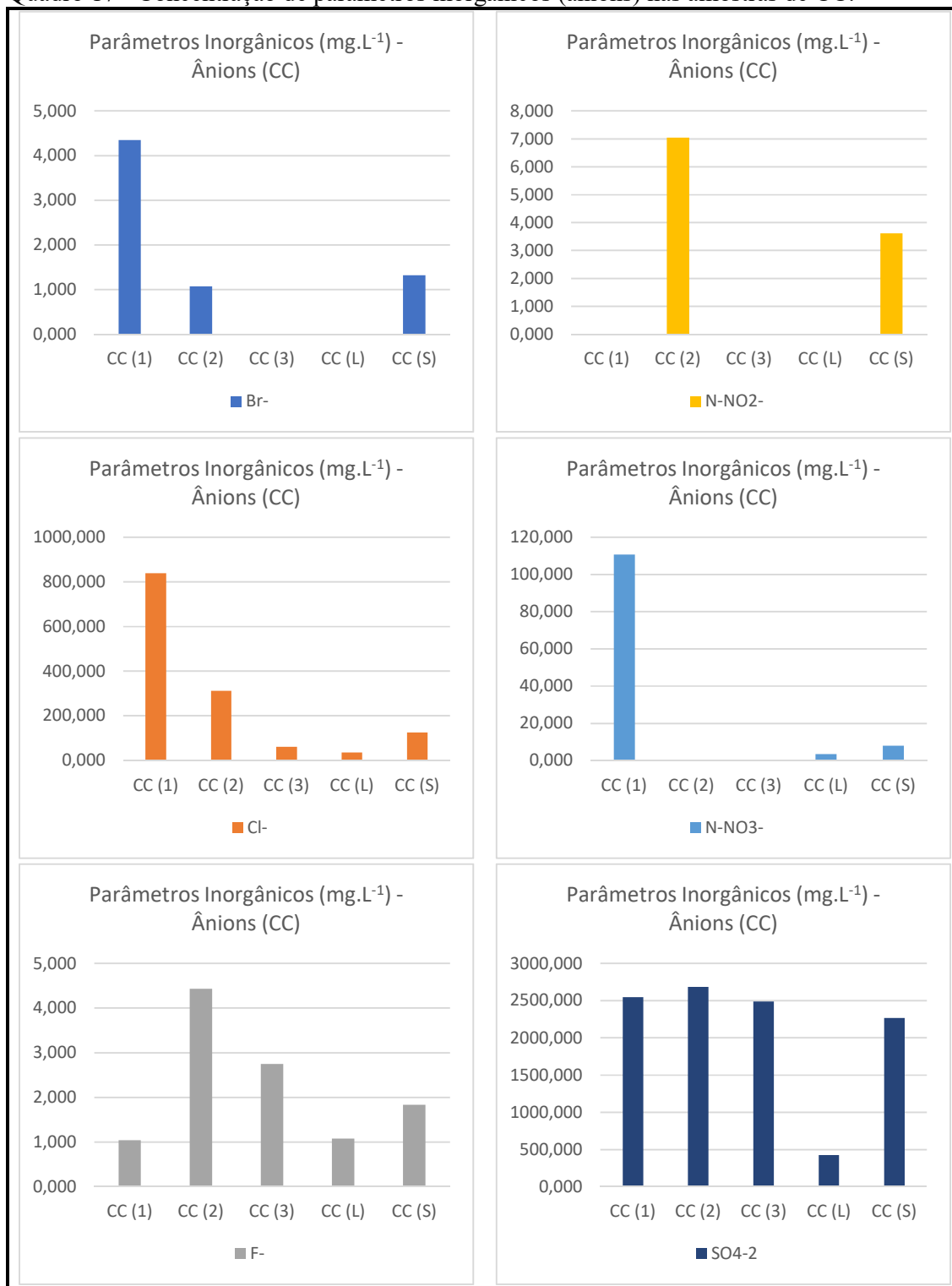
Quadro 16 - Concentração dos parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) nos extratos lixiviados, solubilizados e percolados nas amostras analisadas. (Conclusão)



Fonte: Elias (2018).

Avaliando os resultados obtidos para cinza composta, é possível notar que mesmo com a adição de amostras classificadas como perigosas, essas não foram determinantes para atribuir a amostra composta a mesma periculosidade das amostras individuais. Dessa forma a amostra de cinza composta foi classificada como um resíduo classe II-A, tanto nas análises realizadas pela linha 3 (ANEXO A), como para os parâmetros analisados neste estudo (QUADRO 17).

Quadro 17 - Concentração de parâmetros inorgânicos (ânions) nas amostras de CC.

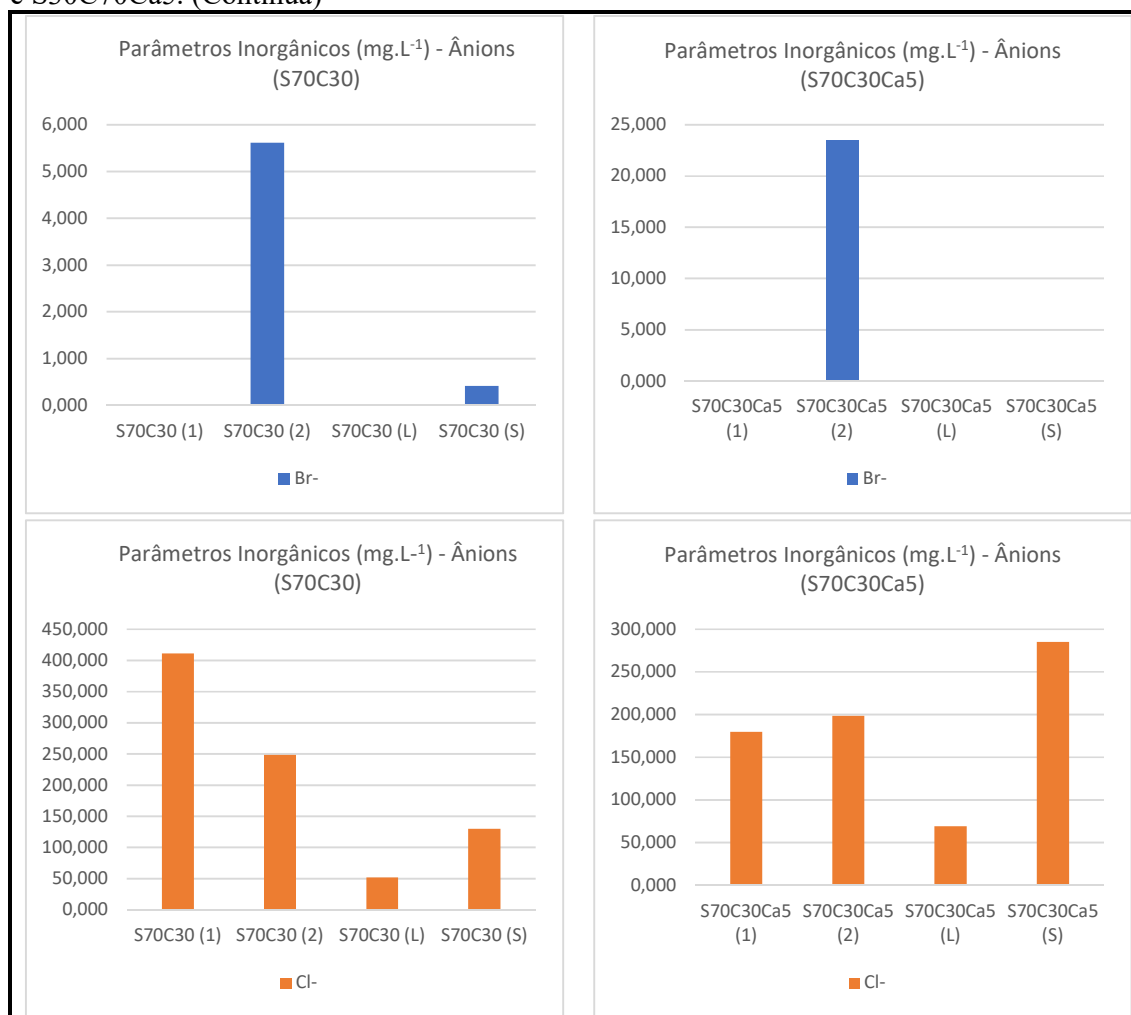


Fonte: Elias (2018).

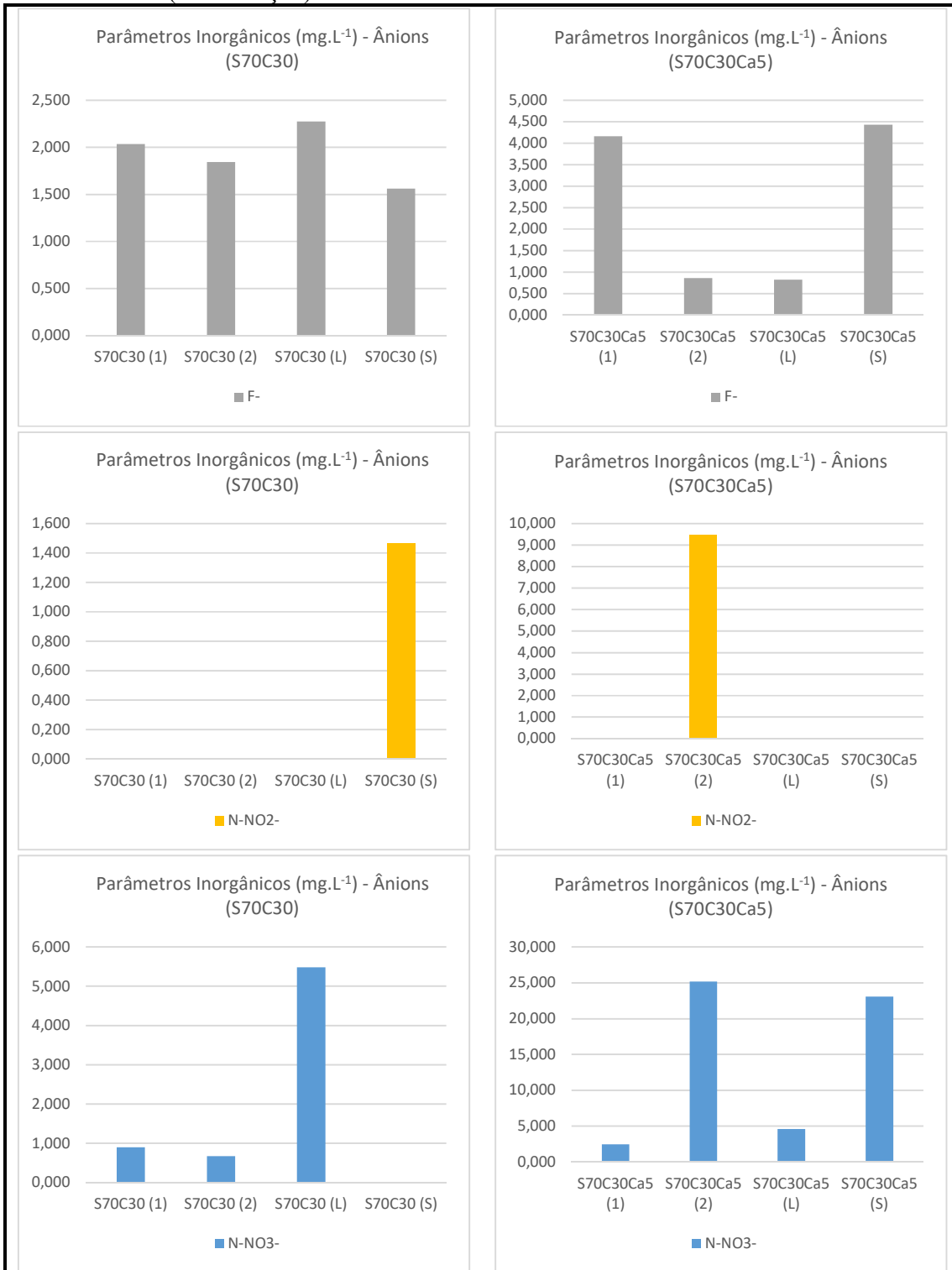


Foram realizadas também análises ambientais das misturas, de forma a verificar possíveis reduções na liberação de constituintes poluentes devido a interação entre os materiais. No quadro 18, abaixo, estão as análises realizadas para as misturas S70C30 e S70C30Ca5.

Quadro 18 - Concentração de parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) das amostras S30C70 e S30C70Ca5. (Continua)



Quadro 18 - Concentração de parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) das amostras S30C70 e S30C70Ca5. (Continuação)



Quadro 18 - Concentração de parâmetros inorgânicos (ânions e cátions) das amostras S70C70 e S70C70Ca5. (Conclusão)



Fonte: Elias (2018).

É importante ressaltar que o presente trabalho não visou avaliar a capacidade de encapsulamento de poluentes na presença da cal. No entanto, como analisou-se a condutividade hidráulica e a resistência mecânica para amostra S70C30Ca5, optou-se por realizar também, as análises ambientais, avaliando-se a existência de possíveis desvios de comportamento e interações com os constituintes do resíduo que possam influenciar em outras propriedades do material.

Observou-se que para a amostra S70C30, nos extratos lixiviados, a concentração dos constituintes aumentou quando comparados com os da cinza composta. Em contrapartida as concentrações no extrato solubilizado sofreram reduções para os parâmetros aniônicos.

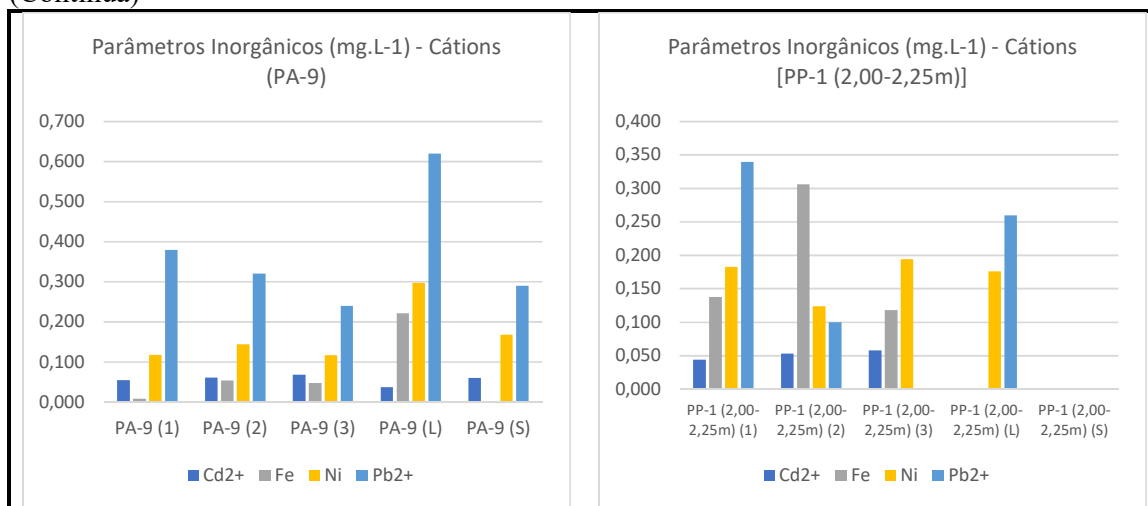
Já para os cátions houve aumento na concentração dos parâmetros tanto no extrato lixiviado como no solubilizado. Notou-se também, que para as amostras S70C30 compactadas

as contrações de cloretos e sulfatos, diminuirão quando comparada as concentrações dos ensaios normatizados. Todavia, a amostra analisada apresentou concentrações acima do valor máximo permitido nos extratos solubilizados para os parâmetros cloreto (Cl-) e sulfato (SO<sub>4</sub>), sendo classificado como um resíduo classe II-A. O mesmo comportamento foi observado em relação a mistura S70C30Ca5, que também foi classificada com resíduo Classe II-A

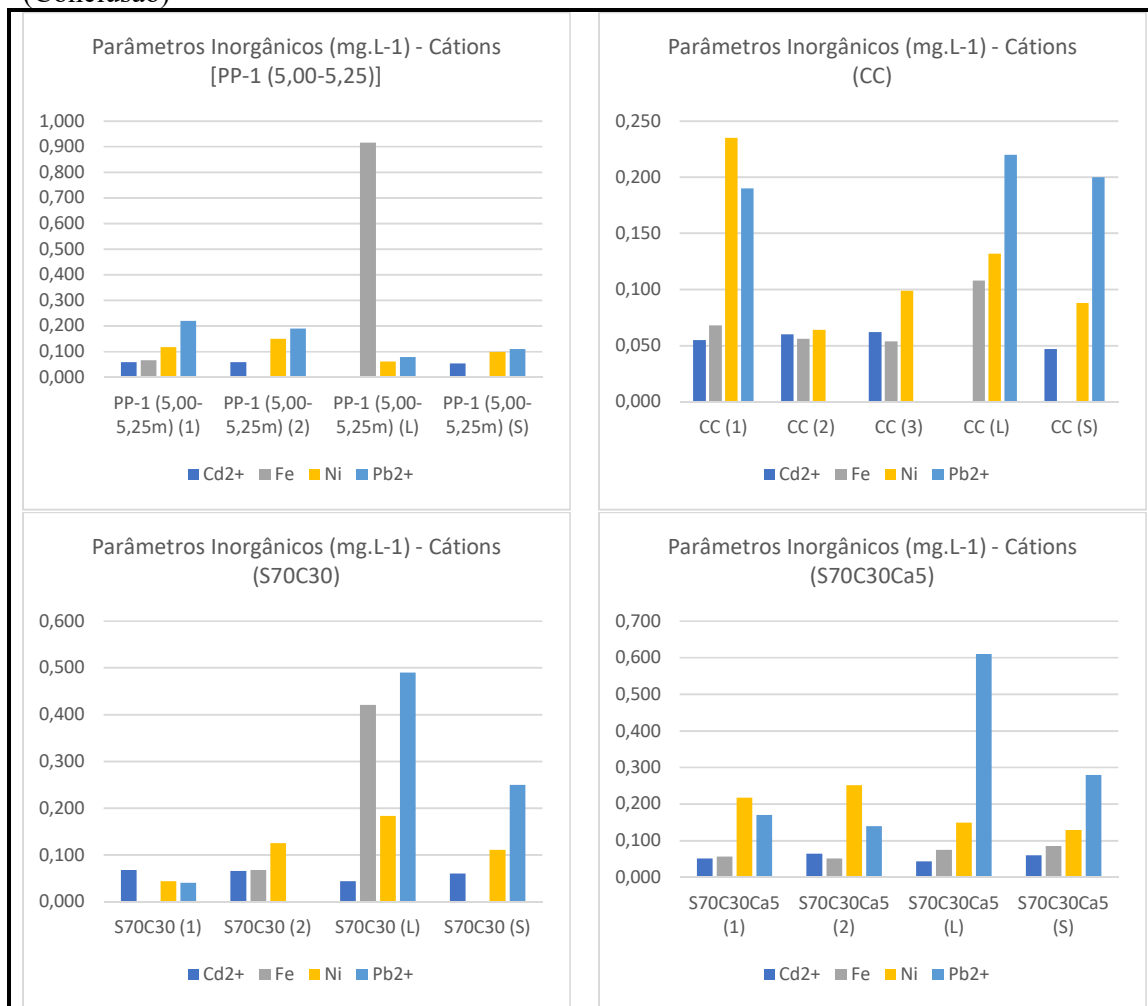
As amostras com adição de cal apresentaram comportamento semelhante para cloretos e sulfatos, reduzindo ainda mais a concentração desses nos extratos da amostra compactada, sendo a redução dos sulfatos mais significativa.

Para os parâmetros inorgânicos catiônicos (QUADRO 19), foi observado uma maior contribuição da compactação na contenção dos poluentes. Todavia, houve variações no comportamento de acordo com o parâmetro analisado. Isso ratifica a ideia que para cada parâmetro, fatores como pH, condutividade elétrica, CTC, entre outros, afetará a dinâmica do poluente, tornando difícil a identificação de um padrão de comportamento.

Quadro 19 - Concentração de parâmetros inorgânicos (cátions) para as amostras analisadas. (Continua)



Quadro 19 - Concentração de parâmetros inorgânicos (cátions) para as amostras analisadas. (Conclusão)



Fonte: Elias (2018).

Segundo considerações da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), a dinâmica (transporte e mobilidade) de poluentes no solo depende de fatores como pH, teor de matéria orgânica, CTC, entre outras. Segundo o órgão estadual, em solos ácidos, arenosos, com baixo teor de matéria orgânica e baixa CTC, há uma maior lixiviação de cátions, havendo uma maior possibilidade de uma substância atingir a água subterrânea. Além dessas, as propriedades físicas do solo como textura, estrutura, densidade, porosidade, permeabilidade, entre outras, influenciam diretamente os mecanismos de atenuação de poluentes, além de criar condições propícias para a atenuação por meio de mecanismos químicos e biológicos.

É importante destacar que no método preconizado pela NBR 10005/2004 o volume de líquido em que ocorre a extração dos contaminantes é constante (1:16) (KNOP, 2003). Já no ensaio ambiental adaptado os contaminantes são quantificados quanto à massa desses em

relação ao volume total do lixiviado (sendo ambos, massa e volume variáveis), obedecendo o mesmo princípio do ensaio de coluna normatizado pela norma ASTM D4874/1995. Sendo assim não se limita o valor da concentração do contaminante no lixiviado.

#### 4.15 Características e Propriedades da Cinza Composta (CC)

Com base nos ensaios realizados determinou-se as principais características e propriedades das cinzas compostas, sendo possível traçar um perfil para o material. Na tabela 34 apresenta-se um resumo dessas características.

Tabela 34 - Perfil das Cinzas Compostas (características e propriedades). (Continua)

CINZAS COMPOSTAS			
AN.	ENSAIO	RESULTADO	COMENTÁRIOS
MINERALOGIA E MORFOLOGIA	DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DFRX)	<b>Quartzo</b> (Óxido de Silício); <b>Calcita</b> (Carbonato de Cálcio); <b>Gipsita</b> (Sulfato de Cálcio Hidratado); <b>Silimanita</b> (Silicato de Alumínio); Sulfato de Cálcio.	A composição mineralógica do material está associada a mineralogia do carvão de origem, provavelmente um linhito pela alta porcentagem de CaO e SO <sub>3</sub> , identificado pela FLRX. As análises de MEV e adsorção (Superfície Específica e Porosidade), mostrou características morfológicas e texturais do material, no qual predomina partículas de forma esféricas, ocas, com área superficial no mesmo intervalo das caulinitas, sendo as cinzas um material mesoporoso.
	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	-	
	SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E POROSIDADE	ASE = 17,62 m <sup>2</sup> /g; Volume de poros = 0,1036 cc/g; Diâm. Méd. dos poros = 119 Å	
ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E AMBIENTAL	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	SiO <sub>2</sub> - 44,8527; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 14,9179; Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 13,0223; CaO - 17,5326; SO <sub>3</sub> - 4,0307; K <sub>2</sub> O - 2,5317; TiO <sub>2</sub> - 2,1119; P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - 0,4372; SrO - 0,266; MnO - 0,1286; ZnO - 0,0854; NiO - 0,0829	A partir da análise físico-química é possível afirmar que se trata de cinzas sufcálcicas (apesar da concentração de CaO e SO <sub>3</sub> ter sido maior nas cinza individuais do que nas cinzas compostas). A análise química mostra que trata-se de um material alcalino (elevado pH). A CE elétrica indica a presença de sais. O material mostrou também elevada CTC, próxima a de argilas do tipo 2:1. O teor de matéria orgânica foi baixo. Essas características exerceram influência no comportamento mecânico e hidráulico do material, e principalmente, influenciara o comportamento de misturas solo-cinza, pelas interações com o solo. Os ensaios ambientais mostraram que se trata de um resíduo não perigoso e não inerte.
	pH, CE, CTC E MATÉRIA ORGÂNICA	pH (Água) = 8,5; CE = 3,5 dS/m; C = 18,3 g/kg; N = 1,95 g/kg; C/N = 9; MO = 31,55g/kg; CTC (T) = 120 cmolc/kg	
	LIXIVIAÇÃO SOLUBILIZAÇÃO		
	AMBIENTAL ADAPTADO	<b>Resíduo Classe II-A</b>	

Tabela 34 - Perfil das Cinzas Compostas (características e propriedades). (Conclusão)

CINZAS COMPOSTAS			
AN.	ENSAIO	RESULTADO	COMENTÁRIOS
ANÁLISE GEOTÉCNICA	MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS	$G_s = 2,43$	A análise geotécnica mostra algumas particularidades do material. A densidade real é próxima a dos solos. A granulometria mostrou elevado teor de finos (acima de 70%), com a predominância de partículas do tamanho de siltes. O material mostrou-se sem liquidez e sem plasticidade. O teor de umidade ótima foi relativamente alta quando comparado a de solos com características texturais semelhantes. Apesar do elevado teor de finos o material apresentou uma elevada condutividade hidráulica. As análises de resistência mostraram ângulos de atrito característicos de materiais granulares. No ensaio de cisalhamento direto o material apresentou um valor de intecepto coesivo não apresentado pelo ensaio triaxial, que pode estar associado à características físico-químicas e reações químicas, que podem ter ocorrido devido ao maior tempo de saturação e adensamento no ensaio de cisalhamento direto
	GRANULOMETRIA	<b>Pedregulho</b> = 0 %; <b>Areia Grossa</b> = 0% <b>Areia Média</b> = 0% <b>Areia Fina</b> = 9% <b>Silte</b> = 61% <b>Argila</b> = 15%	
	LL & LP	Não Líquido (NL) & Não Plástico (NP)	
	COMPACTAÇÃO	$\omega = 42,24\%$ ; $\rho = 1,120 \text{ g/cm}^3$	
	PERMEABILIDADE	$k = 1,57 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	
	CISALHAMENTO DIRETO	$\phi = 36,6^\circ$ ; $c = 35 \text{ kPa}$	
	TRIAXIAL	$\phi = 35,8^\circ$ ; $c = 0$	

Fonte: Elias (2018).

Apesar da cinza de carvão mineral apresentar muitas similaridades com os solos, tantos sob aspectos táteis-visuais, como características morfológicas, mineralógicas, físico-químicas e de comportamento, a mesma possui diversas particularidades. Essas particularidades a torna um material singular, diferente dos solos e de comportamento próprio, contrariando muitas vezes o que se esperaria de resultado. Talvez um dos aspectos mais importantes das diferenças entre os materiais esteja no processo de formação dos mesmos. Os solos são frutos de processos intempéricos, enquanto as cinzas são oriundas de processos industriais. As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo são determinadas pelo seu processo geológico de formação, pela origem de seus minerais e sua evolução de acordo com o clima e o relevo local. As cinzas, apesar do carvão mineral está submetido a variáveis semelhantes a dos solos, é um material particulado oriundo de um processo de combustão não natural, imposta pela atividade industrial, o que contribuirá para as diferenças apresentadas pelos materiais

Os ensaios aplicados aos solos, são frutos de um vasto estudo técnico-científico e de uma ciência amplamente estudada e amparada por outras áreas do conhecimento, que permitiram a elaboração de procedimentos de análise baseados nas características do material e comprovados cientificamente. Existe uma enorme variabilidade de análises adequadas a

mesma variabilidade de solos, que corroboram as interpretações dadas ao comportamento do material, o qual o torna mais previsível.

O material de estudo foi ensaiado com base em procedimentos e metodologias geotécnicas, o que poderia não estar coerente com a natureza do material. Isso levou a necessidade de aumentar repetibilidade dos ensaios de forma a conferir aos resultados maior confiabilidade. Entretanto, devido a determinação de amplas faixas de variação para os valores de determinados parâmetros, como os do ensaio compactação, conduziu a necessidade de averiguar a consistência dos valores obtidos e o quanto esses estavam sendo representativos e fieis as características e comportamento do material. Dessa forma optou-se por alguns artificios que pudessem tornar os resultados mais consistentes, como: a utilização de um material composto pela mistura de todas as amostras de cinzas coletadas; a realização de análises estatísticas de forma a trazer para os valores dos parâmetros de cinza composta maior confiabilidade e previsibilidade; e a realização de ensaios, mineralógicos, morfológicos e físico-químicos que viessem a corroborar os resultados obtidos.

Sob essa perspectiva os ensaios mostraram que a análise da cinza composta foi mais representativa para todo o material, e a maioria das análises estatísticas retornaram os valores médios próximos aos da cinza composta como já mencionado.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como principal objetivo a caracterização de resíduos oriundos da queima de carvão mineral (cinzas e resíduos de dessulfuração), com vistas a possibilidade de reutilização do mesmo para aplicações em obras geotécnicas e ambientais, em especial para aplicação de camadas impermeabilizantes para aterros sanitários. Esse foi um trabalho fruto do projeto de pesquisa originado da parceria da Empresa ENEVA e da Universidade Federal do Ceará.

Apesar dos muitos estudos desenvolvidos pelo mundo para diversos resíduos e rejeitos como as cinzas, e dos grandes avanços técnicos científicos, esses materiais carecem de mais estudos, normas e diretrizes de análises próprias, formalizadas e direcionadas as suas peculiaridades.

Por ser tratar de um trabalho de engenharia, viu-se a necessidade também de propor aplicações para o material, para o qual foi a apresentada a proposta de utilização como liner. A utilização de material como liner exigiu algumas verificações como: a resistência mecânica do material, compatibilidade do material com o efluente, estudo de transporte de contaminantes e sobretudo análise da condutividade hidráulica.

As cinzas, apesar do elevado teor de finos, tiveram comportamento similar ao de solos granulares, apresentando-se como um material sem liquidez e plasticidade, com condutividade hidráulica relativamente elevada, sem coesão e com ângulos de atrito característicos desse tipo de solo. Tanto as amostras individuais como a amostra de cinza composta não apresentaram a condutividade hidráulica adequada para seu emprego como liner, o que levou a necessidade de avaliar a mistura da cinza com solo, artifício amplamente estudado tanto para aplicação como liner (ELIAS 2015), como para utilização em camadas de cobertura (UBALDO, 2005; SOUZA, 2018) ou ainda para utilização em camadas de pavimento (BARROS 2015 e VASCONCELOS 2018).

Apesar das especificidades do material, da variabilidade de alguns parâmetros e das diferenças em relação ao comportamento dos solos, foi possível identificar padrões de comportamento do material, o que confere uma confiabilidade maior aos valores obtidos. Os resultados dos ensaios mineralógicos, morfológicos, e físico-químicos mostraram-se capazes de explicar as características e propriedades apresentadas pelos materiais, além de estarem coerente com o comportamento geotécnico apresentado pelos mesmos. A caracterização geotécnica, mostrou-se passível de ser aplicada ao resíduo, devendo-se, contudo, sempre levar em consideração as particularidades do material.

Foram analisadas três misturas com diferentes proporções de solo e cinza (S30C70, S50C50 e S70C30). O solo utilizado foi o mesmo empregado nas camadas de cobertura final do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), um solo que possuía as características adequadas para utilização como barreira impermeabilizante.

Dentre as misturas testadas apenas a S70C30 (70% de Solo e 30% de cinza em massa) apresentaram condutividade hidráulica na ordem de  $10^{-7}$  m/s, recomendada para aplicação como liner para resíduos Classe II. Foi avaliada, também, a mistura S70C30Ca5 que trata-se da mistura de solo e cinza na proporção de 70% de solo para 30% de cinza, em massa, e mais 5% de cal. A proposta dessa mistura era verificar possíveis diminuições na condutividade hidráulica, além de constatar comportamentos já esperados devido a adição da cal, como o aumento da resistência, diminuição da permeabilidade e a atenuação de poluentes. Como era esperado houve uma redução no valor de condutividade hidráulica da mistura S70C30 com a adição da cal que passou de  $4,26 \times 10^{-7}$  cm/s para  $1,82 \times 10^{-7}$  cm/s na amostra S70C30Ca5. Apesar de apresentar resultados igualmente satisfatórios aos da mistura sem adição de cal, a magnitude dos valores obtidos não difere tanto dos valores da mistura sem adição de cal, devendo-se avaliar, se o ganho em eficiência vale as implicações financeiras.

As análises ambientais de lixiviação e solubilização conduziram a uma classificação do resíduo como Classe II-A (não perigoso e não inerte), algo coerente com as características do material e com as classificações realizadas para diversos materiais similares já estudados. O ensaio ambiental adaptado, levando em consideração suas limitações e simplicidade, permitiu algumas observações importantes e apresentou certa coerência, dentro da perspectiva que o fundamentou. Todavia, são necessários alguns ajustes para tornar seus resultados mais consistente e permitir uma análise mais fundamentada. Devem ser revistas, por exemplo, características como dimensão do corpo-de-prova, tempo de ensaio e coleta do material, influência da carga hidráulica e da tensão de confinamento, entre outros. O maior controle desses parâmetros torna-se necessário para o objetivo a que se propôs a metodologia (torná-la mais representativo da situação de campo, incorporando, por exemplo, os efeitos da compactação). Deve-se destacar que o ensaio se baseou em metodologias amplamente difundidas, como o ensaio de coluna, por exemplo. Contudo, o que se buscou foi uma alternativa que necessitasse de um aparato científico mais simples, podendo o mesmo ser realizado concomitantemente a ensaios como o de determinação da condutividade hidráulica.

Dessa forma pode-se afirmar que é possível identificar um padrão de comportamento para cinza composta com características e propriedades definidas e previsíveis de forma a permitir seu emprego em obras geotécnicas e ambientais. Pode-se afirmar também

que é possível aplicação das misturas S70C30 e S70C30Ca5, como *liners*, com características adequadas para esse fim, desde que o projeto contemple também suas limitações.

### 5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Todo estudo científico pode ser aprimorado, ou mesmo readequado a novas condições, de forma que trabalho esteja condizente com novas demandas, solicitações e aplicações. Não diferentemente acredita-se que as análises deste estudo podem ser aperfeiçoadas e complementadas com análises adicionais, ficando as propostas abaixo como sugestões para trabalhos futuros:

- **Realização estudos de condutividade hidráulica em permeâmetros de parede flexível** (Daniel *et al.*, 1984); Boynton e Daniel, 1985; Carpenter e Stephenson, 1986; Daniel e Benson, 1990; Daniel, 1994);
- **Aperfeiçoamento dos estudos ambientais**, com controle da carga estática aplicada ao solo compactado, semelhante ao modelo de KNOP (2007), aumento do tempo de coleta das amostras, podendo-se inferir sobre transporte de contaminantes em solos;
- **Analisar retração do material com vistas a sua aplicação como *liner*.**
- **Avaliar a viabilidade econômica para a utilização da cinza em obras de engenharia**, considerando aspectos como transporte, cominuição, umedecimento para evitar e dispersão de partículas no ar, etc.;
- **Elaboração de modelos (experimental e numérico) em escala reduzida.**

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília, 2008. 236 p.

\_\_\_\_\_. **Relatório ANEEL 2013**. Brasília, 2014.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. de. Modelos de dupla camada difusa de Gouy-Chapman e Stern aplicados a latossolos ácidos paulistas. **Sci. Agr.**, Piracicaba, v. 51, n. 2, p.315-320, maio 1994.

ALLEONI, L. F. F; MELO, V. F. **Química e Mineralogia do Solo**. Ed. SBCS. Viçosa, 2009.

ANDRADE, L. N. V. de; CRUCIANI, D. E. Condutividade hidráulica no processo de eluição em um solo bruno-não-cálcico. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 53, n. 1, p.43-50, jan. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 7182**: Solo – Ensaio de Compactação, 2016.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 10004**: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 10005**: Lixiviação de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 10006**: Solubilização de Resíduos – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **ABNT NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Philadelphia, 2011

\_\_\_\_\_. **ASTM D4874**: Standard Test Method for Leaching Solid Material in a Column Apparatus. Philadelphia, 1995.

\_\_\_\_\_. **ASTM D7181**: Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. Philadelphia, 2011

BARBOSA, Antônio Átila Ramos. **Caracterização geotécnica da cobertura do aterro sanitário de Caucaia e análise dos recalques utilizando o Modelo Hiperbólico de Ling**. 2016. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BORBA, R. F. **Balanço mineral brasileiro 2001**: carvão mineral. Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília, 2001.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

BRANDÃO. M. C.; RODRIGUES, L. M.; SILVA, S. N. Desenvolvimento de revestimentos contendo adições de cinzas da combustão do carvão mineral geradas em ute's. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, IV, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013. p. 211-219.

CAMARA, L. **Estudo do comportamento de materiais e suas aplicações na engenharia geotécnica**. Relatório PIBIC – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CARDOSO, J. J. B. **Estudo do inchamento de bentonitas sódicas e avaliação de inibidores pela difração de raios X**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

CESSA *et al.* Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois latosolos vermelhos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1153-1163, 2009.

CHIES, F., SILVA, N.I.W., ZWONOK, O. Desenvolvimento de Blocos e Tijolos a partir de Cinzas de Fundo de Carvão - CIPECAL. *In*: ROCHA, J.C.; JOHN, V.M. **Utilização de Resíduos na construção Habitacional** – Coletânea Habitaré, v. 4, capítulo 7, Porto Alegre: ANTC, 2003.

CLAUDINO, A. **Preparação de carvão ativado a partir de turfa e sua utilização na remoção de poluentes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CRISPIM, F. A. **Influência de variáveis de compactação na estrutura dos solos: caracterizações geotécnica, química, mineralógica e microestrutural**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa 2010.

CRUZ, R. C. **Condutividade hidráulica em solos contaminados encapsulados**. 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

CUNHA, J. C.; FREIRE, M. B. G.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A.; ALVAREZ, V. H. V. Comparação de dispersantes químicos na análise granulométrica de solos do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 8, 2014. p.783-789.

DANIEL, D E. Predicting hydraulic conductivity of clay liners. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 100, p. 285-300. 1984

DANIEL, D.E. **Geotechnical Practice for Waste Disposal**, London: Chapman & Hall, 1993. 683 p.

DAVILLA, C. **Notas de aula: Plasticidade e consistência dos solos**, unidade 4. [S.l.: s.n.], 2008.

DEDAVID, B. A.; GOMES, A. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura – Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 093/94: Determinação da densidade real dos grãos**. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2014**. Brasília, 2014.

DOURADO, K. A. **Condutividade hidráulica de materiais de baixa permeabilidade: Desenvolvimento, construção e teste de um sistema de medida**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ELIAS, D. S. **Aproveitamento de resíduos sólidos - estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará. 2015.

ELIAS, D. S.; SOARES, A. B.; SOUZA, H. P. “Aproveitamento de resíduos sólidos - Estudo experimental de misturas de solo e cinza volante de carvão mineral”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, V, Criciúma, SC, 2017. **Anais**. Criciúma, 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário estático de energia elétrica 2013: ano base 2012**. Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **Anuário estatístico de energia elétrica 2014: ano base 2013**. Rio de Janeiro, 2014.

ENERGIA PECÉM. **Projeto de Pesquisa sobre a Utilização da Cinza de Carvão Mineral na Construção Civil, Pavimentação, e Aplicações Geotécnicas e Ambientais**. Fortaleza, 2017.

FILHO, E. I. F.; FRANCELINO, M. R. **Solo como sistema trifásico** (Apostila). Viçosa: UFV. 2001. 41p.

GOETHE, C.A. **Sistemas de controle e disposição final das cinzas do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda – SC e da usina termelétrica de Jacuí – RS**. Seminário de estudos da aplicação dos resíduos da combustão do carvão mineral. Anais. Florianópolis, Santa Catarina, 1990.

GREGG, S. J.; SING, K. S. W. **Adsorption, Surface Area and Porosity**. Academic Press; London, 1982; p 41.

GROHMANN, F. Superfície específica do solo de unidades de mapeamento do estado de São Paulo: Estudo de perfis com horizonte B textural e horizonte B Latossólico. **Bragantia**, Campinas, v. 31, n. 13, p.145-165, abr. 1972.

HAN, D. Use potential of fly ash-residual soil mixture as a dyke material. **Env Geotec**, 721-726, 1996.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 275 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HEINECK, K. S.; LEMOS, R. G.; FLORES, J. A. A.; CONSOLI, N. C. Influence of Particle Morphology on the Hydraulic Behavior of Coal Ash and Sand. **Geotech Geol Eng**, v. 28, p. 325–335, 2010.

IZIDORO, J. C. **Síntese e caracterização de Zeólita pura obtida a partir de cinzas volantes de carvão**. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear). Universidade de São Paulo – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2013.

KIHARA, Y. **O estudo mineralógico das cinzas volantes brasileiras: Origem, características e qualidade**. 1983. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

KIM, A. G.; KAZONICH, G.; DAHLBERG, M. Relative solubility of cations in class F fly ash. **Environ Sci Technol**, v. 37(19), p. 4507-4511, 2003.

KNOP, A. **Encapsulamento de solos contaminados por hidrocarbonetos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

LAESPIGA, M. A. M. **Transporte de solutos em barreiras de material argiloso compactado (CCL) e geocomposto bentonítico (GCL): Fluxos diretos, acoplados e comportamento membrana**. 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

LEMOS, R. G. **Estudo do comportamento hidráulico, mecânico e químico de barreiras hidráulicas verticais, compostas por solo residual, bentonita e cimento sob ação de substâncias agressivas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006

LOPES, L. S. E. **Análise do comportamento mecânico e ambiental de misturas solo-cinzas de carvão mineral para camadas de base de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

LOPES, A. S.; GUIDOLIN, J.A. **Interpretação de Análise de Solo – Conceitos e Aplicações**. 3. ed. São Paulo: ANDA, 1989, 64 p.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Interpretação de Análise de Solo – Conceitos e Aplicações**. São Paulo: ANDA, 2004, 50 p.

LUKARIANTCHUKI, J. A. **Influência do teor de bentonita na condutividade hidráulica e a resistência ao cisalhamento de um solo arenoso utilizado como barreira selante.**

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LUZ, A. B.; OLIVEIRA, C. H. 2008. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações.** 2. Ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM, 2008, p.239-254.

MALLMANN, J. E. C.; ZWONOK, O. O Uso de cinzas volante e de fundo em concreto compactado com rolo (ccr). *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, IV, 2013, Gramado. Anais...* Criciúma: SATC, 2013. p. 220-234.

MARTINELLI, A. C. *et al.* Avaliação da Lixiviação do Cádmio e Níquel Provenientes da Degradação de Baterias Níquel-Cádmio em uma Coluna de Solo. **Química Nova**, v. 37(3), p. 465-472, 2014.

MENDES, L. J. N.; BAZZO, E.; TRACTEBEL, F. **Técnica de análise de carvão e depósitos de cinzas em unidades geradoras de vapor.** [S.l.: s.n.], 2007.

MENDOÇA, R. M. G. **Estudo da difusão de oxigênio em materiais de cobertura.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira.** Brasília: MME, 2017. 32 p.

MIRANDA, G. A. P. **Transporte eletrocinético de cromo em sedimentos da Baía de Guanabara.** 2008. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior.** 3 ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2005.

NARDI, J.V. **Estabilização de areia com cal e cinza volante; efeito do cimento como aditivo e de brita na mistura.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1975.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais.** Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p.: il.; 21 cm. (Estudos da Pós-Graduação) ISBN: 978-85-7485-186-0.

NOGUEIRA, J. C. A. *et al.* Construções com solo-cal: considerações sobre a transferência de tecnologia a uma comunidade na cidade de João Pessoa. **Interscientia**, João Pessoa, v. 4, n. 2, p.123-136, dez. 2016.

OLIVEIRA, A. L. C. de. **Estabilização de solos com adição de cal:** Um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal. 2010. 178 f.



- Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- PAGANI, B. R. **Estudo de misturas de solo-cimento-cinza-fibra para uso em barreiras verticais de contenção de contaminantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- PANDEY, V. C.; SINGH, N. Impact of fly ash incorporation in soil systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 136(1-2), p. 16-27, fev. 2010.
- PINTO, S. **Estabilização de areia com cal e cinza volante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1971.
- POZZOBON, C.E. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no Complexo Termelétrica Jorge Lacerda**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- PÓVOA, R. F. **Simulação do comportamento de um solo artificialmente estabilizado com o modelo Cam Clay Estruturado Modificado**. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.
- RHODE, G. M.; MACHADO, C. S. **Boletim Técnico: Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. 36. ed. Porto Alegre: Dinfor, 2016. 44 p.
- RHODE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W. **Cinzas de carvão fóssil no Brasil – Aspectos técnicos e ambientais**. Vol.1 Porto Alegre: CIENTEC, 2006.
- ROSA, A. D. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- SCHUMANN, W. Rochas e Minerais. Tradução: Rui Franco Ribeiro e Mario Del Rey. Editora: Ao Livro Técnico S/A, Rio de Janeiro/RJ, 1985.
- SILVA, A. A. **Contribuição ao estudo das bentonitas do município de Boa Vista estado da Paraíba**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- SIQUEIRA, J. S. **Reciclagem de resíduos a partir de cinzas de carvão mineral: Produção de argamassas**. Dissertação (Mestrado em engenharia química). Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- SOUZA, A. L. *et al.* Time domain reflectometry for studying potassium leaching in unsaturated soil columns. **Ciência Rural**, v. 39(4), p. 1219-1222, jul. 2009.
- SOUZA, H. P. **Uso de cinza de carvão mineral da termelétrica do Pecém como material de cobertura seca de depósitos de resíduos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará. 2018.

SPERA, S. T. *et al.* Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 32, p. 2613-2620, 2008

SOARES, A. B. *et al.* Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil. Part I: Materials characterization and numerical modeling. **Mine Water And The Environment**, [s.l.], v. 28, n. 3, p.219-231, 18 jun. 2009. Springer Nature.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10230-009-0077-5>.

SOARES, A. B. *et al.* Design of a dry cover pilot test for acid mine drainage abatement in southern Brazil, Part II: Pilot unit construction and initial monitoring. **Mine Water And The Environment**, [s.l.], v. 29, n. 4, p.277-284, 29 set. 2010. Springer Nature.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10230-010-0126-0>.

SOARES, V. **Utilização de mistura de solo saprolítico com bentonita na construção de revestimentos de fundo de aterros sanitários**. Dissertação (Mestrado em engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

TABORDA, L.F.; NÚÑEZ, W.P. Avaliação funcional de um pavimento com base em solo estabilizado com cinza volante e cal. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO MINERAL, IV, 2013, Gramado. **Anais...** Criciúma: SATC, 2013. p. 235-251.

TEIXEIRA et al (Ed.). **Manual de Método e Análise do Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 575 p.

TEIXEIRA, V. G.; COUTINHO, F. M. B.; GOMES, S. A. Principais métodos de caracterização da porosidade de resinas à base de divinilbenzeno. **Quim. Nova**. v. 24, No. 6, p. 808-818, 2001.

TEJASVI, A.; KUMAR, S. Impact of Fly Ash on Soil Properties. **National Academy Science Letters**, v. 35(1), p. 13-16, fev. 2012

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina, Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23)

UBALDO, M.O. **Uso de cinzas de carvão da composição de uma cobertura de rejeitos de mineração**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de cinzas de Resíduo Sólido Urbano para base de pavimentos**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2010.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação das cinzas de carvão mineral produzidas em usina termelétrica para construção de camadas de pavimentos**. Dissertação M.Sc. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, DET/UFC, Fortaleza, CE, Brasil, 2018.

## APÊNDICE A - COORDENADAS

IDENTIFICAÇÃO	COORDENADAS (UTM)	PROFUNDIDADE (M)	PROCEDIMENTO	ESTADO DO MATERIAL	MODO DE EXECUÇÃO	DATA DE EXECUÇÃO
PA-1	Long. 513974 m E Lat. 9603516 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	22/10/2015
PA-2	Long. 514051 m E Lat. 9603530 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	20/10/2015
PA-3	Long. 514117 m E Lat. 9603496 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	22/10/2015
PA-4	Long. 514005 m E Lat. 9603417 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	22/10/2015
PA-5	Long. 513972 m E Lat. 9603454 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	20/10/2015
PA-6	Long. 514107 m E Lat. 9603463 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	22/10/2015
PA-7	Long. 513471 m E Lat. 9603388 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	22/10/2015
PA-8	Long. 514101 m E Lat. 9603394 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	20/10/2015
PA-9	Long. 513971 m E Lat. 9603316 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	20/10/2015

<b>PA-10</b>	Long. 514027 m E Lat. 9603312 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-11</b>	Long. 514090 m E Lat. 9603326 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com <b>Mini escavadeira (Fab. Case Construcion / Mod. CX55B)</b> e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-12</b>	Long. 514060 m E Lat. 9603353 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	22/10/2015
<b>PA-13</b>	Long. 513971 m E Lat. 9603257 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	20/10/2015
<b>PA-14</b>	Long. 514024 m E Lat. 9603253 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-15</b>	Long. 514073 m E Lat. 9603246 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-16</b>	Long. 513986 m E Lat. 9603303 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-17</b>	Long. 514014 m E Lat. 9603299 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-18</b>	Long. 513987 m E Lat. 9603274 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-19</b>	Long. 514010 m E Lat. 9603264 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	21/10/2015
<b>PA-20</b>	Long. 51 m E Lat. 9603 m S	0,50-0,75	(1)	Compactado / Seco	Material escavado com picaretas e enxadas e coletado com pá.	

IDENTIFICAÇÃO	COORDENADAS (UTM)	PROFUNDIDADE (M)	PROCEDIMENTO	ESTADO DO MATERIAL	MODO DE EXECUÇÃO	DATA DE EXECUÇÃO
PP-1	Long. 514039 m E Lat. 9603510 m S	0,50-075 / 1,00-1,25 / 2,00-2,25 / 3,00-3,25 / 4,00-4,25 / 5,00-5,25	(3)	Compactado / Seco (0,00-3,00m) / Úmido (3,00m – 5,25)	Material escavado com <b>Escavadeira Hidráulica (Fab. Case Construcion / Mod. CX350B)</b> e coletado com pá.	28/10/2015 e 29/10/2015
PP-2	Long. 514033 m E Lat. 9603285 m S	0,50-075 / 1,00-1,25 / 2,00-2,25 / 3,00-3,25 / 4,00-4,25 / 5,00-5,25 / 6,00-6,25	(3)	Compactado / Seco (0,00-6,25m)	Material escavado com <b>Escavadeira Hidráulica (Fab. Case Construcion / Mod. CX350B)</b> e coletado com pá.	28/10/2015 e 29/10/2015
IDENTIFICAÇÃO	COORDENADAS (UTM)	PROFUNDIDADE (M)	PROCEDIMENTO	ESTADO DO MATERIAL	MODO DE EXECUÇÃO	DATA DE EXECUÇÃO
PECÉM-1	Long. 513915 m E Lat. 9603265 m S	-----	(2)	Material solto / Seco	Coletado apenas com pá.	22/10/2015
PECÉM-2	Long. 513898 m E Lat. 9603503 m S	-----	(2)	Material solto / Seco	Coletado apenas com pá.	22/10/2015

## APÊNDICE B – ADSORÇÃO

PA 17\_sumario

Date: 02/20/2018

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	PA_17				
Description	PA_17				
Comments					
Sample Weight	0.2809 g				
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp	200 °C	Operator	Regina
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molec	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	1016.3 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	
02/20/2018 00:25					
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	PA-17.RAW
Station #	1	Bath Temp.	77.30		

### AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

#### SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	1.982E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	7.079E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.838E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	7.198E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.873E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	1.768E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.871E+01	m <sup>2</sup> /g

#### PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius less than 1202.5 Å at P/Po = 0.99197.....	1.377E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.469E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.408E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.469E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.408E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.428E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.370E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	6.649E-03	cc/g

#### PORE SIZE DATA

Página 1

PA 17\_sumario

Average Pore Radius .....	1.557E+02	Å
BJH Method Adsorption Pore Radius (Mode).....	2.645E+00	Å
BJH Method Desorption Pore Radius (Mode).....	1.897E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Radius (Mode).....	2.645E+00	Å
DH Method Desorption Pore Radius (Mode).....	1.897E+01	Å
DR Method Micro Pore Width/2 .....	3.479E+01	Å

## DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : OFF  
 Last Po Acquired 784.20 mm Hg  
 Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 0

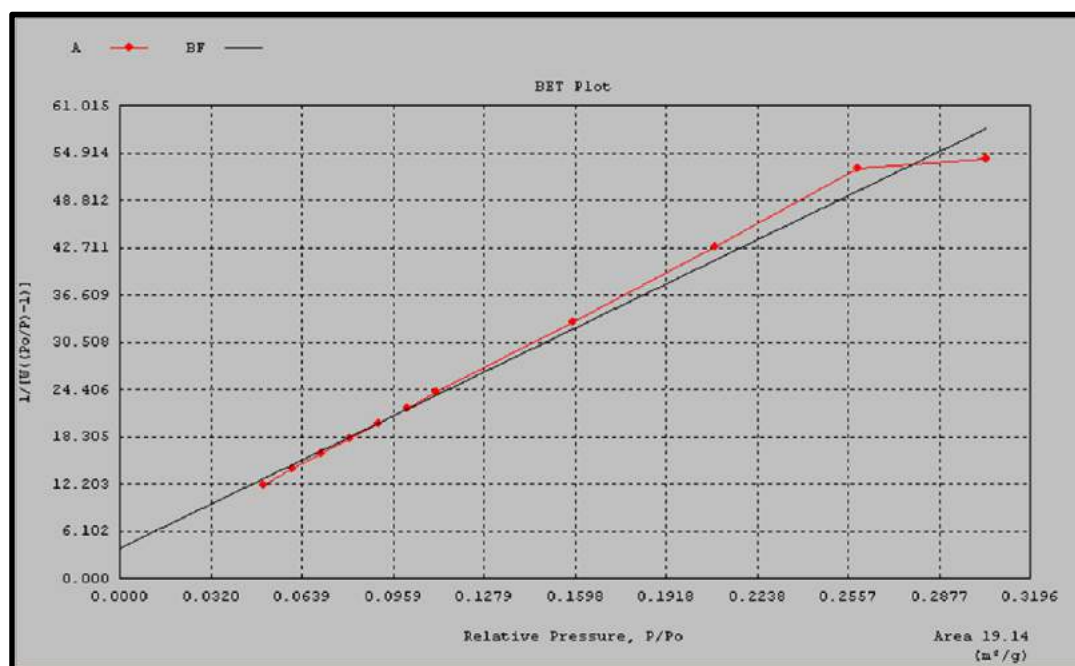
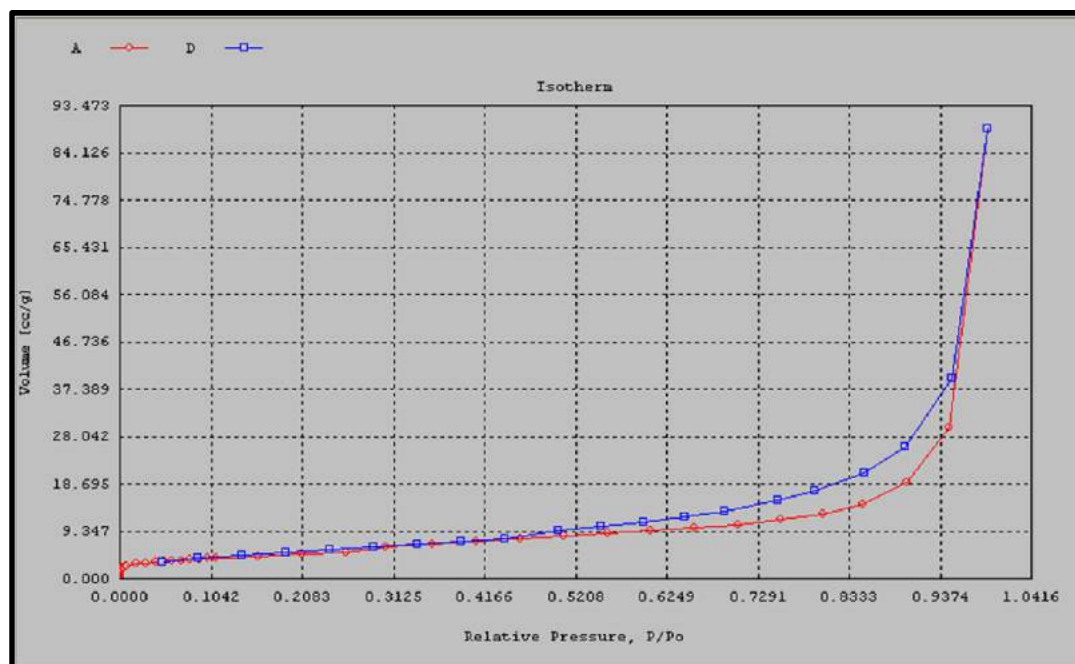
Interaction Constant (K) 0.0000 nm<sup>3</sup> x kJ/mol

## ADSORBATE MODEL PARAMETERS

Adsorbate Type = Nitrogen  
 Adsorbate Temp. = 77.3500 K  
 Molecular Weight = 28.0134 g/mol  
 Cross-Sect. Area = 16.2000 Å<sup>2</sup>/molecule  
 Liquid Density = 0.8080 g/cc  
 Critical Temp. = 126.2000 K  
 Critical Pressure = 33.5000 atm  
 Average Diameter = 0.3000 nm  
 Polarizability = 1.4600 (cc/molec) x 1e-24  
 Magnetic Suscept. = 2.0000 (cc/molec) x 1e-29  
 Molecular Density = 6.7000 (molec/cm<sup>3</sup>) x 1e14  
 Surface Tension = 8.8500 erg/cm<sup>2</sup>  
 Contact Angle = 0.0000 degrees  
 Supercritical Ads. Constant K = 1.0000

## ADSORBENT MODEL PARAMETERS

Adsorbent Type = Carbon  
 Atom Diameter = 0.3400 nm  
 Polarizability = 1.0200 (cc/molecule) x 1e-24  
 Magnetic Suscept. = 13.5000 (cc/molecule) x 1e-29  
 Surface Atom Density = 38.4500 (molec/cm<sup>2</sup>) x 1e14  
 Adsorbent Density = 2.2460 g/cc  
 DR exponent (n) = 2.0000





## PP-2 (1)\_sumario

Date: 02/16/2018

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	PP2_1				
Description	Cinza PP2_1				
Comments					
Sample Weight	0.3637 g				
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp	200 °C	Operator	Regina
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molec	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	1332.6 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	
02/09/2018 08:37					
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	
C_PP2_1.RAW					
Station #	1	Bath Temp.	77.30		

## AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

## SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.701E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.473E+02	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.657E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.491E+02	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.825E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	2.701E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	3.109E+01	m <sup>2</sup> /g

## PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius less than 1114.0 Å at P/Po = 0.99132.....	1.309E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.489E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.340E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.489E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.340E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.448E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.311E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	1.105E-02	cc/g

## PORE SIZE DATA

PP-2 (1)\_sumario

Average Pore Radius .....	9.692E+01	Å
BJH Method Adsorption Pore Radius (Mode).....	2.513E+00	Å
BJH Method Desorption Pore Radius (Mode).....	1.894E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Radius (Mode).....	2.513E+00	Å
DH Method Desorption Pore Radius (Mode).....	1.894E+01	Å
DR Method Micro Pore Width/2 .....	3.520E+01	Å

#### DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : OFF  
 Last Po Acquired 789.52 mm Hg  
 Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 0

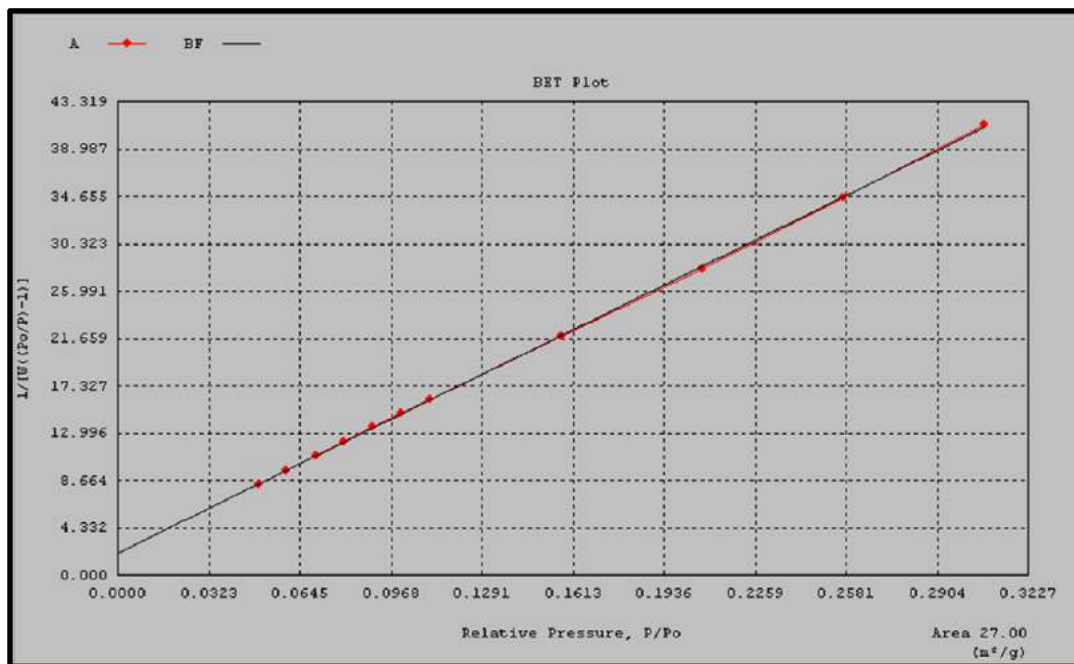
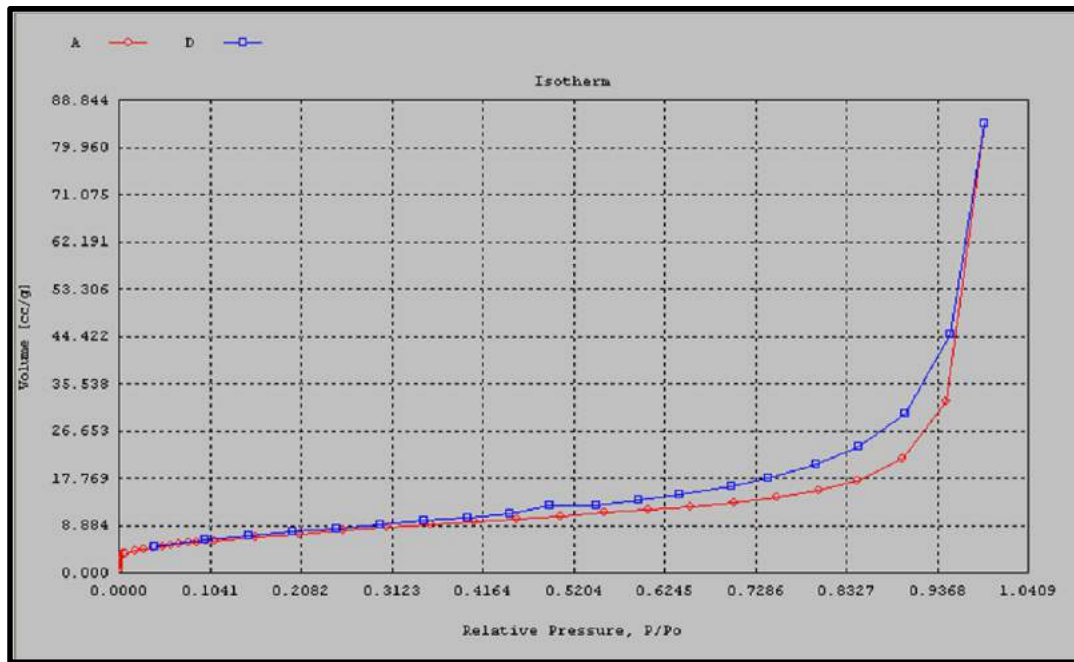
Interaction Constant (K) 0.0000 nm<sup>3</sup> x kJ/mol

#### ADSORBATE MODEL PARAMETERS

Adsorbate Type = Nitrogen  
 Adsorbate Temp. = 77.3500 K  
 Molecular Weight = 28.0134 g/mol  
 Cross-Sect. Area = 16.2000 Å<sup>2</sup>/molecule  
 Liquid Density = 0.8080 g/cc  
 Critical Temp. = 126.2000 K  
 Critical Pressure = 33.5000 atm  
 Average Diameter = 0.3000 nm  
 Polarizability = 1.4600 (cc/molec) x 1e-24  
 Magnetic Suscept. = 2.0000 (cc/molec) x 1e-29  
 Molecular Density = 6.7000 (molec/cm<sup>2</sup>) x 1e14  
 Surface Tension = 8.8500 erg/cm<sup>2</sup>  
 Contact Angle = 0.0000 degrees  
 Supercritical Ads. Constant K = 1.0000

#### ADSORBENT MODEL PARAMETERS

Adsorbent Type = Carbon  
 Atom Diameter = 0.3400 nm  
 Polarizability = 1.0200 (cc/molecule) x 1e-24  
 Magnetic Suscept. = 13.5000 (cc/molecule) x 1e-29  
 Surface Atom Density = 38.4500 (molec/cm<sup>2</sup>) x 1e14  
 Adsorbent Density = 2.2460 g/cc  
 DR exponent (n) = 2.0000



## PECEM\_1\_sumario

Date: 02/16/2018

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	PECEM_1					
Description	Cinza Leve PECEM_1					
Comments						
Sample Weight	0.1686 g					
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp	200 °C	Operator	Regina	
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molec	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	795.3 min	
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run		
02/14/2018 23:39						
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name		
CL_PEC~1.RAW						
Station #	1	Bath Temp.	77.30			

## AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

## SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	2.486E+00	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.402E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.320E+00	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.891E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	3.480E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	2.346E+00	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	4.335E+00	m <sup>2</sup> /g

## PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius		
less than 1245.8 Å at P/Po = 0.99225.....	2.803E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.088E-02	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	2.833E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores		
in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	3.088E-02	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores		
in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	2.833E-02	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	3.101E-02	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	2.756E-02	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	1.541E-03	cc/g

## PORE SIZE DATA

```

                                PECEM 1_sumario
Average Pore Radius ..... 2.389E+02 Å
BJH Method Adsorption Pore Radius (Mode)..... 3.484E+00 Å
BJH Method Desorption Pore Radius (Mode)..... 1.898E+01 Å
DH Method Adsorption Pore Radius (Mode)..... 3.484E+00 Å
DH Method Desorption Pore Radius (Mode)..... 1.898E+01 Å
DR Method Micro Pore Width/2 ..... 3.681E+01 Å

```

#### DATA REDUCTION PARAMETERS

```

Thermal Transpiration : OFF
Last Po Acquired 783.64 mm Hg
Additional Initialization Information Not Recorded.

```

BJH/DH Moving Average Size : 0

Interaction Constant (K) 0.0000 nm<sup>3</sup> x kJ/mol

#### ADSORBATE MODEL PARAMETERS

```

Adsorbate Type = Nitrogen
Adsorbate Temp. = 77.3500 K
Molecular Weight = 28.0134 g/mol
Cross-Sect. Area = 16.2000 Å2/molecule
Liquid Density = 0.8080 g/cc
Critical Temp. = 126.2000 K
Critical Pressure = 33.5000 atm
Average Diameter = 0.3000 nm
Polarizability = 1.4600 (cc/molec) x 1e-24
Magnetic Suscept. = 2.0000 (cc/molec) x 1e-29
Molecular Density = 6.7000 (molec/cm3) x 1e14
Surface Tension = 8.8500 erg/cm2
Contact Angle = 0.0000 degrees
Supercritical Ads. Constant K = 1.0000

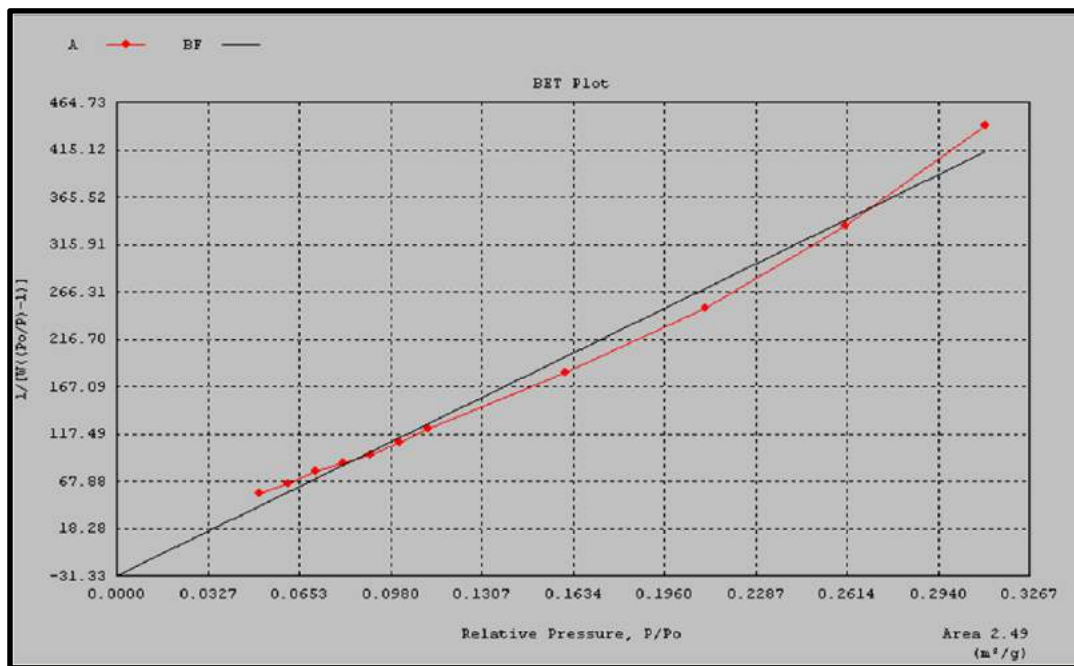
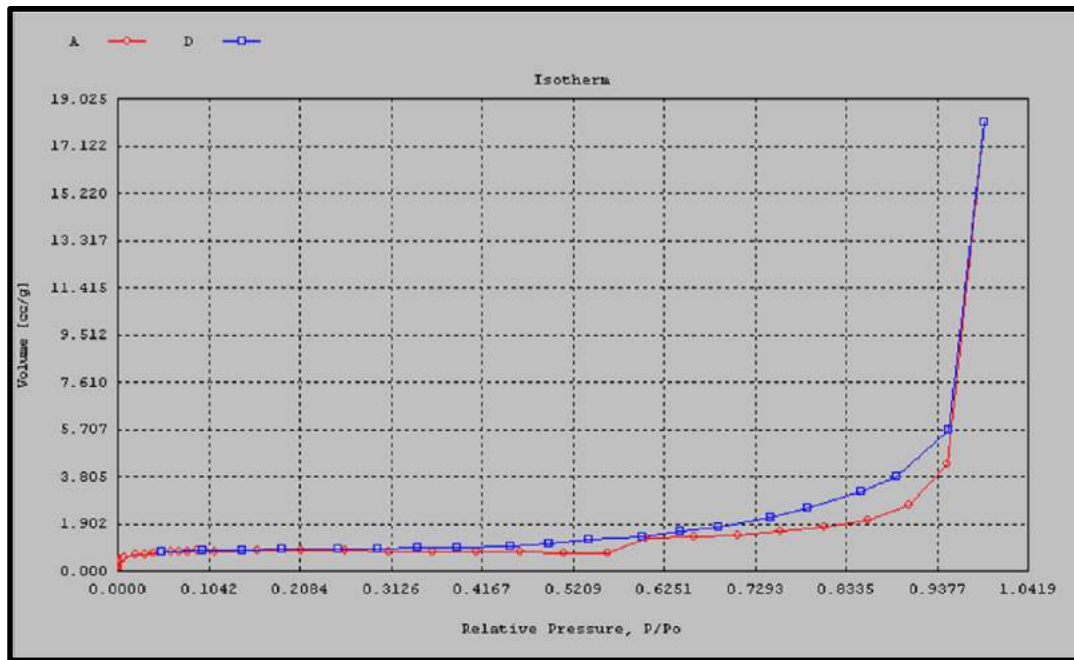
```

#### ADSORBENT MODEL PARAMETERS

```

Adsorbent Type = Carbon
Atom Diameter = 0.3400 nm
Polarizability = 1.0200 (cc/molecule) x 1e-24
Magnetic Suscept. = 13.5000 (cc/molecule) x 1e-29
Surface Atom Density = 38.4500 (molec/cm2) x 1e14
Adsorbent Density = 2.2460 g/cc
DR exponent (n) = 2.0000

```



## Cinza composta\_sumario

Date: 02/16/2018

Quantachrome Corporation  
 Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report  
 Autosorb for Windows® Version 1.24

Sample ID	Cinza Composta				
Description	Cinza Composta				
Comments					
Sample Weight	0.2378 g				
Adsorbate	Nitrogen	Outgas Temp	200 °C	Operator	Regina
Cross-Sec Area	16.2 Å <sup>2</sup> /molec	Outgas Time	24.0 hrs	Analysis Time	981.8 min
NonIdeality	6.580E-05	P/Po Toler	3	End of Run	
02/10/2018 01:21					
Molecular Wt	28.0134 g/mol	Equil Time	3	File Name	
CINZAC~1.RAW					
Station #	1	Bath Temp.	77.30		

## AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

## SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	1.762E+01	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.001E+02	m <sup>2</sup> /g
BJH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.221E+01	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Adsorption Surface Area.....	1.013E+02	m <sup>2</sup> /g
DH Method Cumulative Desorption Surface Area.....	2.288E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method External Surface Area.....	1.748E+01	m <sup>2</sup> /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	0.000E+00	m <sup>2</sup> /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.945E+01	m <sup>2</sup> /g

## PORE VOLUME DATA

Total Pore Volume for pores with Radius less than 1167.1 Å at P/Po = 0.99172.....	1.036E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.155E-01	cc/g
BJH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.049E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Adsorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.155E-01	cc/g
BJH Interpolated Cumulative Desorption Pore Volume for pores in the range of 5000.0 to 0.0 Å Diameter.....	1.049E-01	cc/g
DH Method Cumulative Adsorption Pore Volume.....	1.124E-01	cc/g
DH Method Cumulative Desorption Pore Volume.....	1.023E-01	cc/g
t-Method Micro Pore Volume.....	0.000E+00	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	6.914E-03	cc/g

## PORE SIZE DATA

Cinza composta\_sumario

Average Pore Radius .....	1.186E+02	Å
BJH Method Adsorption Pore Radius (Mode).....	2.376E+00	Å
BJH Method Desorption Pore Radius (Mode).....	1.878E+01	Å
DH Method Adsorption Pore Radius (Mode).....	2.376E+00	Å
DH Method Desorption Pore Radius (Mode).....	1.878E+01	Å
DR Method Micro Pore Width/2 .....	3.091E+01	Å

## DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : OFF  
 Last Po Acquired 790.52 mm Hg  
 Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 0

Interaction Constant (K) 0.0000 nm<sup>3</sup> x kJ/mol

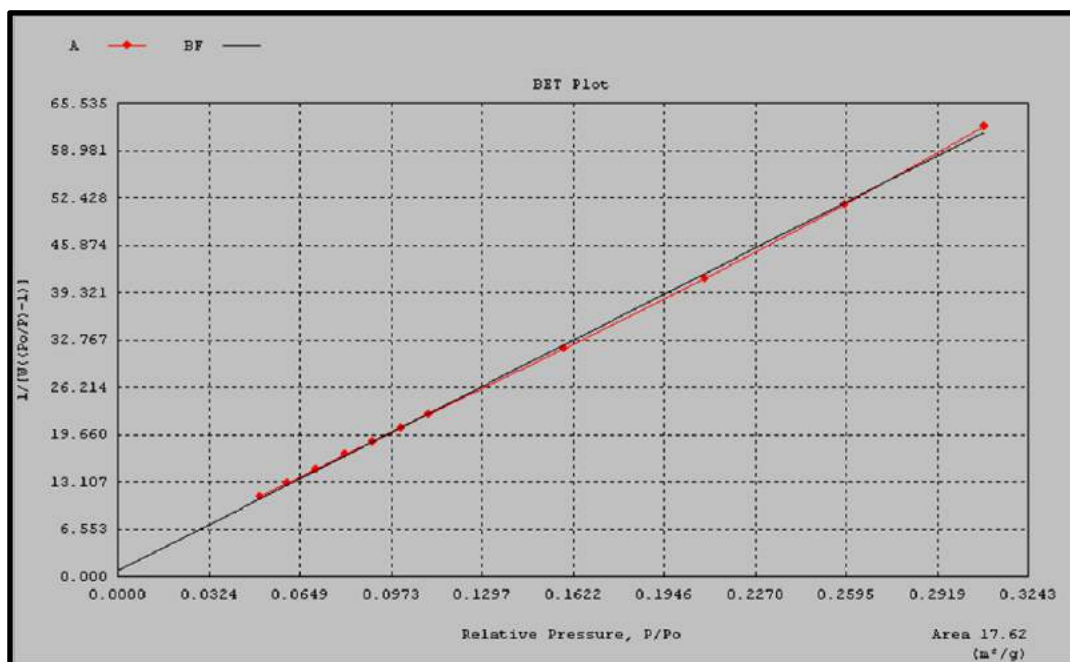
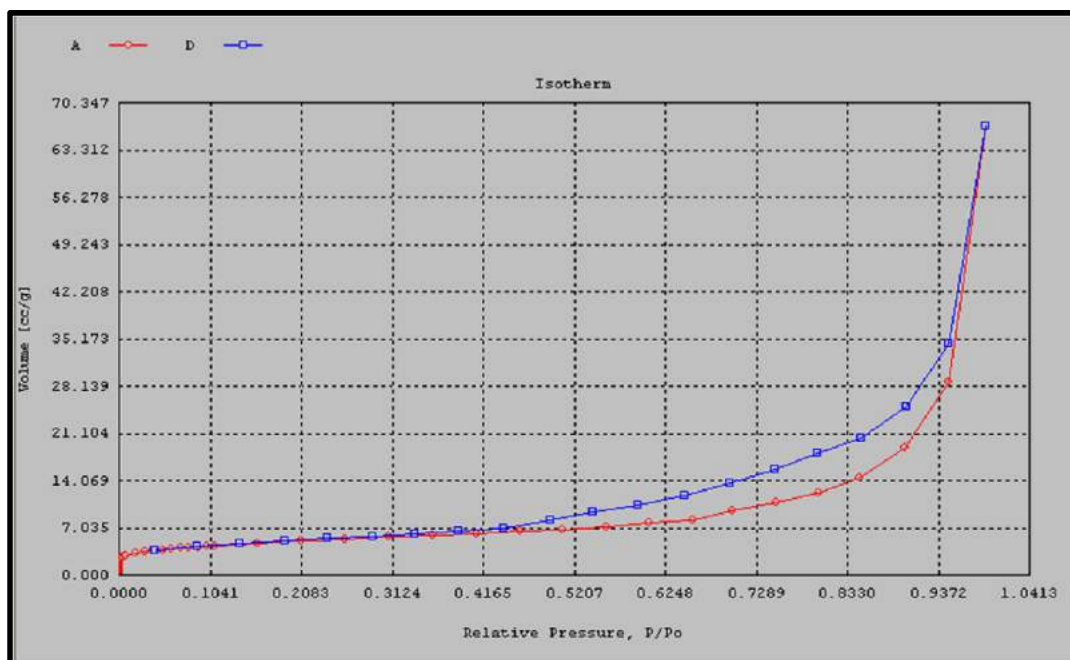
## ADSORBATE MODEL PARAMETERS

Adsorbate Type = Nitrogen  
 Adsorbate Temp. = 77.3500 K  
 Molecular Weight = 28.0134 g/mol  
 Cross-Sect. Area = 16.2000 Å<sup>2</sup>/molecule  
 Liquid Density = 0.8080 g/cc  
 Critical Temp. = 126.2000 K  
 Critical Pressure = 33.5000 atm  
 Average Diameter = 0.3000 nm  
 Polarizability = 1.4600 (cc/molec) x 1e-24  
 Magnetic Suscept. = 2.0000 (cc/molec) x 1e-29  
 Molecular Density = 6.7000 (molec/cm<sup>2</sup>) x 1e14  
 Surface Tension = 8.8500 erg/cm<sup>2</sup>  
 Contact Angle = 0.0000 degrees  
 Supercritical Ads. Constant K = 1.0000

## ADSORBENT MODEL PARAMETERS

Adsorbent Type = Carbon  
 Atom Diameter = 0.3400 nm  
 Polarizability = 1.0200 (cc/molecule) x 1e-24  
 Magnetic Suscept. = 13.5000 (cc/molecule) x 1e-29  
 Surface Atom Density = 38.4500 (molec/cm<sup>2</sup>) x 1e14  
 Adsorbent Density = 2.2460 g/cc  
 DR exponent (n) = 2.0000



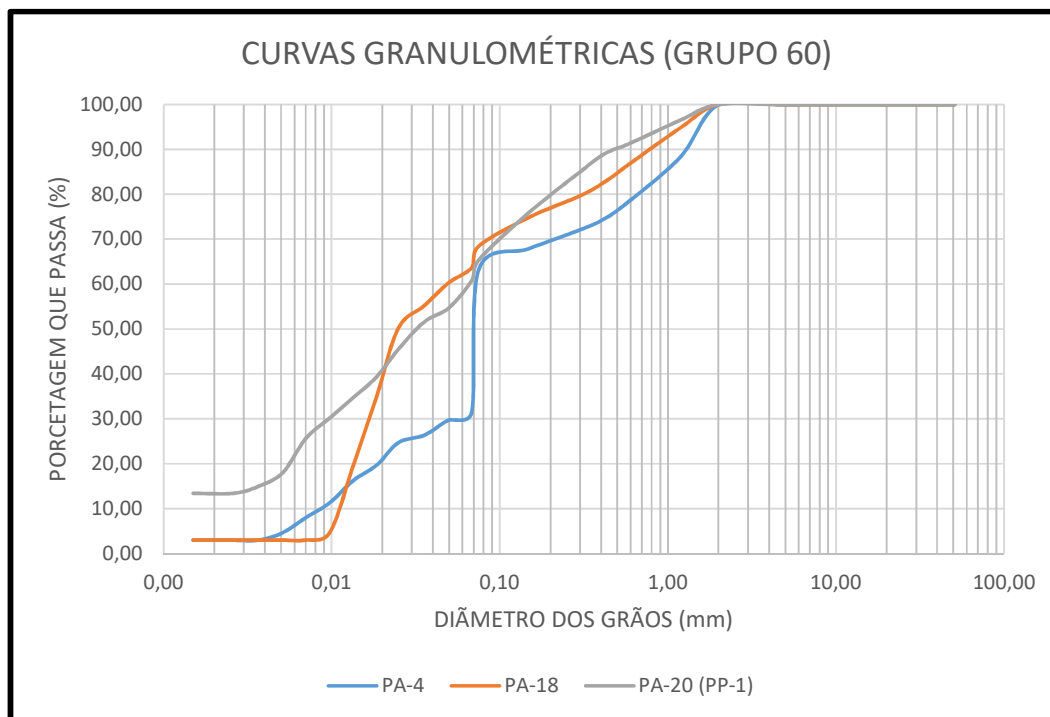


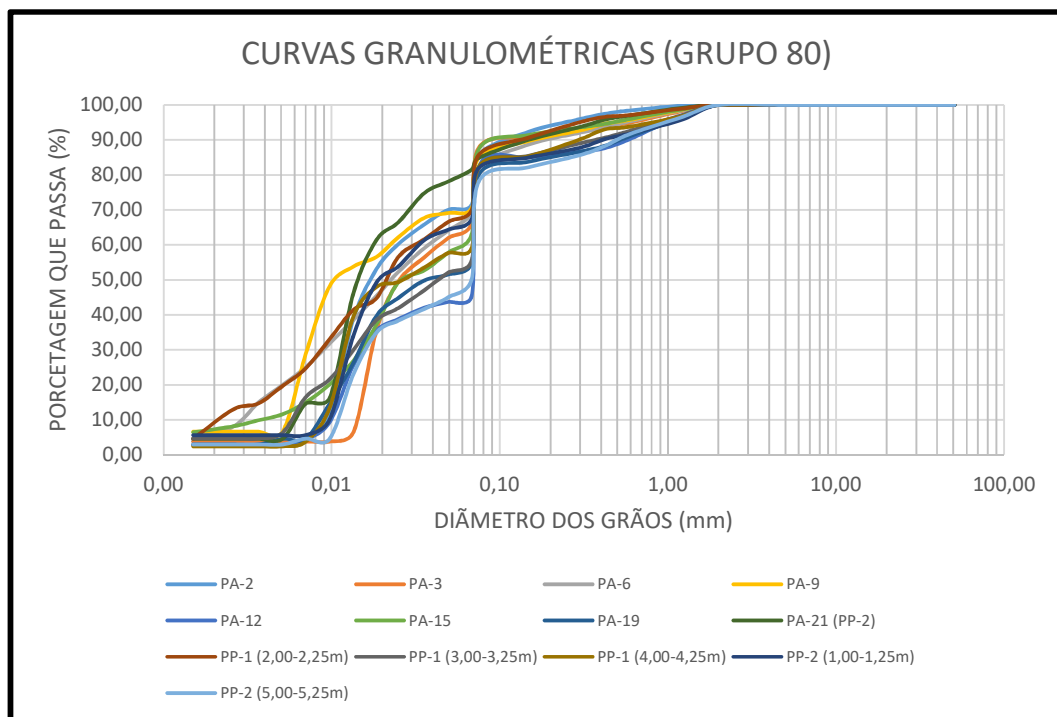
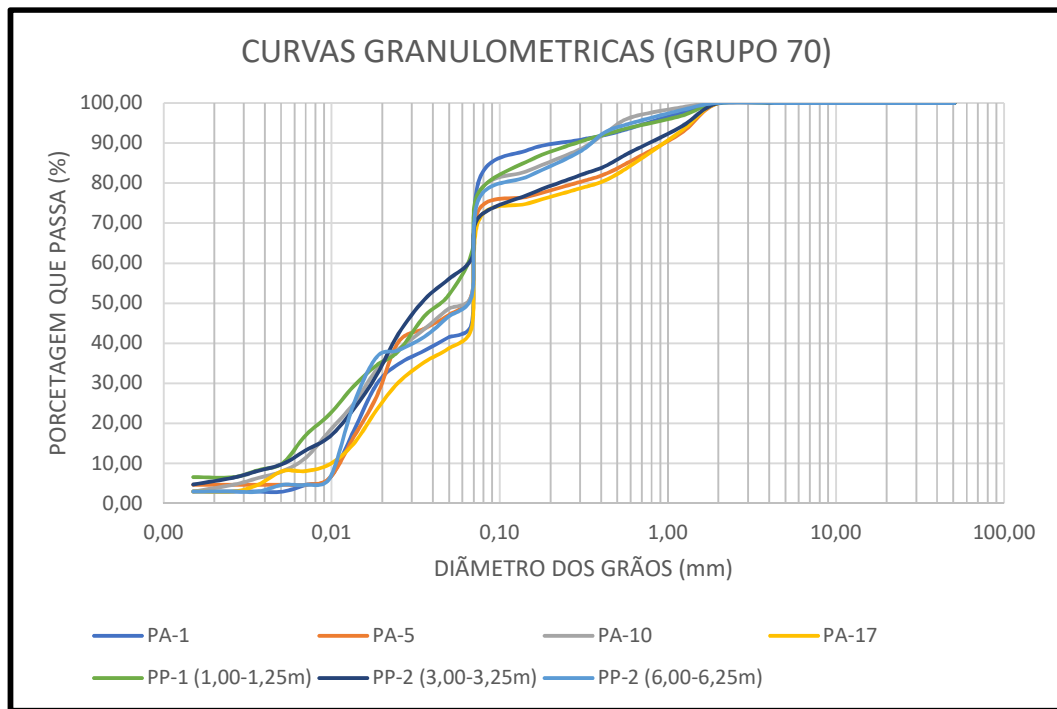
## APÊNDICE C – ANÁLISE GRANULOMETRICA

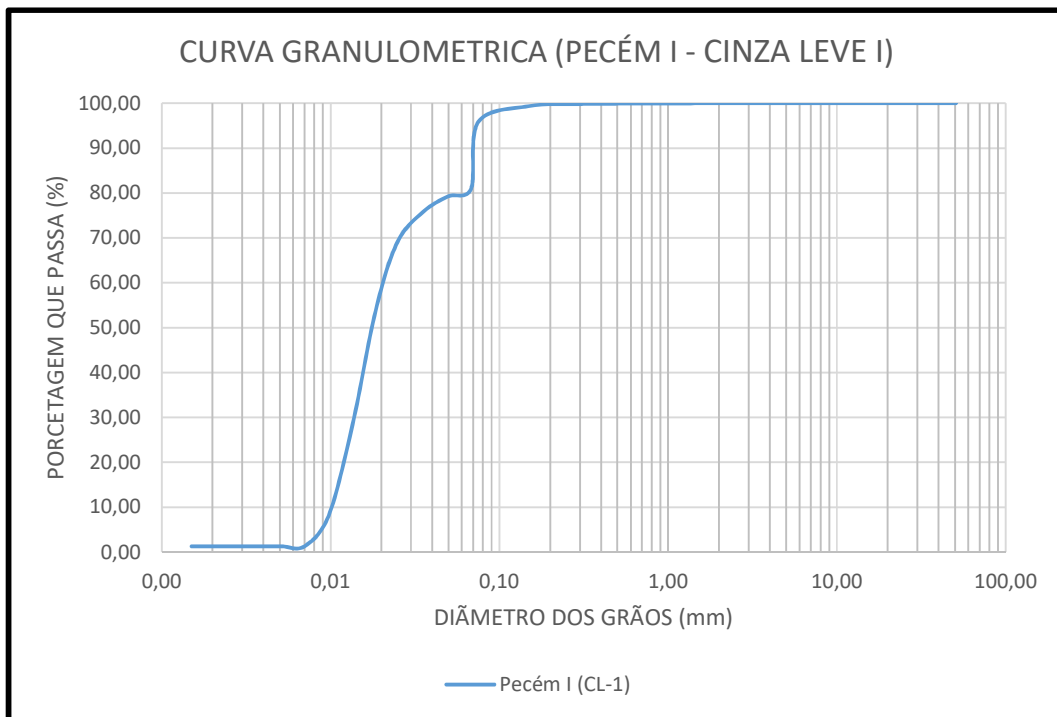
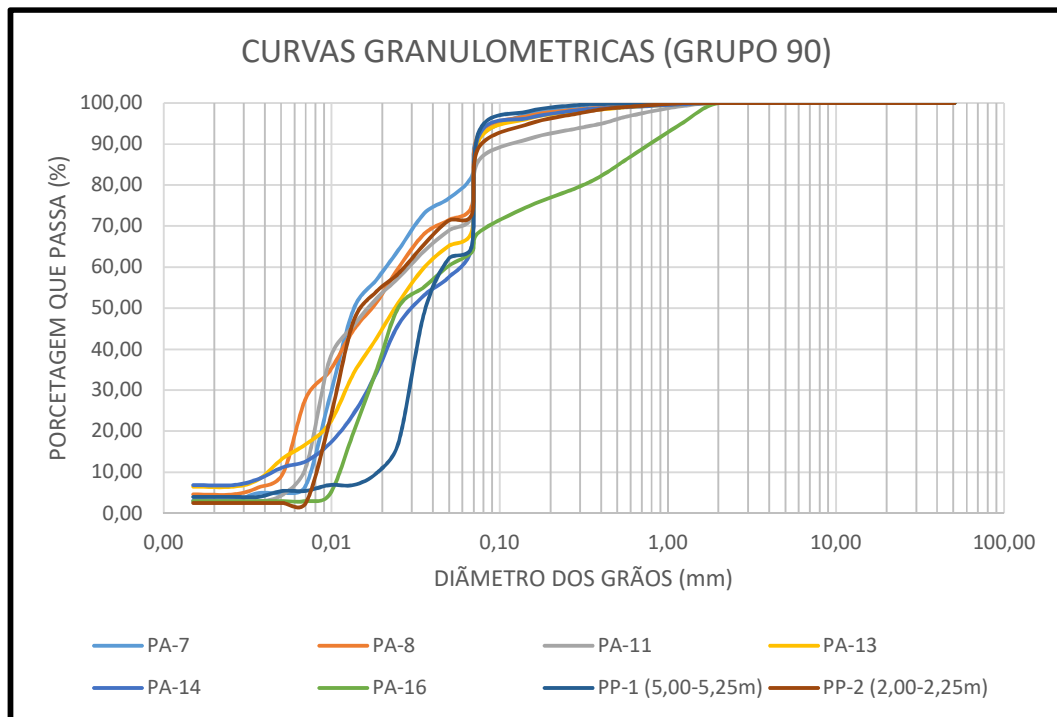
AMOSTRA	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Final (%)	Silte (%)	Argila (%)	% #200	Gs	SUCS
<b>PA</b>									
<b>Pontos de Superfície (0,50 &lt; p &lt; 0,75m)</b>									
PA-1	0	0	8	11	78	3	81	2,48	ML
PA-2	0	0	3	12	82	4	86	2,46	ML
PA-3	0	0	6	6	84	4	88	2,51	ML
PA-4	0	0	25	11	59	5	64	2,49	ML
PA-5	0	0	18	9	69	5	74	2,45	ML
PA-6	0	0	7	11	62	20	82	2,43	ML
PA-7	0	0	1	8	87	5	92	2,26	ML
PA-8	0	0	1	6	83	10	93	2,49	ML
PA-9	0	0	5	10	78	7	85	2,50	ML
PA-10	0	0	8	15	69	8	77	2,46	ML
PA-11	0	0	5	9	81	5	86	2,55	ML
PA-12	0	0	12	5	79	3	82	2,59	ML
PA-13	0	0	2	8	77	13	90	2,38	ML
PA-14	0	0	1	7	81	11	92	2,36	ML
PA-15	0	0	5	7	76	12	88	2,40	ML
PA-16	0	0	1	8	75	15	90	2,35	ML
PA-17	0	0	19	10	63	8	71	2,44	ML
PA-18	0	0	17	14	66	3	69	2,46	ML
PA-19	0	0	12	8	75	5	80	2,49	ML
PA-20 (PP-1)	0	0	11	24	47	18	65	2,21	ML
PA-21 (PP-2)	0	0	4	11	80	5	85	2,49	ML
<b>PP-1 (PA-20)</b>									
<b>Pontos em Profundidade (&gt; 1,00m) (1)</b>									
PP-1 (1,00-1,25m)	0	0	8	14	68	10	78	2,34	ML
PP-1 (2,00-2,25m)	0	0	3	11	66	20	86	2,49	ML
PP-1 (3,00-3,25m)	0	0	9	9	76	6	82	2,44	ML
PP-1 (4,00-4,25m)	0	0	7	11	80	2	82	2,53	ML
PP-1 (5,00-5,25m)	0	0	0	7	88	5	93	2,36	ML
<b>PP-2 (PA-21)</b>									
<b>Pontos em Profundidade (&gt; 1,00m) (2)</b>									
PP-2 (1,00-1,25m)	0	0	10	8	76	6	82	2,24	ML
PP-2 (2,00-2,25m)	0	0	1	9	87	3	90	2,40	ML
PP-2 (3,00-3,25m)	0	0	16	13	62	10	72	2,42	ML
PP-2 (4,00-4,25m)	0	0	3	14	78	5	83	2,42	ML
PP-2 (5,00-5,25m)	0	0	12	10	75	3	78	2,46	ML
PP-2 (6,00-6,25m)	0	0	7	17	71	5	76	2,47	ML
<b>CL</b>									
<b>Cinza Leves</b>									
Pecém I (CL-1)	0	0	0	4	95	1	96	2,44	ML

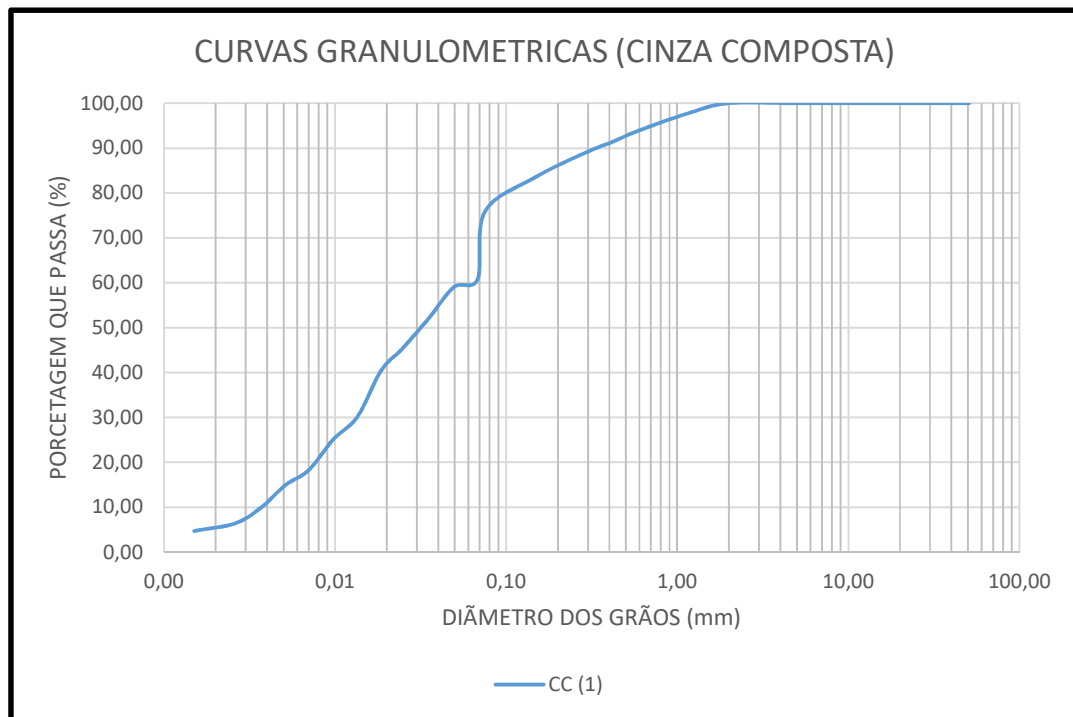
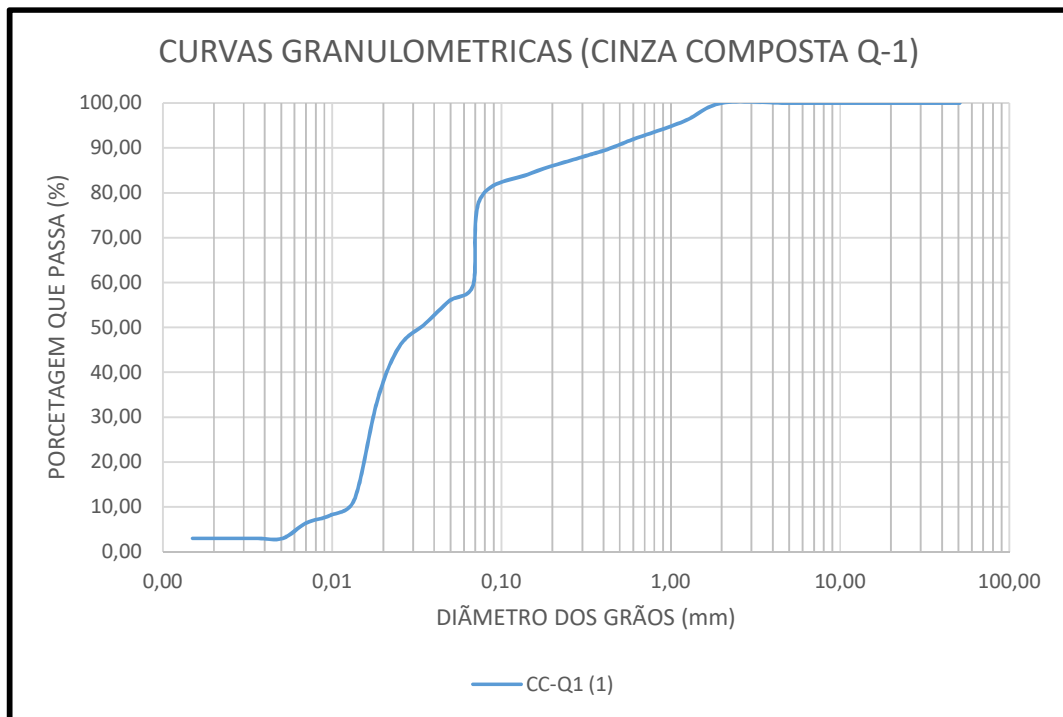
GRUPO	FAIXA (% FINOS)	AMOSTRAS POR FAIXA
GRUPO 60	60 – 69%	PA-4; PA-18 e PA-20 (PP-1)
GRUPO 70	70 – 79%	PA-1; PA-5; PA-10; PA-17; PP-1 (1,00-1,25m); PP-2 (3,00-3,25m); PP-2 (6,00-6,25m)
GRUPO 80	80 – 89%	PA-2; PA-3; PA-6; PA-9; PA-12; PA-15; PA-19; PA-21 (PP-2); PP-1 (2,00-2,25m); PP-1 (3,00-3,25m); PP-1 (4,00-4,25m); PP-2 (1,00-1,25m) e PP-2 (5,00-5,25m)
GRUPO 90	90 – 99%	PA-7; PA-8; PA-11; PA-13; PA-14; PA-16; PP-1 (5,00-5,25m) e PP-2 (2,00-2,25m)

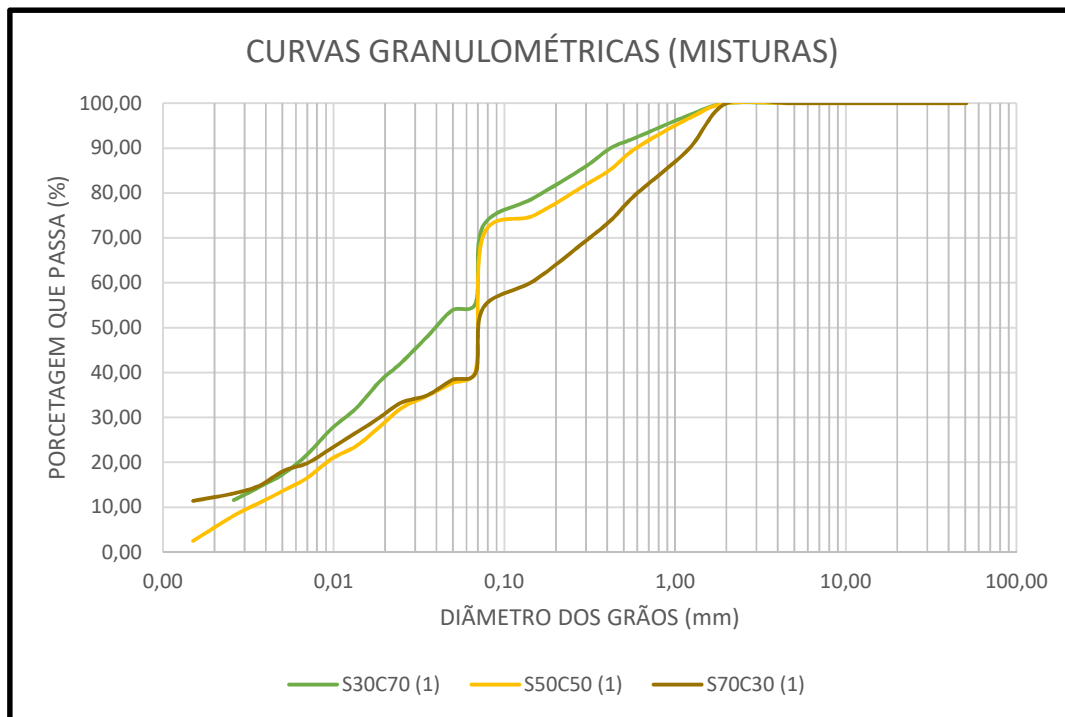
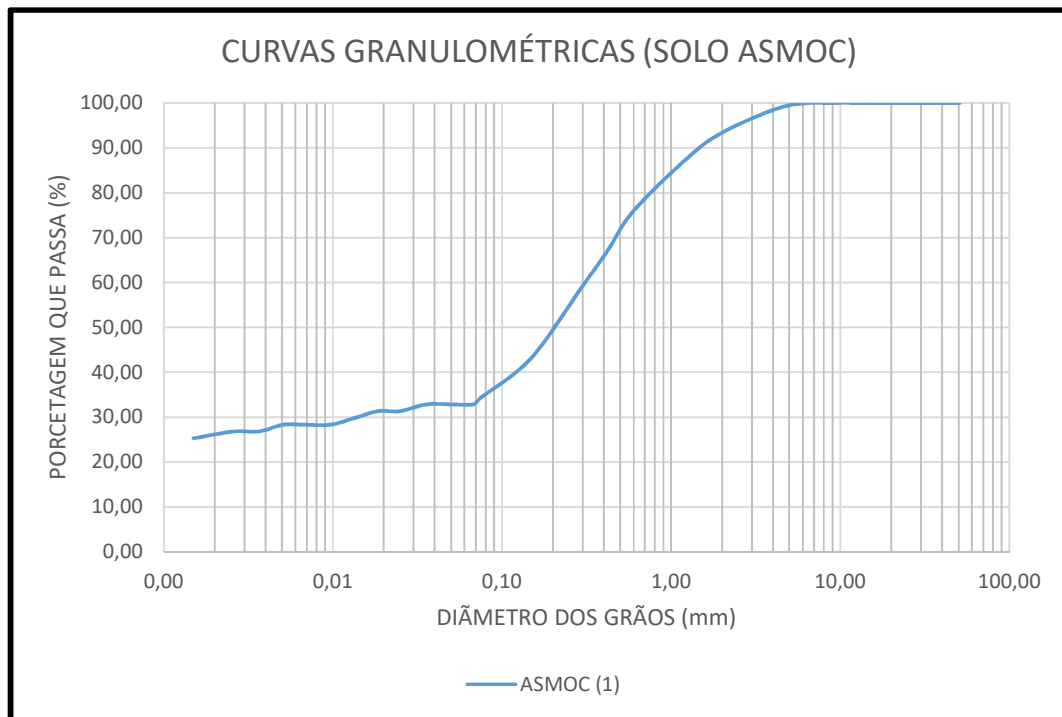
AMOSTRA	Pedregulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Final (%)	Silte (%)	Argila (%)	% #200	Gs	SUCS
CC	0	0	9	16	61	15	76	2,43	ML
CC-Q1	0	0	10	11	76	3	79	2,41	ML
Solo ASMOC	1	6	26	33	5	29	34	2,50	SC
S30C70	0	0	15	15	56	14	70	2,39	ML
S50C50	0	0	18	18	48	16	64	2,45	ML
S70C30	0	0	26	20	36	18	54	2,46	ML







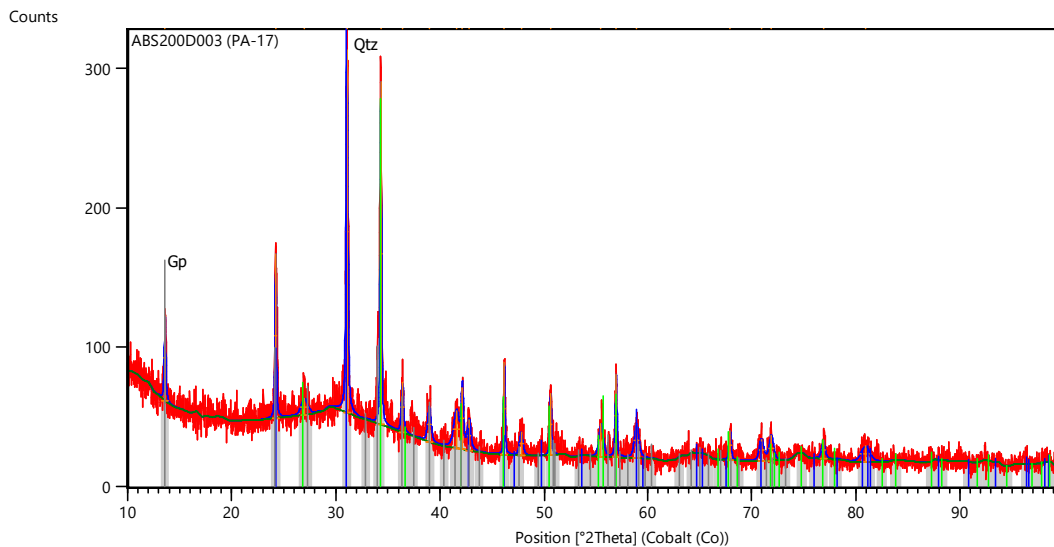




## APÊNDICE D – DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

PA-17

Main Graphics, Analyze View:



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
13,6113	61,00	0,1872	7,54843	23,42
24,2357	118,15	0,1560	4,26110	45,37
26,9927	11,69	0,7488	3,83278	4,49
31,0752	260,44	0,2184	3,33932	100,00
34,3344	246,22	0,1560	3,03057	94,54
36,4063	35,49	0,2496	2,86345	13,63
38,9894	25,18	0,3744	2,68041	9,67
41,5929	26,69	0,6240	2,51938	10,25
42,1589	43,82	0,2496	2,48707	16,83
42,8036	21,76	0,3744	2,45133	8,36
46,1849	65,81	0,1560	2,28064	25,27
47,8041	16,40	0,3744	2,20770	6,30
50,7062	43,94	0,1872	2,08901	16,87
55,5550	23,47	0,4992	1,91938	9,01
56,9923	59,40	0,1872	1,87488	22,81
58,9626	24,46	0,4992	1,81758	9,39
67,9324	20,87	0,2496	1,60104	8,01
70,9464	15,27	0,4992	1,54139	5,86
71,8894	18,03	0,4992	1,52385	6,92
76,8900	12,94	0,3744	1,43866	4,97
80,9297	11,18	0,9984	1,37832	4,29

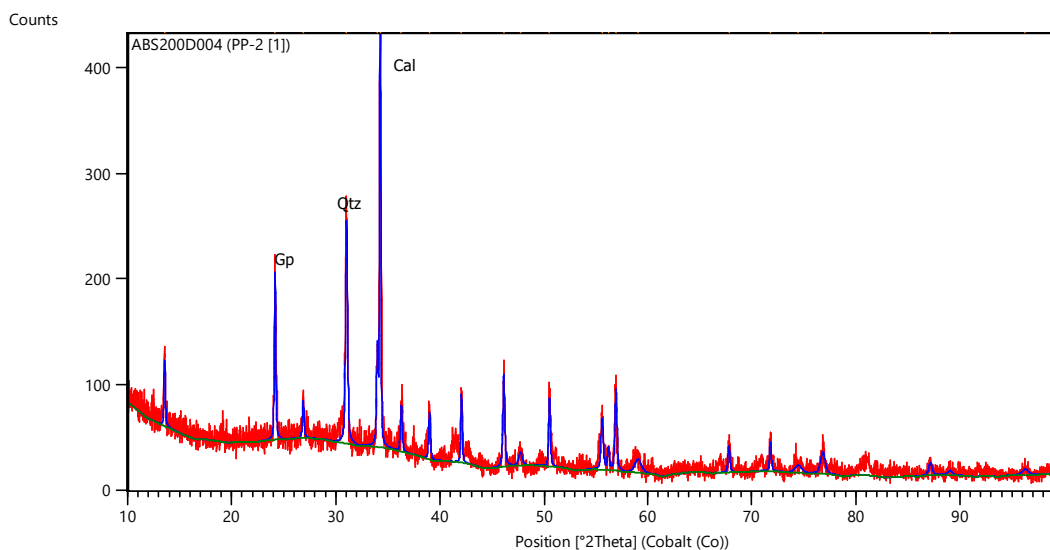
Pattern List:



Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	03-065-0466	51	Silicon Oxide	0,000	0,883	SiO <sub>2</sub>
*	01-086-0174	54	Calcium Carbonate	0,000	0,711	Ca(CO <sub>3</sub> )
*	00-006-0046	33	Calcium Sulfate Hydrate	0,000	0,307	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O

## PP-2 (1)

## Main Graphics, Analyze View:



## Peak List:

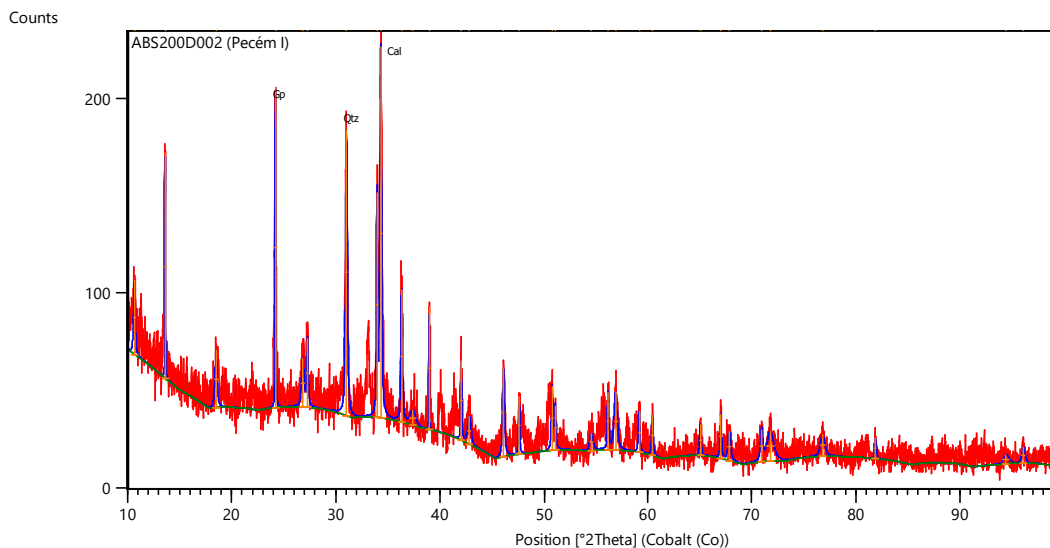
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
13,5842	63,70	0,1560	7,56344	16,31
24,1747	160,60	0,1560	4,27170	41,12
26,8818	36,19	0,1872	3,84829	9,27
31,0342	211,60	0,2184	3,34362	54,18
34,0014	90,79	0,1872	3,05936	23,25
34,2673	390,53	0,1248	3,03632	100,00
36,2911	43,75	0,1872	2,87223	11,20
39,0112	44,94	0,1872	2,67897	11,51
42,0688	64,75	0,1560	2,49215	16,58
46,1349	87,67	0,2184	2,28298	22,45
47,7249	12,30	0,3744	2,21115	3,15
50,5952	64,86	0,1872	2,09329	16,61
55,6519	48,61	0,2496	1,91630	12,45
56,2535	20,46	0,1872	1,89745	5,24
56,9763	77,63	0,2184	1,87536	19,88
59,0985	12,59	0,7488	1,81378	3,22
67,8197	25,24	0,2184	1,60338	6,46
71,8083	27,48	0,1872	1,52534	7,04
74,4537	7,13	0,7488	1,47859	1,82
76,8337	20,90	0,4992	1,43955	5,35
87,1579	11,56	0,3744	1,29760	2,96
89,0371	4,27	0,4992	1,27579	1,09
96,2703	5,98	0,7488	1,20113	1,53

## Pattern List:

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-1762	68	Calcium Carbonate	0,000	0,987	Ca(CO <sub>3</sub> )
*	03-065-0466	40	Silicon Oxide	0,000	0,635	SiO <sub>2</sub>
*	01-083-1564	7	Aluminum Silicate	0,000	0,094	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>
*	01-074-1904	43	Calcium Sulfate Hydrate	0,000	0,258	Ca(SO <sub>4</sub> ).2(H <sub>2</sub> O)

## Pecém 1 (CL-1)

## Main Graphics, Analyze View:



## Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
10,6665	38,08	0,1872	9,62369	19,96
13,6398	115,80	0,0624	7,53272	60,69
18,4999	29,14	0,2496	5,56486	15,27
24,2073	164,61	0,0624	4,26604	86,27
26,8393	24,66	0,3120	3,85426	12,92
27,2946	35,22	0,1560	3,79116	18,46
31,0321	146,97	0,2184	3,34384	77,02
33,9638	115,69	0,1248	3,06265	60,63
34,3209	190,81	0,1872	3,03172	100,00
36,3227	68,00	0,1872	2,86982	35,64
37,3928	7,51	0,6240	2,79050	3,94
38,9665	62,64	0,0468	2,68193	32,83
42,0511	40,79	0,1248	2,49316	21,38
42,8214	14,00	0,3744	2,45036	7,34
46,1066	45,45	0,2184	2,28431	23,82
47,6116	29,30	0,1248	2,21611	15,35
50,8605	32,84	0,1872	2,08309	17,21
51,1483	22,40	0,1560	2,07215	11,74
54,6083	8,54	0,3744	1,95003	4,48
56,2152	29,13	0,1560	1,89864	15,26
56,9439	29,53	0,3744	1,87634	15,47
59,2105	20,81	0,1872	1,81066	10,90
60,4792	20,45	0,1872	1,77616	10,72
65,0742	16,03	0,1872	1,66313	8,40
67,0434	22,70	0,1560	1,61974	11,90
67,8607	14,90	0,3120	1,60253	7,81

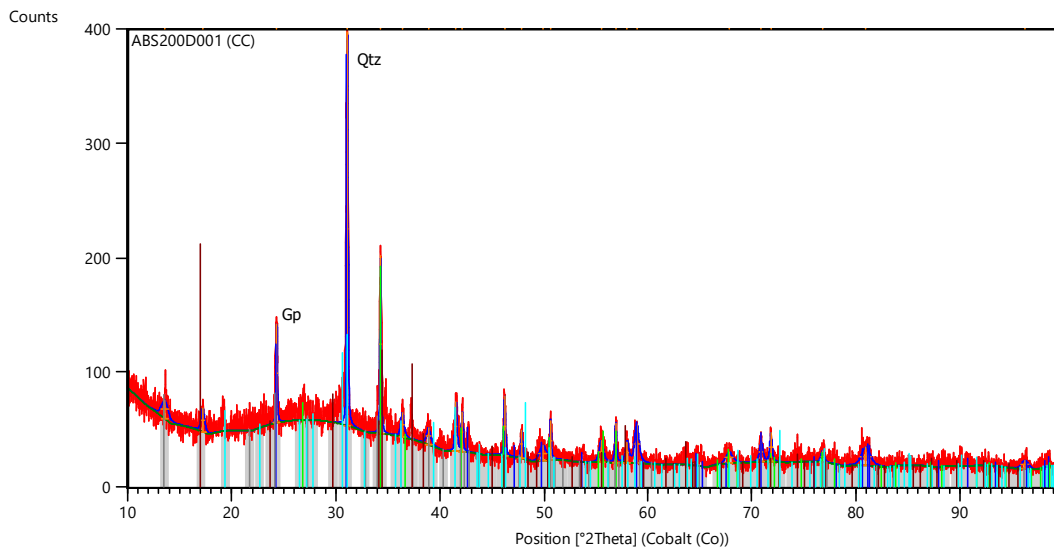
70,9743	16,29	0,2496	1,54087	8,54
71,7924	15,27	0,7488	1,52563	8,00
76,8106	10,89	0,4992	1,43992	5,71
81,8773	10,61	0,1872	1,36513	5,56
94,4376	4,39	0,6240	1,21875	2,30
96,0954	7,92	0,3744	1,20277	4,15

**Pattern List:**

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	01-078-1254	5	Silicon Oxide	0,000	0,061	SiO <sub>2</sub>
	01-074-1905	53	Calcium Sulfate Hydrate	0,000	0,637	Ca(SO <sub>4</sub> ).2(H <sub>2</sub> O)
	01-086-2334	52	Calcium Carbonate	0,000	0,923	Ca(CO <sub>3</sub> )
	01-089-1668	21	Silicon Oxide	0,000	1,861	SiO <sub>2</sub>

## Cinza Composta (CC)

## Main Graphics, Analyze View:



## Peak List:

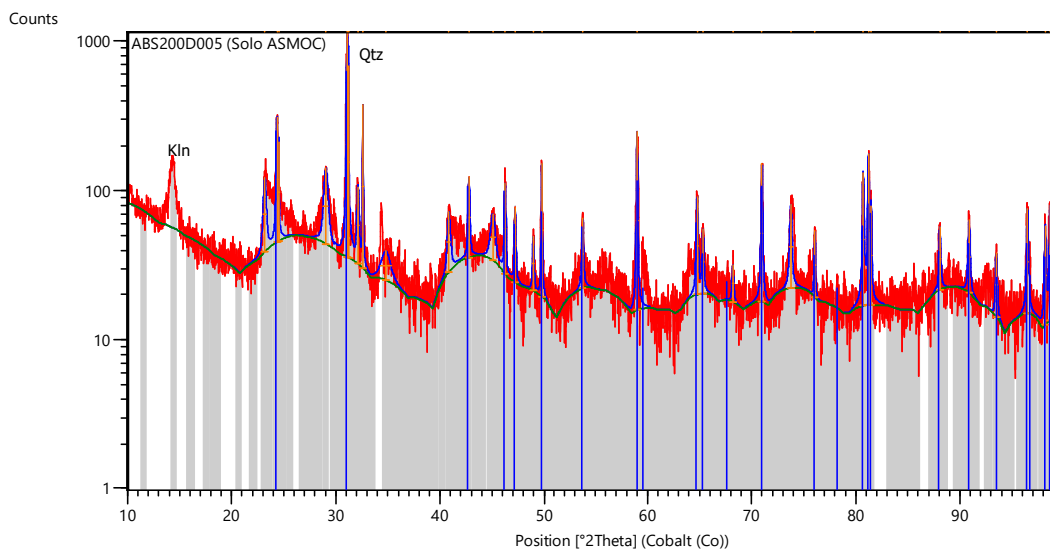
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
13,5866	16,39	0,7488	7,56213	4,77
17,2405	20,65	0,3744	5,96795	6,01
24,3384	86,00	0,1248	4,24339	25,04
31,1201	343,41	0,1404	3,33462	100,00
34,3139	155,17	0,1404	3,03232	45,18
36,3930	21,18	0,3744	2,86446	6,17
38,9135	14,54	0,4992	2,68543	4,23
41,5439	42,87	0,2184	2,52222	12,48
42,1511	34,45	0,1872	2,48751	10,03
46,2176	51,54	0,1872	2,27912	15,01
47,8620	24,62	0,1872	2,20519	7,17
49,8754	12,80	0,7488	2,12153	3,73
50,6940	34,12	0,1872	2,08948	9,94
55,5686	18,79	0,4992	1,91894	5,47
56,9497	34,54	0,1872	1,87616	10,06
58,0555	17,82	0,3744	1,84345	5,19
58,9859	34,06	0,4992	1,81693	9,92
67,8326	9,94	0,7488	1,60311	2,89
70,9266	16,74	0,3744	1,54177	4,87
71,8535	24,88	0,2496	1,52451	7,24
76,8122	9,99	0,3744	1,43989	2,91
80,9691	16,15	0,9984	1,37777	4,70
96,2366	7,48	0,7488	1,20144	2,18

**Pattern List:**

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-086-1560	54	Silicon Oxide	0,000	0,810	SiO <sub>2</sub>
*	01-081-2027	49	Calcium Carbonate	0,000	0,366	Ca(CO <sub>3</sub> )
*	00-036-0432	18	Calcium Sulfate Hydrate	0,000	0,066	CaSO <sub>4</sub> .2(H <sub>2</sub> O)
*	01-083-0437	7	Calcium Sulfate	0,000	0,409	Ca(SO <sub>4</sub> )
*	01-088-0892	13	Aluminum Silicon Oxide	0,000	0,199	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>

## Solo (ASMOC)

## Main Graphics, Analyze View:



## Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
23,1761	82,55	0,3120	4,45307	7,48
24,3527	264,03	0,1560	4,24094	23,93
24,5355	164,66	0,0468	4,20983	14,92
29,0611	97,74	0,4368	3,56524	8,86
31,1016	1103,49	0,1248	3,33655	100,00
31,2000	647,59	0,0468	3,32629	58,69
32,1457	73,55	0,2184	3,23090	6,66
32,6047	342,48	0,0624	3,18662	31,04
34,7987	14,69	0,9984	2,99136	1,33
40,8640	43,54	0,3120	2,56235	3,95
42,7961	87,05	0,1716	2,45174	7,89
45,0789	35,60	0,4992	2,33358	3,23
46,2600	84,09	0,1560	2,27715	7,62
47,2326	52,69	0,1560	2,23286	4,78
48,9628	28,11	0,1560	2,15856	2,55
49,7754	132,41	0,0936	2,12552	12,00
53,7835	43,34	0,1872	1,97765	3,93
59,0083	232,20	0,1248	1,81630	21,04
64,7790	71,46	0,1872	1,66987	6,48
65,3245	34,73	0,1872	1,65746	3,15
68,1983	14,00	0,1872	1,59554	1,27
70,9927	133,53	0,1560	1,54052	12,10
73,7620	58,99	0,2496	1,49046	5,35
76,0752	35,17	0,1248	1,45170	3,19
80,7186	115,09	0,1872	1,38131	10,43
81,2225	157,82	0,1560	1,37421	14,30
81,4777	62,01	0,1248	1,37065	5,62



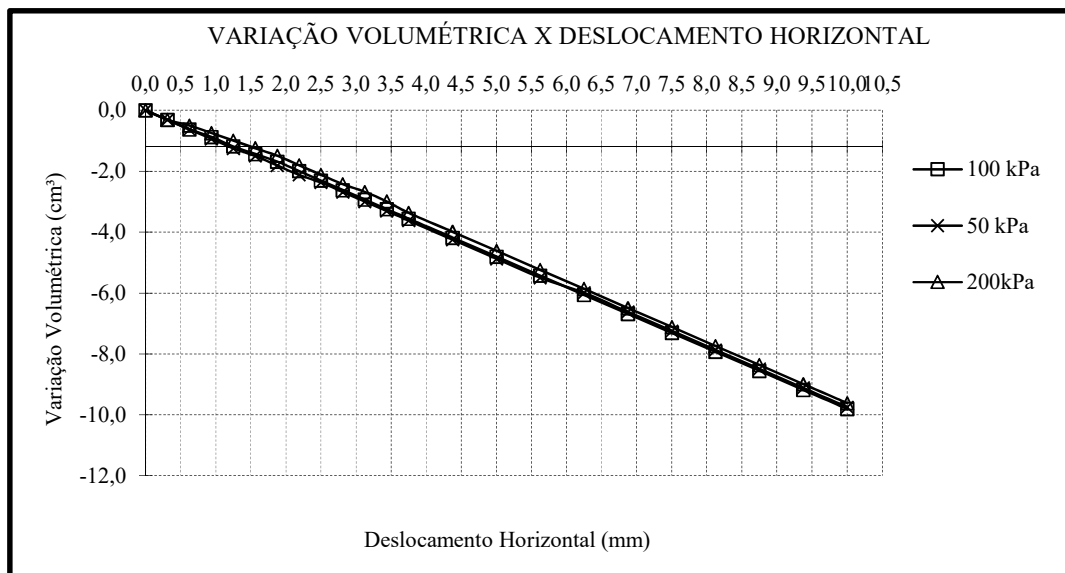
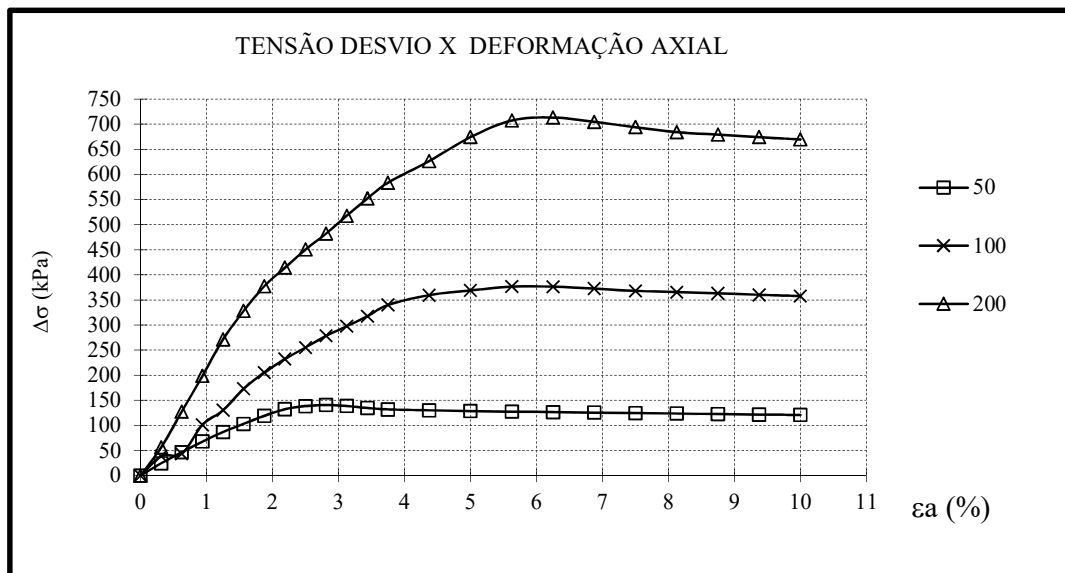
88,0810	35,55	0,1872	1,28675	3,22
90,8864	43,79	0,2184	1,25535	3,97
93,4993	24,08	0,1872	1,22810	2,18
96,4925	60,85	0,1872	1,19905	5,51
98,1931	45,68	0,1872	1,18350	4,14
98,6650	66,09	0,1872	1,17930	5,99

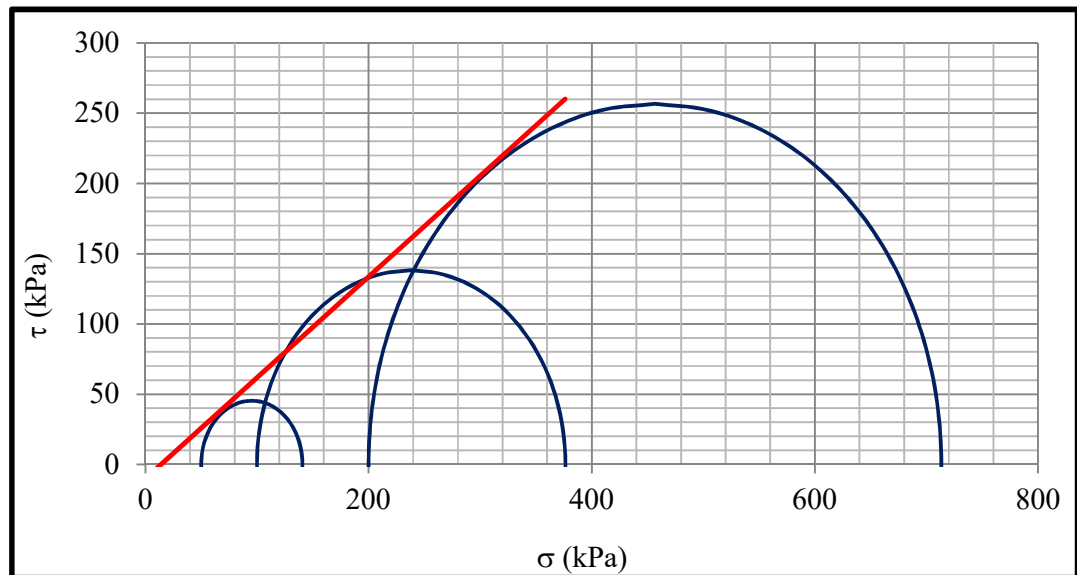
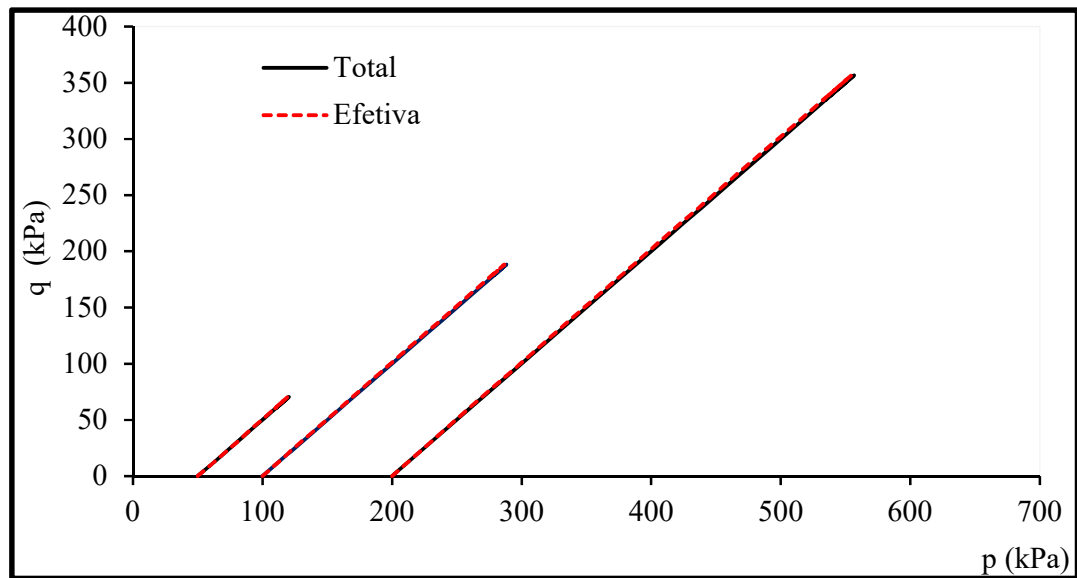
**Pattern List:**

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-005-0490	64	Silicon Oxide	0,000	0,507	SiO <sub>2</sub>
	01-080-0886	18	Aluminum Silicate Hydroxide	0,000	0,104	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> (OH)
	01-089-6429	9	Sodium Aluminum Silicate	0,000	0,126	Na(AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )
	01-089-0833	5	Calcium Magnesium Iron Silicate	0,000	0,051	Ca <sub>1.022</sub> (Mg <sub>0.906</sub> Fe <sub>0.095</sub> )(Si <sub>1.9</sub> Fe <sub>0.099</sub> )O <sub>6</sub>

## APÊNDICE E – TRIAXIAL

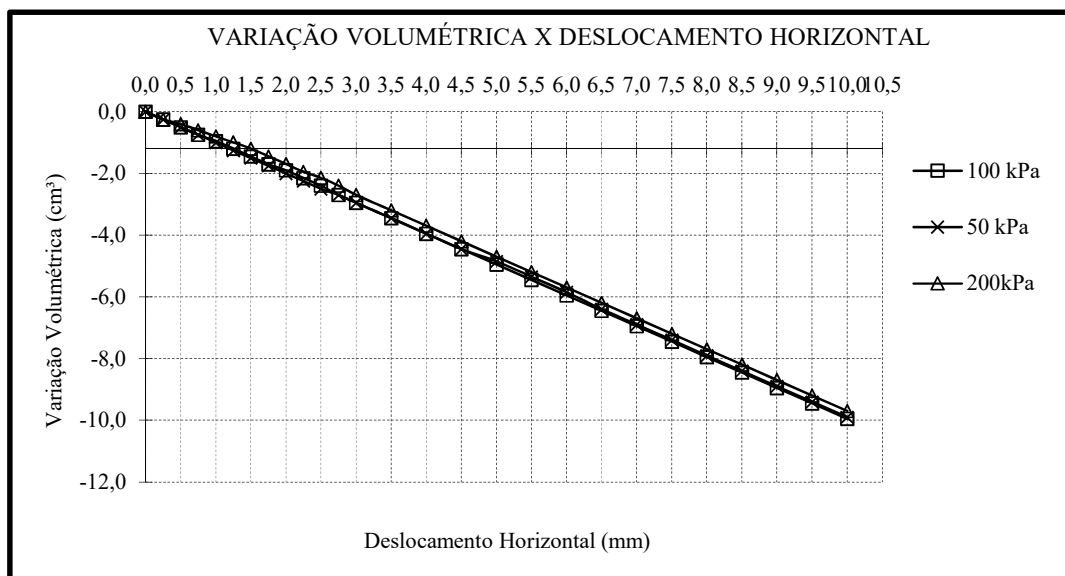
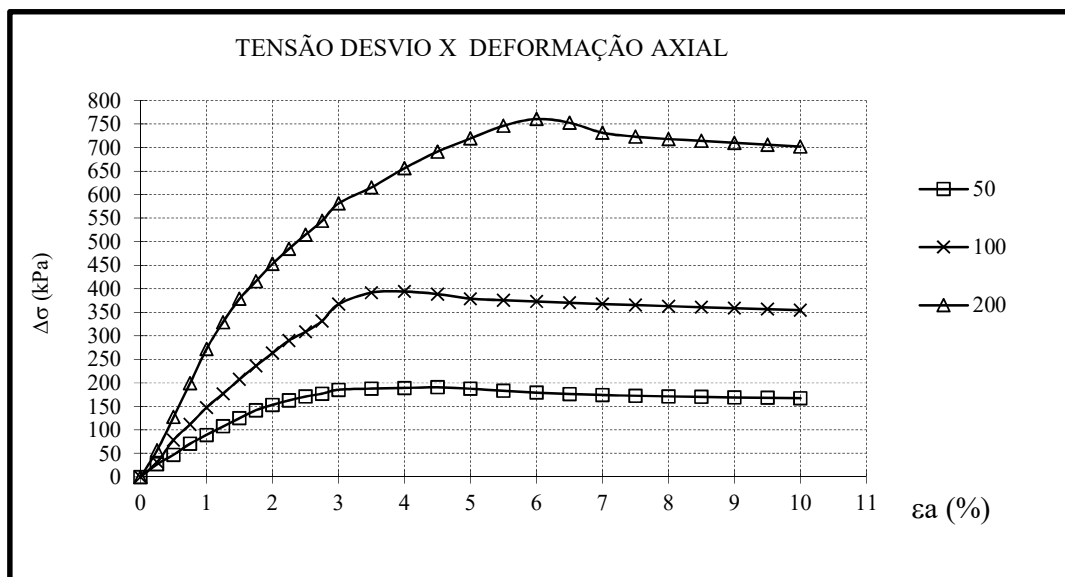
### Cinza Composta – CC (1)

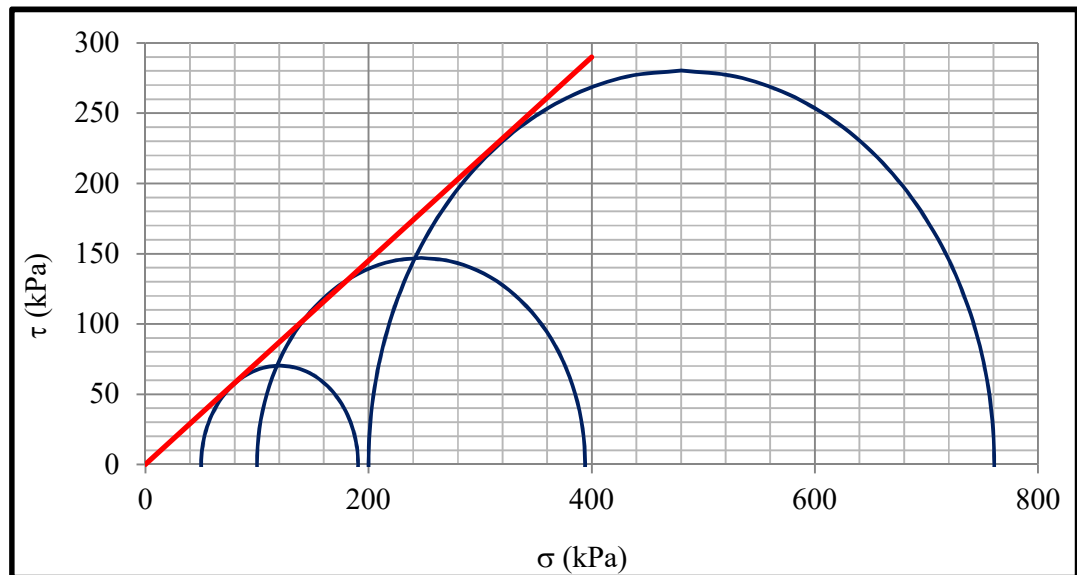
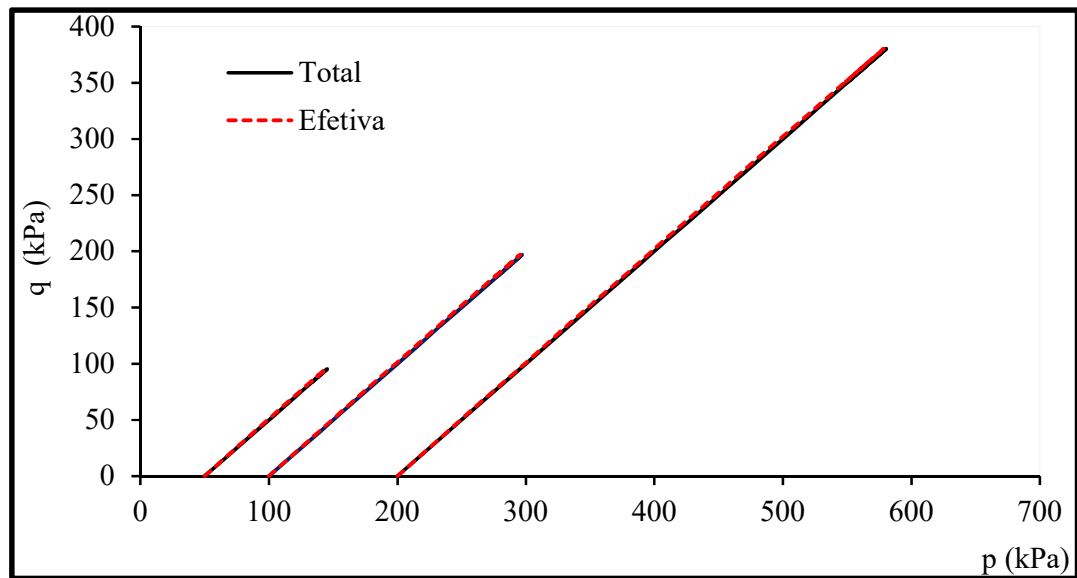




ENSAIOS DE RESISTÊNCIA		
AMOSTRA	<i>Triaxial</i>	
	$\phi$	$c$ (kPa)
CC (1)	35,7	0

## Cinza Composta – CC (2)





ENSAIOS DE RESISTÊNCIA		
AMOSTRA	Triaxial	
	$\phi$	$c$ (kPa)
CC (2)	35,9	0

## ANEXO A – ANÁLISES AMBIENTAIS (LINHA DE PESQUISA 3)

## Parâmetros inorgânicos obtidos a partir da análise do extrato do ensaio de Lixiviação.

Amostra	PARÂMETROS INORGÂNICOS – LIXIVIADO (mg L <sup>-1</sup> )								pH
	Pb <sup>2+</sup>	Ag	F <sup>-</sup>	As	Ba	Cd	Cr	Se	
PA-1	0,06	0,32	3,6	0,250	0,25	0,250	0,25	0,25	6,07
PA-2	0,06	0,32	333,1	0,003	0,02	0,005	0,03	0,06	5,01
PA-3	0,06	0,32	4,7	2,123	2,12	2,123	2,12	2,12	4,92
PA-4	0,15	0,32	0,1	0,003	0,01	0,003	0,03	0,03	6,61
PA-5	0,06	0,32	270,5	0,003	0,03	0,003	0,03	0,06	6,00
PA-6	0,44	0,32	0,1	0,013	0,19	0,003	0,03	0,59	6,20
PA-7	0,20	0,32	322,2	0,003	0,02	0,003	0,03	0,04	7,20
PA-8	0,61	0,32	119,3	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	6,81
PA-9	0,06	0,32	341,0	0,003	0,03	0,003	0,03	0,04	7,58
PA-10	0,06	0,32	2,9	0,010	0,03	0,003	0,01	0,59	5,45
PA-11	0,06	0,32	0,1	0,003	0,15	0,003	0,03	0,42	7,32
PA-12	0,42	0,32	274,4	0,003	0,01	0,009	0,05	0,07	7,13
PA-13	0,06	0,32	14,9	0,003	0,03	0,006	0,07	0,14	4,55
PA-14	0,06	0,32	9,8	0,003	0,03	0,003	0,17	0,58	4,41
PA-15	0,40	0,32	8,8	0,006	0,03	0,008	0,03	0,08	4,86
PA-16	0,06	0,32	11,6	0,003	0,03	0,003	0,03	0,05	4,31
PA-17	0,06	0,32	0,6	0,003	0,01	0,003	0,01	0,07	6,55
PA-18	0,06	0,32	3,5	0,003	0,01	0,003	0,03	0,07	5,55
PA-19	0,49	0,32	0,1	0,023	0,03	0,003	0,02	0,56	6,54
PA-20	0,06	0,32	2,2	0,003	0,02	0,003	0,03	0,05	6,04
PA-21	0,06	0,32	1,5	0,003	0,01	0,003	0,03	0,05	7,29
PP-1 (1)	0,36	0,32	13,2	0,027	0,03	0,003	0,06	0,55	4,92
PP-1 (2)	0,39	0,32	3,0	0,003	0,17	0,023	0,03	0,18	5,40
PP-1 (3)	0,06	0,32	1,7	0,003	0,01	0,003	0,03	0,02	6,30
PP-1 (4)	0,32	0,32	0,1	0,025	0,29	0,020	0,03	0,52	6,03
PP-1 (5)	0,28	0,32	7,6	0,052	0,17	0,028	0,17	0,82	4,45
PP-2 (1)	0,06	0,32	308,9	0,023	0,22	0,003	0,01	0,44	7,69
PP-2 (2)	0,45	0,32	0,1	0,023	0,07	0,043	0,11	0,86	5,89
PP-2 (3)	0,36	0,32	75,1	0,003	0,03	0,003	0,03	0,09	5,46
PP-2 (4)	0,44	0,32	3,2	0,003	0,03	0,003	0,01	0,04	5,49
PP-2 (5)	0,06	0,32	1,7	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	6,08
PP-2 (6)	0,44	0,32	0,1	0,003	0,15	0,062	0,03	0,40	5,36
CL-01	0,06	0,32	2,2	0,003	0,22	0,003	0,03	0,04	8,96
CL-02	0,06	0,32	8,3	0,015	0,03	0,018	0,09	0,19	3,97
Σ PP	0,06	0,32	3,4	0,049	0,24	0,003	0,03	0,29	6,77
Σ PA	0,96	0,32	2,7	0,023	0,23	0,003	0,03	0,37	6,72
Σ PP+PA	0,06	0,32	6,6	0,030	0,14	0,003	0,03	0,14	5,04
Branco	<0,06	<0,32	1,01	<0,003	<0,03	<0,003	0,26	1,40	
VMP	1	5	150	1	70	0,5	-	1	
LQ	0,06	0,32	0,05	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	

**Parâmetros Inorgânicos obtidos a partir da análise do extrato do ensaio de Solubilização.**

Amostra	PARÂMETROS INORGÂNICOS – SOLUBILIZADO (mg L <sup>-1</sup> )																	
	Pb <sup>2+</sup>	Ag	Na	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Se	Zn	pH final
PA-1	0,06	0,32	270,0	0,05	54,5	3,1	1842,4	4,79	0,011	0,03	0,003	0,02	0,003	0,03	0,03	0,54	0,059	8,29
PA-2	0,06	0,32	260,0	1,80	47,0	3,8	1889,4	3,59	0,011	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,79	0,168	8,10
PA-3	0,06	0,32	104,0	0,86	0,2	0,7	1638,8	4,64	0,032	0,03	0,003	0,08	0,003	0,78	0,03	0,85	0,037	7,97
PA-4	0,06	0,32	570,0	4,99	8,5	2,9	2028,8	5,83	0,022	0,03	0,003	0,30	0,003	0,03	0,03	0,34	0,013	8,06
PA-5	0,06	0,32	330,0	1,04	0,2	0,7	1863,3	0,53	0,007	0,03	0,003	0,01	0,003	0,03	0,03	0,58	0,000	8,20
PA-6	0,06	0,32	440,0	1,66	60,7	3,8	149,2	6,03	0,019	0,16	0,003	0,02	0,003	0,03	0,03	0,83	0,159	8,30
PA-7	0,06	0,32	200,0	0,05	0,2	2,6	2218,2	4,26	0,017	0,03	0,003	8,71	0,003	1,99	0,03	0,51	0,092	8,75
PA-8	0,06	0,32	900,0	0,05	109,0	3,6	2563,3	1,86	0,003	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,31	0,558	7,83
PA-9	0,06	0,32	500,0	0,51	0,2	4,4	2591,5	0,69	0,003	0,09	0,003	0,01	0,003	0,03	0,03	0,72	0,026	8,11
PA-10	0,06	0,32	270,0	2,07	94,3	2,0	1132,0	5,90	0,030	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,41	0,040	8,24
PA-11	0,06	0,32	370,0	0,31	0,0	4,9	2290,1	3,63	0,021	0,03	0,003	0,01	0,003	0,72	0,03	0,75	0,040	8,64
PA-12	0,06	0,32	1460,0	0,05	194,2	2,3	2735,4	3,97	0,003	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,83	0,051	8,53
PA-13	0,06	0,32	110,0	0,87	0,2	2,3	1673,0	4,61	0,013	0,03	0,003	0,10	0,003	0,03	0,03	0,97	0,052	7,25
PA-14	0,06	0,32	440,0	3,47	362,0	3,3	1919,5	5,62	0,036	0,03	0,003	0,27	0,003	2,88	0,03	2,49	0,447	7,81
PA-15	0,10	0,32	280,0	4,10	108,2	2,7	1381,9	2,78	0,062	0,03	0,003	5,83	0,003	0,03	0,03	0,90	0,068	7,67
PA-16	0,06	0,32	84,0	1,73	12,2	2,3	1199,6	5,57	0,029	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,28	0,055	7,18
PA-17	0,06	0,32	440,0	4,93	0,9	2,6	1544,4	0,03	0,010	0,06	0,003	0,04	0,003	0,03	0,03	0,44	0,064	7,55
PA-18	0,06	0,32	56,0	0,55	0,2	3,6	26,2	4,10	0,028	0,03	0,003	0,18	0,023	3,03	0,03	0,47	0,473	7,30
PA-19	0,24	0,32	1020,0	0,05	168,8	2,8	2233,8	6,23	0,022	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,74	0,037	8,12
PA-20	0,06	0,32	340,0	0,91	104,9	3,6	1228,2	0,03	0,006	0,05	0,003	0,05	0,006	0,03	0,03	0,46	0,064	7,24
PA-21	0,30	0,32	330,0	0,43	0,2	2,0	1894,8	5,59	0,015	0,03	0,003	0,03	0,003	0,05	0,03	1,42	0,207	8,51
PP-1 (1)	0,06	0,32	350,0	3,53	129,9	2,1	1777,8	2,69	0,033	0,03	0,003	0,01	0,003	0,03	0,25	0,04	0,059	7,70
PP-1 (2)	0,06	0,32	830,0	3,28	168,0	2,8	1930,5	3,66	0,003	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	1,31	0,021	8,03
PP-1 (3)	0,06	0,32	210,0	0,35	0,2	4,7	1357,2	2,37	0,044	0,09	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,22	0,000	8,61
PP-1 (4)	0,06	0,32	1620,0	0,35	537,2	16,6	1779,5	2,28	0,043	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	1,20	0,072	7,86
PP-1 (5)	0,06	0,32	730,0	2,37	119,8	4,0	984,5	2,95	0,077	0,03	0,003	0,02	0,003	0,03	0,03	1,22	0,045	7,87
PP-2 (1)	0,06	0,32	360,0	1,32	38,0	2,0	942,3	0,03	0,020	0,09	0,003	0,03	0,022	0,03	0,03	0,10	0,000	11,43
PP-2 (2)	0,17	0,32	160,0	0,05	52,2	0,3	1509,1	23,65	0,007	0,05	0,037	0,07	0,003	4,76	1,45	0,64	0,383	7,76
PP-2 (3)	0,06	0,32	260,0	4,00	103,2	0,3	1696,3	3,62	0,017	0,03	0,003	0,01	0,003	0,03	0,03	0,74	0,065	8,32
PP-2 (4)	0,06	0,32	270,0	4,26	58,0	0,3	1889,0	0,03	0,008	0,06	0,003	0,03	0,016	0,03	0,03	0,44	0,059	8,31
PP-2 (5)	0,06	0,32	150,0	2,55	42,4	1,4	1715,3	1,96	0,005	0,06	0,003	0,01	0,003	0,03	0,03	0,56	0,026	8,53
PP-2 (6)	0,06	0,32	900,0	5,50	0,2	0,3	2,80	0,015	0,03	0,003	0,03	0,003	0,003	0,05	0,03	1,42	0,076	8,40
CL-01	0,06	0,32	260,0	2,22	279,9	9,0	170,5	2,48	0,028	5,86	0,003	0,30	0,008	2,97	0,03	0,19	0,327	12,28
CL-02	0,06	0,32	540,0	16,86	2168,1	2,2	1900,0	8,55	0,165	0,16	0,003	0,45	0,003	0,03	0,03	7,74	0,151	8,11
Σ PP	0,06	0,03	195,7	5,12	120,0	3,8	1860,2	0,03	0,052	0,04	0,003	0,03	0,018	0,03	0,03	0,38	0,000	7,85
Σ PA	0,06	0,32	250,0	3,77	209,2	1,2	2032,6	0,03	0,046	0,04	0,003	0,01	0,018	0,03	0,01	0,63	0,000	7,71
Σ PP+PA	0,06	0,32	132,0	8,43	60,8	1,6	1576,6	0,03	0,030	0,04	0,003	0,03	0,019	0,03	0,03	0,35	0,000	6,95
Branco	<0,06	<0,32	<0,4	1,01	200	1,56	56,38	2,08	<0,003	<0,03	<0,003	0,26	<0,003	<0,03	<0,03	1,40	0,05	-
VMP	0,01	0,05	200	1,5	250	10	250	0,2	0,01	0,7	0,05	-	2	0,3	0,1	0,01	5	-
LQ	0,06	0,32	0,4	0,05	0,23	0,25	0,27	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,003	0,03	0,03	0,03	0,0003	-

**Metais analisados e encontrados nas amostras de cinzas durante os testes de lixiviação e solubilização.**

Amostra	METAIS (mg L <sup>-1</sup> )											
	LIX. SOL.		LIX. SOL.		LIX. SOL.		LIX. SOL.		LIX. SOL.		LIX. SOL.	
	Pb <sup>2+</sup>		Cr <sup>2+</sup>		Ag		Al		As		B	
PA-1	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,25	4,79	0,25	0,01	0,25	5,87
PA-2	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	1,66	3,59	0,00	0,01	1,93	9,11
PA-3	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	2,12	4,64	2,12	0,03	2,12	3,81
PA-4	0,15	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,23	5,83	0,00	0,02	2,50	7,03
PA-5	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,24	0,53	0,00	0,01	2,78	3,51
PA-6	0,44	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,03	6,03	0,01	0,02	36,50	8,06
PA-7	0,20	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,16	4,26	0,00	0,02	2,30	4,13
PA-8	0,61	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,17	1,86	0,00	0,00	2,74	35,08
PA-9	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,19	0,69	0,00	0,00	2,33	0,65
PA-10	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	1,81	5,90	0,01	0,03	12,64	4,80
PA-11	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,03	3,63	0,00	0,02	294,70	0,85
PA-12	0,42	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	6,64	3,97	0,00	0,00	2,36	3,57
PA-13	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	12,15	4,61	0,00	0,01	3,10	9,38
PA-14	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	6,16	5,62	0,00	0,04	17,58	21,10
PA-15	0,40	0,10	0,04	0,04	0,32	0,32	17,52	2,78	0,01	0,06	2,17	11,18
PA-16	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	135,10	5,57	0,00	0,03	24,83	31,98
PA-17	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,47	0,03	0,00	0,01	2,88	92,32
PA-18	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,18	4,10	0,00	0,03	2,76	8,37
PA-19	0,49	0,24	0,04	0,04	0,32	0,32	4,83	6,23	0,02	0,02	5,76	8,28
PA-20	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,20	0,03	0,00	0,01	2,06	165,50
PA-21	0,06	0,30	0,04	0,04	0,32	0,32	0,22	5,59	0,00	0,01	2,68	6,59
PP-1 (1)	0,36	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	3,20	2,69	0,03	0,03	9,25	5,43
PP-1 (2)	0,39	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,03	3,66	0,00	0,00	41,79	12,28
PP-1 (3)	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,22	2,37	0,00	0,04	2,62	71,36
PP-1 (4)	0,32	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,03	2,28	0,03	0,04	53,56	19,68
PP-1 (5)	0,28	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	102,80	2,95	0,05	0,08	25,68	11,46
PP-2 (1)	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	2,83	0,03	0,02	0,02	11,54	4,99
PP-2 (2)	0,45	0,17	0,04	0,04	0,32	0,32	38,54	23,65	0,02	0,01	22,32	18,55
PP-2 (3)	0,36	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	5,77	3,62	0,00	0,02	1,16	10,95
PP-2 (4)	0,44	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,83	0,03	0,00	0,01	5,43	804,20
PP-2 (5)	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,23	1,96	0,00	0,01	5,81	24,75
PP-2 (6)	0,44	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	1,56	2,80	0,00	0,01	26,85	6,59
CL-01	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,30	2,48	0,00	0,03	1,69	0,96
CL-02	0,06	0,06	0,20	0,04	0,32	0,32	22,45	8,55	0,01	0,16	2,38	20,23
Σ PP	0,06	0,06	0,04	<0,04	0,32	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	368,40	342,10
Σ PA	0,96	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,03	0,03	0,02	0,05	276,40	271,90
Σ PP+PA	0,06	0,06	0,04	<0,04	0,32	0,32	10,23	0,03	0,03	0,03	230,10	241,60
Branco	<0,06	<0,06	<0,04	<0,04	<0,32	<0,32	<0,03	2,08	<0,003	<0,003	<0,03	<0,03
LQ	0,06	0,06	0,04	0,04	0,32	0,32	0,03	0,03	0,003	0,003	0,03	0,03



**Metais analisados e encontrados nas amostras de cinzas durante os testes de lixiviação e solubilização (continuação).**

Amostra	METAIS (mg L-1)											
	LIX.		SOL.		LIX.		SOL.		LIX.		SOL.	
	Ba		Bi		Cd		Co		Cr		Cu	
PA-1	0,25	0,03	0,25	5,37	0,25	0,00	0,25	0,07	0,25	0,02	0,25	0,00
PA-2	0,02	0,03	0,30	5,26	0,01	0,00	0,03	0,06	0,03	0,03	0,03	0,00
PA-3	2,12	0,03	2,12	0,03	2,12	0,00	2,12	0,04	2,12	0,08	2,12	0,00
PA-4	0,01	0,03	0,33	5,22	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,30	0,03	0,00
PA-5	0,03	0,03	0,29	0,02	0,00	0,00	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00
PA-6	0,19	0,16	0,03	5,44	0,00	0,00	0,03	0,06	0,03	0,02	0,03	0,00
PA-7	0,02	0,03	0,26	5,64	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	8,71	0,03	0,00
PA-8	0,03	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,00
PA-9	0,03	0,09	0,28	0,02	0,00	0,00	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00
PA-10	0,03	0,03	5,14	5,20	0,00	0,00	0,06	0,07	0,01	0,03	0,03	0,00
PA-11	0,15	0,03	0,03	5,38	0,00	0,00	0,03	0,05	0,03	0,01	0,05	0,00
PA-12	0,01	0,03	0,31	5,08	0,01	0,00	0,01	0,06	0,05	0,03	0,03	0,00
PA-13	0,03	0,03	0,32	5,31	0,01	0,00	0,01	0,06	0,07	0,10	0,03	0,00
PA-14	0,03	0,03	5,30	5,38	0,00	0,00	0,08	0,03	0,17	0,27	0,03	0,00
PA-15	0,03	0,03	0,33	5,44	0,01	0,00	0,01	0,06	0,03	5,83	0,03	0,00
PA-16	0,03	0,03	0,03	5,18	0,00	0,00	0,03	0,06	0,03	0,03	0,01	0,00
PA-17	0,01	0,06	0,31	0,03	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,04	0,03	0,00
PA-18	0,01	0,03	0,30	5,15	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,18	0,03	0,02
PA-19	0,03	0,03	5,54	5,33	0,00	0,00	0,06	0,07	0,02	0,03	0,03	0,00
PA-20	0,02	0,05	0,33	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,01
PA-21	0,01	0,03	0,30	5,36	0,00	0,00	0,03	0,07	0,03	0,03	0,03	0,00
PP-1 (1)	0,03	0,03	5,29	0,28	0,00	0,00	0,06	0,03	0,06	0,01	0,03	0,00
PP-1 (2)	0,17	0,03	0,03	5,57	0,02	0,00	0,01	0,06	0,03	0,03	0,03	0,00
PP-1 (3)	0,01	0,09	0,29	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
PP-1 (4)	0,29	0,03	0,03	5,36	0,02	0,00	0,03	0,05	0,03	0,03	0,03	0,00
PP-1 (5)	0,17	0,03	0,03	5,56	0,03	0,00	0,03	0,05	0,17	0,02	0,03	0,00
PP-2 (1)	0,22	0,09	5,09	0,03	0,00	0,00	0,05	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02
PP-2 (2)	0,07	0,05	0,03	0,03	0,04	0,04	0,01	0,01	0,11	0,07	0,03	0,00
PP-2 (3)	0,03	0,03	0,53	5,35	0,00	0,00	0,01	0,06	0,03	0,01	0,03	0,00
PP-2 (4)	0,03	0,06	0,28	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,02
PP-2 (5)	0,03	0,06	0,29	0,06	0,00	0,00	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00
PP-2 (6)	0,15	0,03	0,03	5,36	0,06	0,00	0,07	0,07	0,03	0,03	0,01	0,00
CL-01	0,22	5,86	0,31	5,53	0,00	0,00	0,03	0,05	0,03	0,30	0,03	0,01
CL-02	0,03	0,16	0,33	5,32	0,02	0,00	0,01	0,04	0,09	0,45	0,05	0,00
Σ PP	0,24	0,04	0,03	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,03	0,07	0,02
Σ PA	0,23	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,01	0,07	0,02
Σ PP+PA	0,14	0,04	0,03	0,03	0,00	0,00	0,02	0,01	0,03	0,03	0,06	0,02
Branco	<0,03	<0,03	4,99	4,99	<0,003	<0,003	<0,03	<0,03	0,26	0,26	<0,003	<0,003
LQ	0,03	0,03	0,03	0,03	0,003	0,003	0,03	0,03	0,03	0,03	0,003	0,003



**Metais analisados e encontrados nas amostras de cinzas durante os testes de lixiviação e solubilização (finalização).**

Amostra	METAIS (mg L-1)					
	Sr		V		Zn	
	LIX.	SOL.	LIX.	SOL.	LIX.	SOL.
PA-1	0,25	1,59	0,25	0,53	0,25	0,06
PA-2	0,66	1,94	0,05	0,48	0,05	0,17
PA-3	2,12	2,18	2,12	0,62	2,12	0,04
PA-4	0,53	2,34	0,04	0,45	0,05	0,01
PA-5	0,87	1,61	0,04	0,14	0,04	0,00
PA-6	13,43	1,80	0,01	0,48	0,14	0,16
PA-7	0,54	1,63	0,06	0,64	0,03	0,09
PA-8	0,59	12,24	0,06	0,02	0,01	0,56
PA-9	0,59	1,69	0,06	0,05	0,07	0,03
PA-10	5,03	1,05	0,55	0,58	0,05	0,04
PA-11	2,93	1,68	0,16	0,59	0,06	0,04
PA-12	0,73	1,56	0,05	0,56	0,11	0,05
PA-13	0,85	2,72	0,07	0,53	0,09	0,05
PA-14	2,60	2,61	0,45	0,59	0,06	0,45
PA-15	0,65	2,64	0,01	0,53	0,10	0,07
PA-16	0,30	3,73	0,02	0,43	0,03	0,05
PA-17	0,77	0,99	0,06	0,23	0,02	0,06
PA-18	0,59	2,34	0,06	0,48	0,08	0,47
PA-19	0,77	1,57	0,58	0,49	0,05	0,04
PA-20	0,38	0,54	0,05	0,23	0,04	0,06
PA-21	0,66	2,32	0,05	0,70	0,01	0,21
PP-1 (1)	1,92	1,59	0,49	0,05	0,01	0,06
PP-1 (2)	13,32	2,01	0,02	0,58	0,52	0,02
PP-1 (3)	1,00	1,68	0,05	0,09	0,04	0,00
PP-1 (4)	24,98	3,86	0,01	0,50	0,52	0,07
PP-1 (5)	11,07	1,86	0,14	0,62	0,34	0,05
PP-2 (1)	5,47	1,15	0,02	0,07	0,11	0,00
PP-2 (2)	11,97	8,45	0,17	0,08	0,23	0,38
PP-2 (3)	0,15	1,21	0,05	0,47	0,03	0,07
PP-2 (4)	1,59	2,27	0,05	0,13	0,06	0,06
PP-2 (5)	1,56	3,43	0,05	0,06	0,05	0,03
PP-2 (6)	13,96	2,32	0,03	0,70	0,79	0,08
CL-01	0,20	6,14	0,05	0,44	0,00	0,33
CL-02	0,73	6,26	0,08	0,75	0,13	0,15
Σ PP	7,68	2,01	0,03	0,03	0,00	0,00
Σ PA	5,44	1,40	0,03	0,02	0,00	0,00
Σ PP+PA	5,53	1,77	0,03	0,03	0,15	0,00
Branco	<0,03	<0,03	0,38	0,38	0,05	0,05
LQ	0,03	0,03	0,03	0,03	0,0003	0,0003

## ANEXO B – FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (LINHA DE PESQUISA 1)

Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA-01 a PA-10.

Compostos	PA-01 (%massa)	PA-02 (%massa)	PA-03 (%massa)	PA-04 (%massa)	PA-05 (%massa)	PA-06 (%massa)	PA-07 (%massa)	PA-08 (%massa)	PA-09 (%massa)	PA-10 (%massa)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,3600	11,9610	8,6290	9,4531	10,1910	9,2386	6,3167	4,7809	7,1125	6,4910
SiO <sub>2</sub>	23,6340	38,0070	35,9690	32,0780	34,9530	34,2350	23,4440	18,1110	23,4420	26,5470
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1067	0,0000	0,0000	0,2902	0,0000	0,4571	0,0000	0,0000	0,1779	0,2298
SO <sub>3</sub>	10,8450	2,0038	2,5744	2,9805	2,0534	2,1468	5,6507	10,3000	4,4558	4,2482
Cl	0,0000	0,1254	0,2720	0,1085	0,0283	0,0722	0,0627	0,0236	0,0000	0,2158
K <sub>2</sub> O	2,3840	3,8241	4,2013	3,9654	3,5666	3,8537	2,8484	2,2433	2,9526	3,4681
CaO	34,7570	13,3230	19,4450	19,7140	17,6600	21,2590	34,8730	43,4070	35,1420	30,0110
MnO	0,0000	0,0000	0,4258	0,2777	0,0000	0,2668	0,2315	0,2082	0,2340	0,0000
TiO <sub>2</sub>	1,5567	2,5995	0,0000	2,5093	3,1214	3,0360	2,6471	2,1196	2,6912	2,7281
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,6780	27,5660	27,5110	28,0610	27,4070	24,7110	22,6990	18,2780	23,0440	25,5290
ZnO	0,1134	0,0000	0,1827	0,1629	0,0000	0,1331	0,1242	0,1093	0,1009	0,1579
SrO	0,5657	0,5908	0,7898	0,3993	0,7449	0,3620	0,3782	0,3127	0,3998	0,2866
NiO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1592	0,0000	0,1058	0,1060	0,0000	0,0000
Rb <sub>2</sub> O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,1155	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0876
MgO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,6187	0,0000	0,0000	0,0000
Ag <sub>2</sub> O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,2284	0,0000	0,0000	0,2473	0,0000
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Classe*</b>	<b>C</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>C</b>	<b>F</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>pH</b>	<b>8,9</b>	<b>8,7</b>	<b>9,8</b>	<b>8,9</b>	<b>9,4</b>	<b>9,1</b>	<b>9,8</b>	<b>8,9</b>	<b>9,7</b>	<b>10,0</b>

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

\*Classificação segundo ASTM C618 (2015)

**Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA11 a PA21.**

<b>Compostos</b>	<b>PA-11 (%massa)</b>	<b>PA-12 (%massa)</b>	<b>PA-13 (%massa)</b>	<b>PA-14 (%massa)</b>	<b>PA-15 (%massa)</b>	<b>PA-16 (%massa)</b>	<b>PA-17 (%massa)</b>	<b>PA-18 (%massa)</b>	<b>PA-19 (%massa)</b>	<b>PA-20 (%massa)</b>	<b>PA-21 (%massa)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,5306	5,6835	9,1662	10,249	9,6497	13,224	8,2341	8,8446	7,5845	10,155	6,2007
SiO <sub>2</sub>	21,7180	21,604	35,526	39,851	36,916	39,872	25,876	29,224	25,747	35,235	24,013
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	0,4475	0,5099	0,4183	-	-	0,4273	0,2254	0,3146	
SO <sub>3</sub>	6,2383	9,0754	1,8717	0,8342	1,5973	1,8758	5,3149	3,5959	5,397	3,7174	6,8829
Cl	0,1105	0,0794	-	0,318	0,0529	-	0,0979	0,0689	0,1294		
K <sub>2</sub> O	2,6199	2,4515	4,0946	4,4022	4,429	5,0592	3,2565	2,9783	3,1072	3,5671	2,741
CaO	39,4140	37,743	14,215	10,221	18,123	13,255	31,917	26,609	32,754	17,649	33,897
MnO	0,1821	0,3053	0,208	0,2542	0,1957	0,2626	0,21		0,1336	0,1859	
TiO <sub>2</sub>	2,6209	1,9367	3,1414	3,7382	2,7342	3,0691	3,0007	2,7626	2,625	2,8202	2,449
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,3350	20,273	29,245	28,578	25,187	19,749	20,863	24,909	21,338	25,197	23,189
ZnO	0,0870	-	0,1538	0,1691	0,1096	0,1201	-	0,1483	0,0915	0,1202	
SrO	0,2447	0,6034	0,6205	0,5634	0,4708	0,2424	0,2005	0,4317	0,3378	0,3377	0,6279
NiO	-	0,1393	-	-	0,1173	0,0889	-				
Rb <sub>2</sub> O	0,0800	-	-	-	-	0,0578	0,0628				
MgO	-	-	-	-	-	0,7807	-		0,5295	0,7006	
Ag <sub>2</sub> O	0,4400	-	-	-	-	0,197	0,1921				
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0435	-	-	-	-	-	-				
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	0,1206	-	-	-				
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,4017	-	-	-	-	0,0536	0,0507				
MoO <sub>3</sub>	0,0791	-	-	-	-	1,5162	0,0644				
CuO	-	-	-	0,1035	-	-	-				
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,1028	-	0,0874	-	-	-				
BaO	-	-	1,311	-	-	-	-				
Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	0,2978				

**Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em superfície PA11 a PA21.(continuação)**

ZrO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	0,0924	0,076				
ThO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	0,0843				
PuO <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	0,1117	0,0916				
Tc	0,0718	-	-	-	-	-	-				
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-	-	-	-	-	-	0,1106				
CdO	0,3731	-	-	-	-	0,3727	-				
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4090	-	-	-	-	-	-				
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Classe*</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>F</b>	<b>C</b>
<b>pH</b>	<b>9,5</b>	<b>10,3</b>	<b>8,9</b>	<b>8,4</b>	<b>8,4</b>	<b>9,0</b>	<b>10,2</b>	<b>8,7</b>	<b>9,5</b>	<b>9,9</b>	<b>9,5</b>

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

\*Classificação segundo ASTM C618 (2015).

**Caracterização das cinzas coletadas na Usina Termelétrica Energia Pecém, para os pontos em diversas profundidades (PP1 e PP2).**

Compostos	PP1 (= PA20) (%massa)	PP1 (1-1,25m) (%massa)	PP1 (2-2,25m) (%massa)	PP1 (3-3,25m) (%massa)	PP1 (4-4,25m) (%massa)	PP1 (5-5,25m) (%massa)	PP2 (=PA21) (%massa)	PP2 (1-1,25m) (%massa)	PP2 (2-2,25m) (%massa)	PP2 (3-3,25m) (%massa)	PP2 (4-4,25m) (%massa)	PP2 (5-5,25m) (%massa)	PP2 (6-6,25m) (%massa)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,155	10,1770	8,0916	6,7617	9,303	9,4163	6,2007	5,2027	9,9028	11,385	9,4864	9,5333	8,6044
SiO <sub>2</sub>	35,235	34,0760	30,2300	23,4610	30,47	37,0070	24,013	20,376	29,4730	33,326	32,8630	30,5300	29,9350
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,3146	0,2994	0,1893	-	0,3829	0,3798	-	-	-	-	0,8425	0,4612	0,2634
SO <sub>3</sub>	3,7174	2,7449	4,0658	6,0041	2,1017	1,1592	6,8829	7,3639	3,7067	3,3714	3,3411	4,1900	2,6044
Cl	-	0,2059	0,1826	0,1571	0,3618	0,1858		0,0804	0,0807	0,078	0,0814	0,2063	0,2218
K <sub>2</sub> O	3,5671	4,0993	3,3317	2,9862	3,3499	4,2823	2,741	2,557	3,0816	3,2404	2,8482	3,1663	3,1914
CaO	17,649	15,0540	23,4770	28,7140	21,882	9,8134	33,897	37,914	27,8250	20,604	27,4950	27,2330	24,083
MnO	0,1859	0,2183	0,2937	0,2798	0,2251	0,2434		0,2141	0,1426	0,2465		0,2340	0,2132
TiO <sub>2</sub>	2,8202	3,3120	3,2053	2,9848	2,8547	2,6412	2,449	2,4461	3,2275	2,337	2,7036	2,8205	2,8324
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,197	29,1200	25,9600	27,6930	26,954	32,9730	23,189	22,702	21,3420	24,327	18,4640	20,4440	27,195
ZnO	0,1202	0,1333	0,1406	-	0,131	0,1661			0,1098	0,1067		0,1246	0,1558
SrO	0,3377	0,5601	0,4568	0,9578	0,7129	0,7716	0,6279	0,5889	0,6350	0,8674	0,5091	1,0569	0,6214
CdO	-	-	0,3761	-	0,3675	0,4193	-	-	-	-	-	-	-
Rb <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	0,1019	-	-	-	-	-	-	0,0788
MgO	0,7006	-	-	-	0,5614	-	-	0,5546	0,4731	-	0,8062	-	-
Ag <sub>2</sub> O	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1991	-	-
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	-	0,3424	0,3261	-	-	-	-	0,3604	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1099		-	-
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	0,1137	-	-	-	-		-	-
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Classe*</b>	<b>F</b>	<b>F</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>F</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>	<b>C</b>
<b>pH</b>	<b>9,9</b>	<b>8,4</b>	<b>9,6</b>	<b>10,1</b>	<b>8,9</b>	<b>8,8</b>	<b>9,5</b>	<b>11,4</b>	<b>9,6</b>	<b>9,1</b>	<b>8,9</b>	<b>8,9</b>	<b>9,4</b>

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.

\*Classificação segundo ASTM C618 (2015).

**Caracterização das cinzas volantes  
“frescas” das Usinas Pecém I e II.**

<b>Compostos</b>	<b>Pecém 1 (%massa)</b>	<b>Pecém 2 (%massa)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,1527	10,3690
SiO <sub>2</sub>	15,7040	39,5840
SO <sub>3</sub>	14,3560	0,6113
Cl	0,0738	-
K <sub>2</sub> O	1,9084	3,7032
CaO	43,4910	7,2629
MnO	0,1797	0,1915
TiO <sub>2</sub>	1,9718	2,9414
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,5970	31,0930
ZnO	0,0936	0,1283
CuO	-	0,1548
Rb <sub>2</sub> O	0,0593	0,0829
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,0730
MoO <sub>3</sub>	-	0,1497
Tc	-	0,0253
Ag <sub>2</sub> O	-	0,5142
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,5803
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	0,1006
TeO <sub>2</sub>	-	0,8592
I	-	0,8838
PuO <sub>2</sub>	-	0,1365
SrO	0,4122	0,5545
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Classe*</b>	<b>C</b>	<b>F</b>
<b>pH</b>	<b>12,2</b>	<b>9,7</b>

Fonte: Resultados do ensaio de fluorescência de raios X fornecidos pelo laboratório de Raios-X da UFC.