



Wallyson Santos Martins

**CIMENTO PORTLAND COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
CINZAS DO RESÍDUO DA ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Marcelo de Souza Picanço

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Wallyson Santos Martins

Cimento Portland com substituição parcial de cinzas do resíduo da estação de tratamento de água.

Dissertação de Mestrado

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Marcelo de Souza Picanço

Belém

Agosto de 2020

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wallyson Santos Martins.

TÍTULO: Cimento Portland com substituição parcial de cinzas do resíduo de estação de tratamento de água.

GRAU: Mestre ANO: 2020

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Wallyson Santos Martins.

wallyson.martins@ifma.edu.br

Passagem Getúlio Vargas, Bloco 12, nº 207. Souza.

66.608-013 Belém – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237c Santos Martins, Wallyson

Cimento Portland com substituição parcial de cinzas do resíduo de estação de tratamento de água / Wallyson Santos Martins — 2020.

103 f.: il. color.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Picanço

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço Picanço

1. Cinzas do lodo da ETA Bolonha. 2. Caracterização. 3. Substituição. 4. Propriedades mecânicas. 5. Argamassa. I. Título

CDD 620

CIMENTO PORTLAND COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CINZAS DO RESÍDUO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

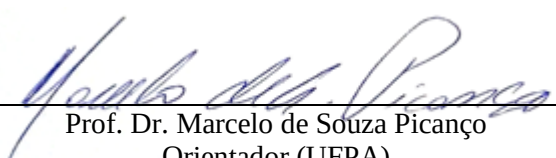
AUTOR:

WALLYSON SANTOS MARTINS

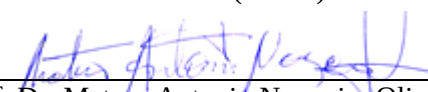
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO
REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 28/08/2020.

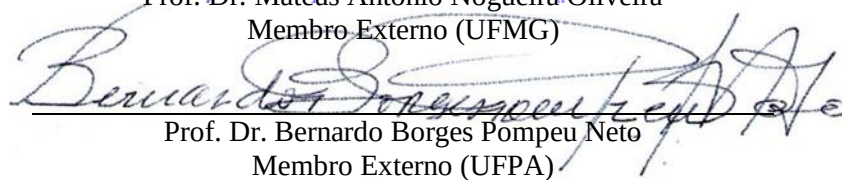
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)



Prof. Dr. Mateus Antonio Nogueira Oliveira
Membro Externo (UFMG)



Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto
Membro Externo (UFPA)



Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Visto:



Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*“Aprender é uma coisa que a mente nunca se cansa,
nunca tem medo, nunca se arrepende”*

(Leonardo da Vinci)

Agradecimentos

Agradeço imensamente à Deus, por ter me concedido saúde, força e disposição para superar todos os momentos difíceis ao longo do mestrado.

A todos os professores, técnicos e funcionários do PPGEC da UFPA, que me instruíram fornecendo conhecimentos que nortearam este trabalho. Ao meu orientador, professor Marcelo, pela atenção e confiança depositada.

Aos alunos do meu grupo de pesquisa, Isabella, João Victo, Valéria, Kassim, por toda dedicação e empenho neste trabalho. Agradeço também a meus colegas de mestrado, em especial ao Maurílio Pimentel, Victão Brasil, Nathalia Fontes e Sabino que muito me ajudaram nos momentos que mais precisei. Aos amigos da faculdade e de vida, que estiveram sempre presentes e me incentivando.

A minha família, especialmente meus pais Anatólio Martins e Lúcia de Fátima, que fizeram de tudo para tornar os momentos difíceis mais brandos. Obrigado meus irmãos, John Lennon e Luciano Martins pelo incentivo. Deixo aqui um agradecimento especial também aos meus avós maternos Elias Viana e Maria da Paz e paternos Antônio Gordo e Aneri Pires, que sempre foram os meus maiores exemplo de luta e determinação nessa vida. Agradeço a minha noiva, Ana Beatriz que jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Obrigado por ser tão atenciosa e por entender minha ausência em diferentes momentos.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O MEU MUITO OBRIGADO!!!

Resumo

MARTINS W. S. Cimento Portland com substituição parcial de cinzas do resíduo da estação de tratamento de água. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2020.

Durante décadas, o resíduo (lodo) produzido nas estações de tratamento de água (ETA) é dissolvido em água e depois descartado em cursos de água provocando graves consequências ambientais. A legislação existente no Brasil proíbe a descarga de lodo de ETA nos cursos de água, mas a prática persiste. Diante disso, este estudo investigou a possibilidade de usar a cinza lodo de ETA como substituição parcial ao cimento Portland. Para tal, foi realizado um estudo de atividade pozolânica através de análise termogravimétrica em pasta e índice de atividade pozolânica (IAP) em argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas do lodo da ETA Bolonha calcinado nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C por 2h. As cinzas apresentaram bons resultados de índice de atividade pozolânica, com destaque para a cinza ativada a 800°C que apresentou o maior índice com 97,79%, no entanto esse valor é apenas 3,04% superior ao índice de atividade pozolânico obtido pela de calcinação de 600°C (94,10%), e por economia de energia foi escolhida as cinzas calcinadas a 600°C em substituição ao cimento Portland para investigar o desempenho de argamassas em proporções de 0%, 6%, 10% e 14%. Os melhores resultados foram obtidos pelas amostras com 14% de substituição, com um acréscimo de aproximadamente 13,5% na resistência a compressão, e 12,0% na resistência a tração na flexão em relação a argamassa de referência. Além disso as amostras com 14% de substituição do cimento Portland por cinzas apresentaram 2,66% menor índice de vazios e absorveram 1,26% menos água do que a argamassa convencional. No entanto as amostras com substituição de cimento Portland em 6% e 10% não apresentaram diferenças de comportamento significativas em relação as amostras de referência nos ensaios supracitados. Portanto, conclui-se que as cinzas do lodo de ETA possuem potencial pozolânico e substituição parcial no cimento Portland apresentou benefícios as amostras estudadas, o que torna o seu reaproveitamento viável do ponto de vista técnico e ambiental.

Palavras-Chave:

Cinzas do Lodo de ETA, Caracterização, Substituição, Propriedades mecânicas, Argamassas.

Abstract

MARTINS W. S. **Portland cement with partial replacement of waste ash from the water treatment plant.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2020.

For decades, the waste (sludge) produced in water treatment plants (ETA) is dissolved in water and then discarded in water courses causing serious environmental consequences. Existing legislation in Brazil prohibits the discharge of ETA sludge into water courses, but the practice persists. Therefore, this study investigated the possibility of using sludge ash from ETA as a partial replacement for Portland cement. To this end, a study of pozzolanic activity was carried out through thermogravimetric analysis in paste and pozzolanic activity index (IAP) in mortars with partial replacement of Portland cement by sludge ash from Bologna ETA calcined at temperatures of 600 ° C, 700 ° C and 800 ° C for 2h. The ashes showed good results in the pozzolanic activity index, with emphasis on the ash activated at 800 ° C, which presented the highest index with 97.79%, however this value is only 3.04% higher than the pozzolanic activity index obtained by calcination of 600 ° C (94.10%), and for energy savings, ash calcined at 600 ° C was chosen to replace Portland cement to investigate the performance of mortars in proportions of 0%, 6%, 10% and 14%. The best results were obtained by samples with 14% replacement, with an increase of approximately 13.5% in compressive strength, and 12.0% in tensile strength in flexion compared to the reference mortar. In addition, samples with 14% replacement of Portland cement by ash showed 2.66% less voids and absorbed 1.26% less water than conventional mortar. However, samples with substitution of Portland cement in 6% and 10% did not show significant behavior differences in relation to the reference samples in the aforementioned tests. Therefore, it is concluded that the ETA sludge ashes have pozzolanic potential and partial replacement in Portland cement showed benefits to the studied samples, which makes its reuse viable from a technical and environmental point of view.

Keywords:

WTP Sludge Ashes, Characterization, Replacement, Mechanical Properties, Mortars.

Sumário

Capítulo	Página
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 OBJETIVOS.....	20
1.3.1 Objetivo Geral.....	20
1.3.2 Objetivos Específico.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	21
2.1.1 Localização e Quantificação do LETA.....	21
2.1.2 Impactos Ambientais causados pela disposição irregular do Lodo de ETA	25
2.1.3 Características físico-químicas e mineralógicas do LETA	28
2.1.4 Comportamento térmico do lodo de ETA.....	32
2.1.5 Reaproveitamento do LETA em material de construção	37
2.1.5.1 Fabricação de tijolos e materiais cerâmicos	38
2.1.5.2 Agregado leves	39
2.1.5.3 Substituição a areia	40
2.1.5.4 Geopolímero	40
2.1.5.5 Substituição parcial do cimento Portland por cinzas do lodo de ETA	41
2.2 CIMENTO PORTLAND.....	46
2.2.1 Características Químicas do Cimento Portland.....	47
2.2.2 Hidratação do Cimento Portland.....	49
2.2.3 Tipos de Cimento Portland.....	52
2.3 ADIÇÕES MINERAIS.....	53
2.3.1 Adição Pozolânica.....	55
2.3.2 Filler	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	59
3.2 ETAPA 1: PRODUÇÃO DAS CINZAS DE LETA	60

3.2.1 Coleta, secagem e moagem do LETA bruto	60
3.2.2 Análise Térmica	64
3.2.3 Calcinação do lodo da ETA	66
3.3 ETAPA 3: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	66
3.3.1 Cimento.....	66
3.3.2 Agregado Miúdo	67
3.3.3 Aditivo.....	68
3.3.4 Água.....	68
3.3.5 Cinzas de LETA.....	68
3.3.5.1 Caracterização Física	68
3.3.5.2 Caracterização Química.....	69
3.3.5.3 Caracterização Mineralógica	69
3.3.5.4 Avaliação da Atividade Pozolânica	70
3.3.5.4.1 Análise Termogravimétrica em pastas de cimento Portland/CLETAs.....	73
3.3.5.4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.....	71
3.4 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CLETA	72
3.4.1 Desenvolvimento das argamassas.....	74
3.4.2 Propriedade das argamassas no estado endurecido.....	74
3.4.2.1 Resistência a Compressão.....	74
3.4.2.2 Resistência a Tração na Flexão.....	74
3.4.2.3 Absorção de Água e Índice de Vazios	74
3.4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura das Argamassas	75
4 RESULTADOS	76
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DO LODO DA ETA.....	76
4.1.1 Caracterização Física	76
4.1.2 Caracterização Química	77
4.1.3 Caracterização Mineralógica.....	78
4.1.4 Avaliação da Atividade Pozolânica	78
4.1.4.1 Análise Termogravimétrica em pastas de cimento Portland/CLETAs.....	80
4.1.4.2 Índice de Atividade Pozolânica com Cimento Portland.....	83
4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CLETA	85

4.2.1 Resistência a Compressão.....	85
4.2.2 Resistência a Tração na Flexão.....	87
4.2.3 Absorção de Água e Índice de Vazios	88
3.4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura das Argamassas	90
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
5.1 CONCLUSÕES	94
5.2 SUGESTÕES	95
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1– Esquema de Estação de Tratamento de Água Convencional. Adaptado de (ABE, 2014)	22
Figura 2.2 – Lago Bolonha, Água Preta e região. Autor	23
Figura 2.3- Descarte do resíduo da ETA Bolonha: (a) válvula de descarga do decantador e (b) canal de descarga do lodo.	25
Figura 2.4 – Micrografias MEV do LETA na ampliação (a) 1000x (b) 2000x. (Ahmad et. al.,2018)	30
Figura 2.5 – Imagens de MEV de LETA ampliado até 10.000x. (HAIDER,2014).	31
Figura 2.6 – Difração de raio X do lodo de ETA da Malásia. Adaptado de (HAIDER et al., 2014).	31
Figura 2.7 – Análise termogravimétrica (ATG e DTG) do lodo de ETA. (SILVA; FUGARO, 2011).	33
Figura 2.8 – DRX do lodo de ETA in natura e em cinzas (k - Caulinita, Q - Quartzo, H – Hematita). (HAGEMANN et al., 2019)	34
Figura 2.9 – Aspecto Físico do LETA: a) LETA seco em forno a 110 °C; b) LETA moído; (c) CLETA ativado termicamente a 800 ° C e (d) CLETA ativada termicamente moída. (HAIDER, 2014)	35
Figura 2.10 – Micrografia MEV de a) lodo de alumínio bruto e calcinado em temperaturas de b) 600 °C, c) 800°C d) 900° C. (TATAWY et al, 2015)	36
Figura 2.11 – Evolução da atividade pozolânica vs tempo de hidratação: Lodo de ETA ativado (LA), lodo de papel ativado (LPA), resíduos de mineração de carvão (RMC) e cinzas volantes (CV). (Frias et al, 2014)	37
Figura 2.12– Aspecto das amostras (a) cruas e (b) queimadas de 800 a 1000 °C. Adaptado de (BENLALLA et. al.,2015)	39
Figura 2.13 – Vazios permeáveis e absorção de água presente em argamassas com percentual variável de CLETA. (AHMAD et al., 2018)	42
Figura 2.14 – Evolução da resistência a compressão até 60 dias de cura. (FRIAS et. al., 2014)	43
Figura 2.15 – Imagem esquemática da microestrutura da superfície de um clínquer polida. Pode-se observar cristais poliédricos alongados de C_3S (1) e cristais arredondados	

de C_2S (2) envolvidos por uma matriz de C_3A e de C_4AF . Adaptado de (GOMES et. al.2013).	49
Figura 2.16 – Microestrutura do cimento hidratado (a) aspecto dos cristais de etringita e monossulfato hidratado; (b) Cristais de C-H; (c) Formação do C-S-H. Adaptado de (METHA; MONTEIRO 2006).	51
Figura 3.1– Fluxograma do planejamento da pesquisa.	60
Figura 3.2 – Fluxograma da caracterização das cinzas de LETA.	60
Figura 3.3 – Vista panorâmica dos decantadores da ETA Bolonha. (GOOGLE EATH, 2019)	61
Figura 3.4 – Processo de coleta do lodo (a) ponto içamento do lodo; (b) UDL com lodo úmido; (c) raspagem do material e transporte até o ponto de içamento.	61
Figura 3.5 – LETA Bolonha exposto ao sol.	62
Figura 3.6 – (a) Lodo da ETA bruto; (b) Lodo da ETA após a secagem á 105 °C em estufa.	62
Figura 3.7– Processo de moagem do resíduo.	64
Figura 3.8– Análise térmica (TGA/DTG/DTA) do lodo da ETA Bolonha.	65
Figura 3.9 – Aspecto Físico do LETA Bolonha in natura e ativado termicamente a 600 (CLETA600), 700 (CLETA700) e 800 °C (CLETA800).	66
Figura 3.10 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites das zonas ótima e utilizável, segundo a NBR NM 7211 (ABNT, 2009).	68
Figura 4.1– Curvas granulométricas do Cimento CP-I e das Cinzas do lodo da ETA Bolonha calcinadas a 600, 700 e 800 °C.	76
Figura 4.2 – Difrátogramas do LETA in natura e das CLETAS ativadas termicamente a 600, 700 e 800 °C.	78
Figura 4.3 – TG/DTG da pasta de referência	80
Figura 4.4 – TG/DTG da pasta com CLETA600	80
Figura 4.5 – TG/DTG da pasta com CLETA700	81
Figura 4.6 – TG/DTG da pasta com CLETA800	81
Figura 4.7 – Teor de hidróxido de cálcio presente nas amostras, aos 28 dias, determinadas a partir do ensaio de termogravimetria	82
Figura 4.8 – (a) Resistência a compressão; (b)Índice de desempenho com o cimento Portland	83

Figura 4.9 – Resistência à compressão simples nas idades de 28 e 63 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey	85
Figura 4.10 – Resistência à Tração na Flexão na idade de 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)	87
Figura 4.11 – (a) absorção de água (b) índice de vazios. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)	89
Figura 4.12 – (MEV de fragmentos da amostra (a) AREF, (b) A6CL (c) A10C e (d) A14CL	91
Figura 4.13 – Microestrutura da Argamassa AREF	92

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1– Descrição dos processos de um sistema de tratamento convencional de água. Adaptado de (STEIN, 2016)	23
Tabela 2.2 – Produtos químicos utilizados na ETA Bolonha. (MATTOS; TEXEIRA, 2013, adaptado por SILVA, 2016)	25
Tabela 2.3 – Composição química do lodo de diferentes ETAs caracterizados em estudos anteriores.	29
Tabela 2.4 – Composição físico-química do lodo de ETA. Adaptado de (AHMAD et al., 2016)	30
Tabela 2.5 – Estudos desenvolvidos com LETA in natura e calcinado.	38
Tabela 2.6 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 7 dias de cura úmida. (AMARAL, 2015, adaptado por STEIN, 2016)	44
Tabela 2.7 – Resistência a compressão de concreto com cinzas de lodo de ETA, cinzas de casca de arroz (CCA), e sílica ativa (SA). (GASTALDINI et al, 2015)	45
Tabela 2.8 – Composição da matéria-prima do cimento Portland (GOMES et al., 2013)	47
Tabela 2.9 – Composto do cimento Portland. (NEVILLE; BOOKS, 2013)	48
Tabela 2.10 – Tipos de cimento Portland e composições. (BATTAGIN, 2011)	52
Tabela 2.11 – Classificação dos materiais Pozolânicos. (ABNT NBR 12653, 2015)	55
Tabela 2.12– Exigências Químicas. (ABNT NBR 12653, 2015)	56
Tabela 2.13– Exigências Físicas. (ABNT NBR 12653, 2015)	56
Tabela 3.1– Identificação das cinzas geradas no processo de calcinação. Autor	65
Tabela 3.2 – Massa específicas dos cimentos utilizados na pesquisa.	67
Tabela 3.3 – Caracterização do agregado miúdo.	67
Tabela 3.4 Consumo de materiais das argamassas para avaliação da atividade pozolanicidade das CLETA.	71
Tabela 3.5 – Quantidade de corpos de prova do Programa experimental.	73
Tabela 3.6 – Consumo de Materiais em Kg/m ³ para todas as argamassas	73
Tabela 4.1– Massa específica do LETA in natura e das CLETAs ativadas termicamente.	76

Tabela 4.2– Determinação do diâmetro médio (d50) do Cimento CP-I e das CLETAs após 6h de moagem.	77
Tabela 4.3 – Composição química dos principais óxidos presente no Lodo in natura e ativado termicamente	78
Tabela 4.4 – Perda de massa das pastas por faixa de temperatura	82
Tabela 4.5 – Resistência das argamassas para o ensaio de IAP com cimento Portland	83
Tabela 4.6 – Resultado dos elementos majoritários encontrado na análise de EDS da amostra AREF	92
Tabela 4.7 – Resultado dos elementos majoritários encontrado na análise de EDS da amostra A6L	93

Lista de Abreviaturas e Siglas

Símbolo	Significado
<i>ABCP</i>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>Al₂O₃</i>	Óxido de Alumínio – Alumina
<i>C₂S</i>	Silicato Dicálcico
<i>C₃A</i>	Aluminato Tricálcico
<i>C₃S</i>	Silicato Tricálcico
<i>C₄AF</i>	Ferro Aluminato Tetracálcico
<i>CaO</i>	Óxido de Cálcio
<i>CCA</i>	Cinza da Casca de Arroz
<i>CLETA</i>	Cinzas do Lodo da Estação de Tratamento de Água
<i>CO₂</i>	Gás Carbônico
<i>COSANPA</i>	Companhia de Saneamento do Pará
<i>CH</i>	Hidróxido de Cálcio
<i>C-S-H</i>	Silicato de Cálcio Hidratado
<i>CV</i>	Cinza Volante
<i>DRX</i>	Difração de Raio X
<i>ETA</i>	Estação de Tratamento de Água
<i>ETE</i>	Estação de Tratamento de Esgoto
<i>FRX</i>	Fluorescência de Raio X
<i>Fe₂O₃</i>	Óxido de Ferro
<i>IAP</i>	Índice de Atividade Pozolânica
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>LETA</i>	Lodo da Estação de Tratamento de Água
<i>LA</i>	Lodo Ativado
<i>LPA</i>	Lodo de Papel Ativado
<i>LEC</i>	Laboratório de Engenharia Civil
<i>LEMAC</i>	Laboratório Experimental de Materiais de Construção

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Com o crescimento populacional e a tendência de urbanização há o aumento da demanda por água potável, o que requer cada vez mais a exploração de fontes de água bruta. A fim de atender à crescente demanda, uma maior quantidade de água bruta tem sido captada para os devidos processos de tratamento, sendo que nos sistemas convencionais há geração de resíduos, o chamado lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), cuja destinação final, na maioria das vezes, é a devolução direta ao curso d'água, sem tratamento algum, causando consequências ambientais negativas (RODRIGUES, 2015).

Segundo Ahmad *et al.* (2016), uma Estação de Tratamento de Água (ETA) típica produz aproximadamente 100.000 toneladas LETA por ano. Nos estudos de Jamshid *et al.* (2011), descobriu que a produção de lodo per capita varia na faixa de 50 a 85 g de sólidos secos por dia. Considerando uma projeção de 9 bilhões de pessoas vivendo na terra até o ano de 2050, aproximadamente 70 milhões de toneladas de cinzas, obtidas da incineração do LETA, poderiam ser produzidos anualmente.

No Brasil, existem aproximadamente 7.500 ETAs que geram seus lodos em tanques de decantação e filtros, sendo que 70% destas os lançam diretamente nos mesmos riachos e rios de onde é retirada a água a ser tratada (AGOSTINI *et al.*, 2014). No entanto, o LETA tem em sua composição concentrações de alumínio, ferro, matéria orgânica e sólidos que quando lançados nos corpos d'água podem causar toxicidade a organismos aquáticos, alterações biológicas, assoreamento e consequentemente transbordamento de corpos hídricos em épocas de cheias causando assim um grande impacto ambiental devido ao seu descarte irregular.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica o lodo gerado nos decantadores das ETAs, como “resíduo sólidos”, assim devem ser tratados e dispostos corretamente dentro dos critérios nelas definidos. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 (Brasil, 2010), é de responsabilidade das empresas de saneamento o destino desses resíduos, logo devem buscar soluções ambientalmente aceitável e sustentável.

Atualmente, a necessidade de preservar o meio ambiente tem atraído muita atenção do mundo acadêmico e da indústria, especialmente para processos envolvendo reciclagem de resíduos sólidos poluentes. A indústria da construção civil, por exemplo, é uma grande consumidora de recursos e materiais, o que faz dela um setor com enorme potencial para o aproveitamento tanto de materiais residuais gerados pelas suas próprias atividades como de materiais gerados por outros setores. Dessa forma a reutilização do lodo da ETA no setor de construção pode ser considerada uma opção sólida do ponto de vista técnico, econômico e ambiental (WOLFF *et al.*, 2015).

Segundo Chen *et al.* (2010) a produção de clínquer de cimento Portland consome quantidades massivas de matérias-primas (calcário, argila, etc.), grandes quantidades de energia (850 kcal / kg de clínquer) e aumenta as emissões de gases com efeito de estufa (cerca de 0,85 kg de CO₂ / kg de clínquer). Logo, a procura de outras matérias-primas novas e econômicas também está se tornando uma preocupação imediata.

No que diz respeito ao uso de resíduos em argamassas, é importante conhecer e controlar as propriedades físicas e mecânicas de todos os ingredientes e sua contribuição para o comportamento do produto final, considerando a possibilidade de substituição de componentes caros por matérias-primas alternativa (RAUPP-PEREIRA *et al.*, 2017; RAMIREZ *et al.*, 2018).

1.2 JUSTIFICATIVA

Dentro de um conceito de sustentabilidade e diante dos impactos ambientais provocados pela disposição irregular do LETA nos corpos d'água torna-se relevante estudos que remetam o reaproveitamento do LETA. Ao mesmo tempo, é importante promover o desenvolvimento e o aprimoramento de materiais já empregados na engenharia civil, em especial o cimento Portland.

Outro problema ambiental recorrente está na produção do próprio cimento Portland, pois além de consumir 2% de toda a energia global, as cimenteiras também são responsáveis por 5% da emissão de dióxido de carbono (CO₂) de todo o mundo (SILVA, 2016). Uma das formas de amenizar os impactos da produção de cimento no meio ambiente é substituir parcialmente, em construções, o cimento por outros materiais.

Ao longo do tempo, vários resíduos industriais vêm sendo estudados pela comunidade acadêmica e transformaram-se nas fontes primárias de adições minerais. A

incorporação de adição mineral à composição do cimento Portland possui uma série de benefícios a nível ambiental, econômico e tecnológico. Os cimentos compostos com adições minerais tendem a ser mais baratos, ao substituírem parte do clínquer, que possui elevado custo de fabricação, por materiais de menor custo, beneficiando tanto quem fabrica, quanto quem consome. A nível tecnológico, as adições também proporcionam efeitos positivos no desempenho tecnológico do cimento, como um aumento da resistência mecânica e maior durabilidade.

Como a composição mineralógica das cinzas do lodo de ETA se assemelha com a de materiais componentes do cimento Portland, dando destaque a sílica, alumina e óxido de ferro, a sua incorporação ao cimento pode ser uma alternativa tecnicamente viável. Portanto, tendo vista a problemática ambiental decorrente da disposição final do lodo da ETA e pelos gerados durante a produção do cimento Portland, busca-se neste trabalho avaliar os efeitos do uso de cinza do lodo da ETA de Belém em substituição parcial ao cimento Portland, como uma solução ambientalmente eficaz e sustentável para minimizar esses problemas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os efeitos da utilização de cinzas do lodo da ETA Bolonha da cidade de Belém como substituição parcial do cimento Portland em pasta e argamassas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo preliminar para determinar a faixa de temperatura e o tempo de queima do LETA.
- Caracterizar do ponto de vista químico, físico, mineralógico as cinzas produzidas.
- Investigar e analisar o potencial pozolânico das cinzas de LETA produzidas;
- Analisar os efeitos da incorporação de cinzas de LETA, em substituição ao cimento Portland em argamassas nos teores 0, 6, 10 e 14%, avaliando suas propriedades mecânicas (resistência a compressão e tração na flexão), bem como sua absorção de água, índice de vazios e microestrutura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA

O tratamento das águas provenientes de mananciais subterrâneos ou superficiais e seu abastecimento são de suma importância para a população. No entanto, para que a água bruta possa atender ao padrão de potabilidade vigente estabelecido pela Portaria 518 de 25 de março de 2004 (Ministério da Saúde) e se tornar adequada para o consumo humano, ela passa por diversos processos físicos, químicos e biológicos nas Estações de Tratamento de Águas. (COELHO, 2015).

Nas etapas iniciais desse tratamento, ocorre a adição de produtos químicos na água bruta a fim de separar as impurezas existentes. Nesta separação, as partículas ficam dispersas no meio líquido e vão se aglomerando formando flocos, que pela ação da gravidade sedimentam. Esse resíduo acumulado é chamado de lodo de ETA (LETA) e é obtido a partir da lavagem dos decantadores. O lodo originário desse tratamento possui características líquidas e com grande volume, que por sua vez necessita de tratamento e disposição adequada.

Ritcher (2001) define o lodo de ETA como resíduo constituído de sólidos orgânicos e inorgânicos, acrescidos de produtos aplicados durante o processo de tratamento de água. Silva *et al.* (2000) acrescentam na definição do lodo de ETA a presença de hidróxidos de alumínio em grandes quantidades, provenientes da adição de produtos químicos e, em alguns casos, polímeros condicionantes também utilizados nos processos de tratamento de água.

De acordo com Silva e Isaac (2002), o lodo de ETA caracteriza-se como um fluído não-newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se em estado gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado. Cordeiro (1999) compara ETA com uma indústria, na qual uma matéria prima, água, é trabalhada resultando em um produto final, e que gera durante este processo de transformação um resíduo, o lodo de ETA.

2.1.1 Localização e Quantificação do LETA

As estações de tratamento de água é a parte fundamental do sistema de abastecimento de água para a população e tem como objetivo central a transformação da água bruta imprópria para o consumo humano em água potável. As ETAs empregam diversos processos de tratamento, os quais dependem dos fatores como as características

da água bruta e os padrões de qualidade a serem atingidos. O tratamento convencional ou de ciclo completo é o mais utilizado no Brasil (CORDEIRO, 1999).

A Figura 2.1 apresenta de forma esquemática o fluxograma de uma ETA convencional. Neste sistema a remoção de partículas finas em suspensão e em solução na água bruta é realizada através do emprego de coagulante que são sais de ferro ou de alumínio, que provocam a desestabilização das partículas coloidais e em suspensão da água bruta formando flocos pelos hidróxidos insolúveis, e que são sedimentados e removidos nos decantadores, e uma menor parcela, nos filtros (SANEPAR, 2014)

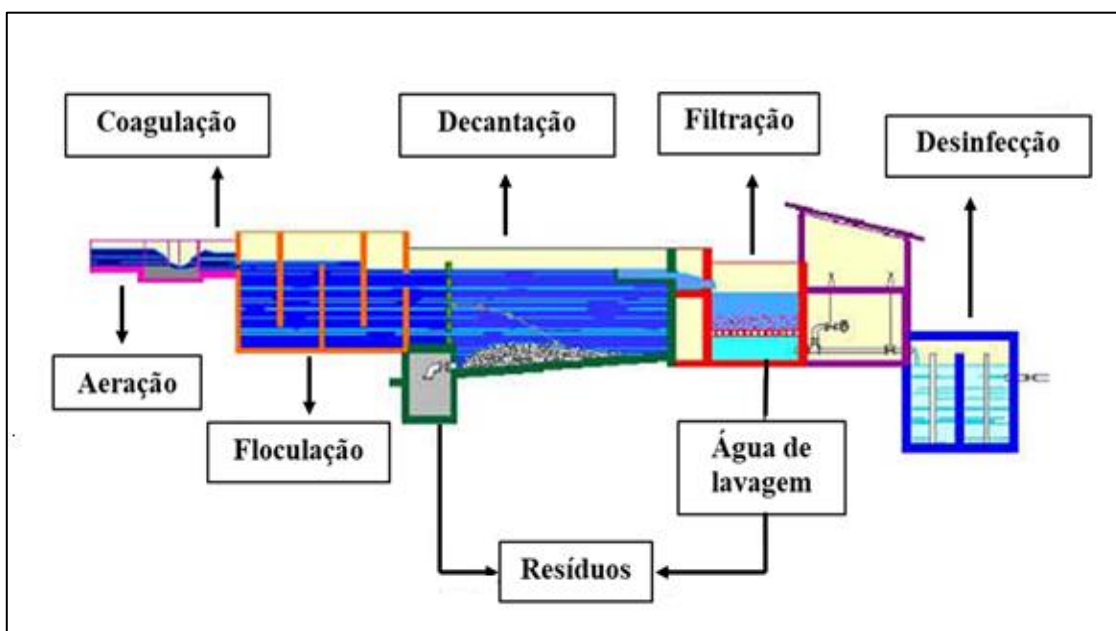


Figura 2.1– Esquema de Estação de Tratamento de Água Convencional. Adaptado de (ABE, 2014)

O tratamento convencional é aplicável a águas brutas que apresentam elevados graus de cor e turbidez, com presença de material coloidal. Neste tratamento conforme pode ser observado na figura 2.1, a água bruta é exposta a processos químicos e físicos, como aeração, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção, antes de receber o tratamento final para posterior distribuição (SUGUINO; FREITAS; VASQUE, 2013). A Tabela 2.1 apresenta as etapas básicas de um sistema de tratamento convencional com as respectivas descrições.

Tabela 2.1– Descrição dos processos de um sistema de tratamento convencional de água. Adaptado de (STEIN, 2016)

Processo	Definição dos Processos
Aeração	Processo de tratamento pelo qual a área de contato entre a água e o ar é aumentada, de modo a facilitar o intercâmbio ou troca de gases e substâncias voláteis entre a água e o ar.
Coagulação	O processo de coagulação consiste na aplicação de produtos químicos (coagulantes) aplicado para desestabilizar as partículas coloidais que justamente com precipitados formados pela reação dos coagulantes com água e sólidos em suspensão formam agregados maiores durante a floculação. Os principais coagulantes são: Sulfato de alumínio, Cloreto férrico, Sulfato ferroso clorado Sulfato férrico, Hidróxido cloreto de alumínio, Polímeros sintético, Polímeros naturais.
Floculação	Processo que ocorre logo após ou simultaneamente com a coagulação e cuja característica fundamental é a formação de aglomerados gelatinosos chamados flocos, resultantes da reação entre o produto químico coagulante e as impurezas da água.
Decantação	A sedimentação ou decantação é o processo onde os flocos suspensos são removidos da água, consistindo na utilização de forças gravitacionais fazendo a separação das partículas com densidade superior à da água, sendo depositadas em uma superfície ou zona de decantadores.
Filtração	A filtração é o processo de retenção das partículas sólidas suspensas na, envolvendo fenômenos físico, químico e, às vezes, biológico, com objetivo à remoção de microrganismos e demais substâncias indesejáveis que estão presentes na água por sua passagem através de um meio poroso.
Desinfecção	Consiste na destruição ou inativação de microrganismos patogênicos capazes de produzir doenças, ou de outros organismos indesejáveis. Algumas técnicas de desinfecção utilizadas são: cloração, ozonização, utilização de raios ultravioleta, radiação solar, dentre outras.

Nos processos e operações unitárias utilizadas nas ETAs convencionais geram-se resíduos: lodos acumulados nos decantadores e água de lavagem dos filtros, além da água de lavagem periódica dos floculadores e tanques de preparo de solução ou suspensão de produtos químicos. O lodo proveniente dos decantadores representa cerca de 60% a 95% da quantidade total de resíduos produzidos na ETA, em quantidade de sólidos, enquanto o restante é oriundo da água de lavagem dos filtros. No entanto a quantidade total de lodos gerados em uma ETA depende da qualidade da água bruta, turbidez, cor, concentração de produto químico adicionado na fase de coagulação, tempo de permanência no decantador, forma de limpeza entre outros (ABE,2014).

Dias *et al.* (2008) apud SILVA (2016), citaram que, devido ao baixo Padrão da qualidade da água bruta captada, as ETAs sofrem algumas implicações internas com o aumento do consumo de produtos químicos, particularmente do sulfato de alumínio, e o

aumento expressivo do volume de resíduos concentrados em suas unidades de decantação. Segundo eles esses resíduos são lançados em mananciais superficiais sem tratamento e agredindo dessa forma o meio ambiente.

Atualmente existem no Brasil mais de 7.500 ETAs de ciclo completo ou convencionas que produzem aproximadamente 4 milhões de toneladas por ano de lodo de ETA, sendo que a grande maioria delas ainda lançam esse resíduo nos corpos hídricos in natura. Dessa forma um ciclo é gerado os rios provedores de água para as estações de tratamento - são os receptores dos resíduos gerados pela própria ETA (KATAYAMA, 2014).

Entre as ETAs que descartam seus resíduos nos corpos hídricos sem tratamento algum, destaca-se a Estação de Tratamento de Água Bolonha (ETA Bolonha). Ela é responsável pelo abastecimento de aproximadamente 70% da água consumida na Região Metropolitana de Belém (RMB), estado do Pará e está localizada dentro dos limites da Área de Proteção Ambiental de Abastecimento de Água de Belém (COSANPA, 2013). A captação de água bruta da ETA Bolonha é realizada por meio de sistema produtor integrado Bolonha - Utinga que estão localizados no Lago Bolonha, interligado ao Lago Água Preta e são alimentados pelo rio Guamá como mostra a Figura 2.2.



Figura 2.2 – Lago Bolonha, Água Preta e região. Autor

Os resíduos do processo de tratamento de água da ETA Bolonha são produzidos na lavagem dos decantadores e dos filtros. Mattos e Teixeira (2013) ao caracterizá-los calcularam uma produção mensal de lodos de 148.765 m³ de água de lavagem dos filtros

e de 46.291 m³ de lodo da unidade de decantação, gerando um total de 195.056 m³/mês que representa um volume de 1,87% da água bruta que entra na ETA Bolonha para a vazão operacional de 4 m³/segundos (10.368.000 m³/mês). Adicionalmente, apresentaram os produtos químicos utilizados nesta ETA nas fases iniciais de tratamento que estão expostos na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Produtos químicos utilizados na ETA Bolonha. (MATTOS; TEXEIRA, 2013, adaptado por SILVA, 2016)

Produto Químico	Produto de Aplicação	Dosagem
Sulfato de Alumínio	Água bruta	14 mg/L
Cal hidratada	Água filtrada	6%
Cloro gasoso	Água filtrada	3 mg/L
Fluorsilicato de sódio	Água filtrada	0,7 mg/L
Polímero aniônico	Água coagulada	0,08 a 0,15 mg/L

A partir da vazão mensal de 10.368.000 m³/s e da concentração de sólidos suspensos na ETA Bolonha, Mattos e Texeira (2013) em seus resultados encontraram que a unidade de decantação da ETA supracitado produz cerca de 84 toneladas de resíduos (massa seca) por mês enquanto a unidade de filtração produz por mês 16 toneladas de resíduos (massa seca) perfazendo um total de 100 toneladas de resíduos secos mensalmente produzidos na ETA Bolonha.

Embora em termos de vazão a maior contribuição seja referente aos filtros (76,5%), a maior parcela em termos de massa seca é referente a unidade de decantação (84%), uma vez que a concentração de sólidos suspensos no lodo da unidade de decantação é muito superior aos obtidos na unidade de filtração, de 3.227 mg/L e 195 mg/L respectivamente. Todo resíduo produzido durante a lavagem decantadores e nos filtros são encaminhados para canal de descarga de seção retangular que é conectado em uma tubulação de aço de 1 m de diâmetro e 240 m de extensão que finaliza em um corpo d'água que desagua no Rio Guamá (MATTOS; TEXEIRA, 2013).



Figura 2.3 – Descarte do resíduo da ETA Bolonha: (a) válvula de descarga do decantador e (b) canal de descarga do lodo.

2.1.2 Impactos Ambientais Causados pela Disposição Irregular do Lodo de Lodo de ETA

Um grande desafio ambiental para o tratamento de água é o descarte excessivo de lodo produzido no processo, que é descartado em cursos d'água ou colocado em aterros sanitários (OOI *et al.*, 2018). A disposição irregular do LETA em cursos cursos d' água pode provoca a elevação da Demanda Química de Oxigênio (DQO), inibição da atividade biológica, mudança de cor e aumento da concentração de sólidos do corpo receptor, além de influir negativamente em áreas de criação de desova de peixes (BARBOSA *et al.*, 2001).

Di Bernardo e Dantas (2005) comentam que o lançamento indiscriminado dos resíduos gerados nas ETAs, em corpos d'água, contribui para o aumento da concentração de metais tóxicos nos bentos, limita o teor de carbono disponível para a alimentação de macroinvertebrados e as altas concentrações de sólidos suspensos diminuem significativamente a luminosidade do fitoplâncton nos locais próximos às descargas, além de ser potencialmente tóxico e deletério para alguns microcrustáceos os quais são componentes das comunidades bentônicas e planctônicas, além de relevantes na alimentação dos peixes.

Segundo EPA (2011) a carga orgânica contida nesses resíduos contribui para o consumo de oxigênio do corpo receptor, levando a condições anaeróbias, produção de odores e mortandade de peixes e algas. Além disso os sólidos suspensos provenientes dos resíduos de ETAs podem sedimentar no fundo dos corpos receptores causando sufocamento aos organismos bênticos. Podem ainda aumentar a turbidez reduzindo a penetração da luz, limitando o crescimento da vegetação que serve de habitat para peixes crustáceos e outros organismos aquáticos.

Outro grave problema está relacionado ao aumento de alumínio nos cursos d'água receptores do lodo devido a grande maioria das estações de tratamento de água utilizar o sulfato de alumínio como coagulante durante o tratamento. Segundo Ahmad *et al.* (2016) o lodo de alumínio despejado diretamente em rios e córregos provoca um aumento acumulativo no nível de alumínio e metais pesados na água, organismos aquáticos e, conseqüentemente, nos corpos humanos. No homem, sua toxicidade está reconhecidamente associada a várias compilações clínicas, destacando-se a progressões de doenças como Alzheimer, retardamento mental de crianças e mobilização do fosfato ósseo.

Machado (2003) afirma ainda que, a velocidade de escoamento do corpo d'água é um fator que influencia na dispersão dos elementos químicos que causam toxicidade no meio aquático. Por exemplo, quando a velocidade de escoamento é baixa, as descargas contendo alumínio são depositadas no fundo do curso d'água e isso pode afetar significativamente os organismos bênticos. Com a velocidade mais elevada e um maior controle no lançamento dos resíduos contendo alumínio, os resíduos remanescentes poderão permanecer em suspensão e assim sofrer um processo de dispersão mais rápido, o que diminuiria o potencial de toxicidade dos resíduos

A descargas de resíduos da ETA nos cursos d'água ainda é comum no Brasil, embora o país tenha uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, uma lei específica sobre gestão de resíduos. A NBR 10.004 (ABNT, 2004) classifica o lodo gerado nos decantadores de ETA, como “resíduo sólidos”, e dessa forma não devem ser dispostos em corpos d'águas superficiais. No entanto, muitos fornecedores de água no Brasil assinaram acordos com o governo que lhes dão até 30 anos antes de cumprirem a legislação existente. Como resultado, eles continuarão descarregando o lodo e prejudicando o meio ambiente nos próximos anos (GASTALDINI *et al.*, 2015).

2.1.3 Características físico-químicas e mineralógicas do LETA

O termo “lodo de tratamento de água” abrange todos os resíduos produzidos durante o tratamento de água em uma ETA e a sua composição físico-químicas e mineralógicas dependem tipicamente da água bruta coletada (água superficiais ou subterrânea através de poços), do tipo de solo da região, do material descarregado nos rios, dos produtos químicos presentes e do processo de tratamento empregado. Em águas subterrâneas, geralmente com qualidade estável, quando tratadas, a quantidade e a qualidade do lodo de tratamento de água é muito pouco. Por outro lado, o tratamento de águas superficiais, por vezes, resulta em mudanças perceptíveis na produção de lodo em termos de qualidade e quantidade. Isso pode ocorrer devido a mudanças consideráveis na qualidade da água bruta e/ou variação na natureza, bem como na dosagem de produtos químicos usados nos processos de tratamento.(AHMAD *et al.*, 2016).

No processo de tratamento da água as impurezas coloidais e suspensas presentes na água bruta, tais como areia, silte, argila, partículas úmidas são aglomeradas e estabilizadas pela ajuda de produtos químicos conhecidos como coagulantes; os produtos químicos usados frequentemente criam uma parte considerável do lodo. Os coagulantes comumente usados são sais de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) ou sais de ferro (por exemplo, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, FeCl_2 , $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) (SALES *et al.*, 2011); assim, a adição dessas substâncias químicas a base de Al e Fe no processo de coagulação da água resultam respectivamente, em lodo rico em Alumínio, também chamado de lodo de alumínio, ou rico em ferro, chamado de lodo férrico. Os principais componentes do lodo da ETA são: minerais argilosos, minerais muito finos (principalmente óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro), matéria orgânica e contaminantes de efluentes urbanos e industriais e outras atividades humanas (TEIXEIRA *et al.*, 2011)

As Tabela 2.3 apresentam uma síntese dos resultados e composição química de amostras de Lodos ETAs caracterizadas em estudos anteriores. A porcentagem de diferentes óxidos no lodo pode variar devido à qualidade da água bruta, natureza dos coagulantes utilizados, tecnologia de tratamento envolvida e qualidade final da água produzida. Como pode ser observado na Tabela 2.9 os Lodos de ETA são compostos principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , outros óxidos como CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 e TiO_2 também são encontrados em pequena porcentagem.

Tabela 2.3 – Composição química do lodo de diferentes ETAs caracterizados em estudos anteriores.

Referências	País	Composições (% em peso)								
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	*P.F
Cunha, (2019)	Brasil	27,9	24,7	13,5	0,6	0,3	0,9	0,1	0,6	29,9
Ramirez <i>et al.</i> , (2018)	Brasil	27,3	24,02	17	2,35	0,2	0,1	0,1	0,2	27,1
Sampaio, (2017)	Brasil	27,45	31,758	30,11	1,52	0,3	2,7	–	0,44	–
Geraldo <i>et al.</i> , (2017)	Brasil	34,92	34,11	7,19	0,79	–	1,76	–	–	17,98
Gastaldini <i>et al.</i> , (2015)	Brasil	14,66	32,26	11,8	1,04	1,63	0,23	0,32	–	3,37
El-Didamony <i>et al.</i> , (2014)	Egito	54,1	28,84	9,92	1,28	3,1	0,75	0,3	0,64	–
Camargo, (2014)	Brasil	43,59	25,64	10,38	1,00	0,28	1,63	–	0,66	15,2
Frías <i>et al.</i> , (2013)	Venezuela	36,24	29,46	10,05	1,23	0,98	3,31	0,83	1,23	ND
Kizinić <i>et al.</i> , (2013)	Lituânia	10,9	1,34	68,65	–	8,23	–	–	0,61	8,04
Huang and Wang, (2013)	China	64,3	21,12	10,4	–	2,05	0,79	0,17	1,06	10,88
Martinez-Garcia <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	46,37	30,33	8,55	–	11,15	3,25	0,36	2,19	–

*Perda ao Fogo

A elevada concentração dos óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ em lodos de ETAs são características dos argilominerais presentes na água bruta. Cabe ressaltar que a quantidade de Al₂O₃ ou Fe₂O₃ no lodo de ETA também está associada aos coagulantes aplicados (sais de Al ou Fe). Na Tabela 2.4, Ahmad *et al.* (2016) apresenta a composição físico-química separada de lodos de ETAs a base de Al e Fe (comumente chamado de lodo de Alumínio e de Ferro). Alguns metais pesados são relatados nas análises desses lodos. Eles podem estar presentes na composição do lodo de ETA devido serem transportados juntamente com água bruta e/ou presentes como impurezas nos coagulantes que se concentram no volume de lodo durante o processo de tratamento.

Tabela 2.4 – Composição físico-química do lodo de ETA. Adaptado de (AHMAD et al.,2016)

Parâmetro	Unidade	Lodo de Alumínio	Lodo Ferroso
PH		6,30 ± 0,30*	7,00 ± 1,30
Total de Sólidos	mg/L	25000,00 – 2552,00	2132,00 – 5074,00
Al	mg/kg	118,70 ± 24,26	61,39 ± 35,92
Fe	mg/kg	37,00 ± 19,74	220,90 ± 32,20
Ca	mg/kg	10,36 ± 42,99	–
Mg	mg/kg	2407,00 ± 572,00	–
Na	mg/kg	355,00 ± 142,00	–
K	mg/kg	35,47 ± 582,00	–
S	mg/kg	6763,00 ± 2955,00	–
Mn	mg/kg	2998,00 ± 1122,00	1088,00 ± 178,00
Zn	mg/kg	98,00 ± 31,00	36,00 ± 4,00
Cu	mg/kg	624,00 ± 581,00	46,00 ± 12,00
Ni	mg/kg	28,00 ± 10,00	64,00 ± 14,00
Pb	mg/kg	22,00 ± 12,00	47,00 ± 1,00
Cr	mg/kg	20,00 ± 7,00	38,00 ± 4,00
Cd	mg/kg	0,12 ± 0,02	–
Hg	mg/kg	0,46	–

*Desvio Padrão; ND = Não foi detectado no Aparelho.

Ahmad *et al.* (2018), investigaram a microestrutura do LETA da Ghaziabad ,na Índia, usando técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em que foram gravadas em ampliações de 1000x e 2000x (figura 2.3). As partículas do LETA possuem formas irregulares e não são homogêneas devido às formas de partículas incertas. Com base na descrição aparência da morfologia a partir da análise de MEV, os autores verificaram partículas do LETA são pouco cristalinas com estrutura lamelares.

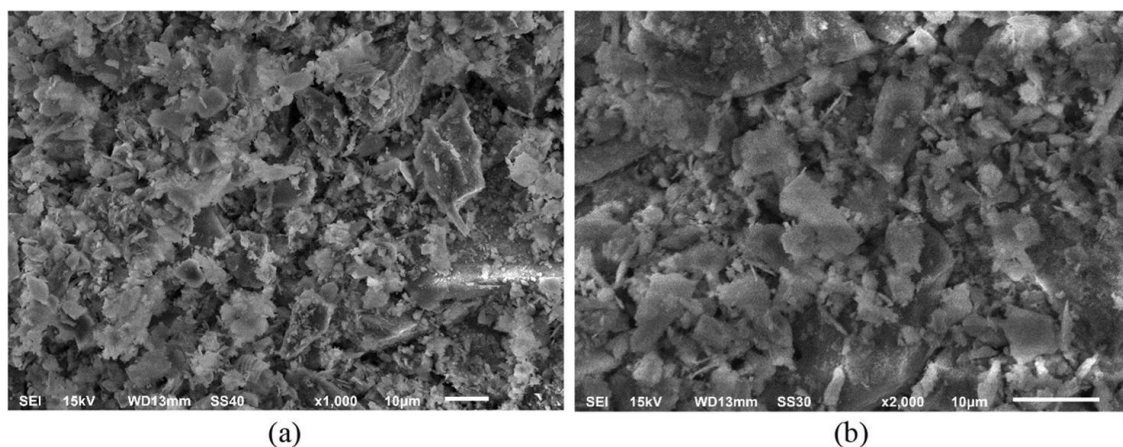


Figura 2.4 – Micrografias MEV do LETA na ampliação (a) 1000x (b) 2000x. (AHMAD *et al.*, 2018)

Haider *et al.* (2014), também utilizou ensaio de MEV para analisar a morfologia de um LETA da Malásia. Como pode ser visto na figura 2.4, as partículas do LETA bruto possuem formas irregulares e não são homogêneas devido às formas de partículas incertas. Com base na descrição sua aparência a partir da análise de MEV, o lodo de ETA possui uma estrutura semelhante a uma estrutura amorfa com partículas que exibem textura áspera e compacta.

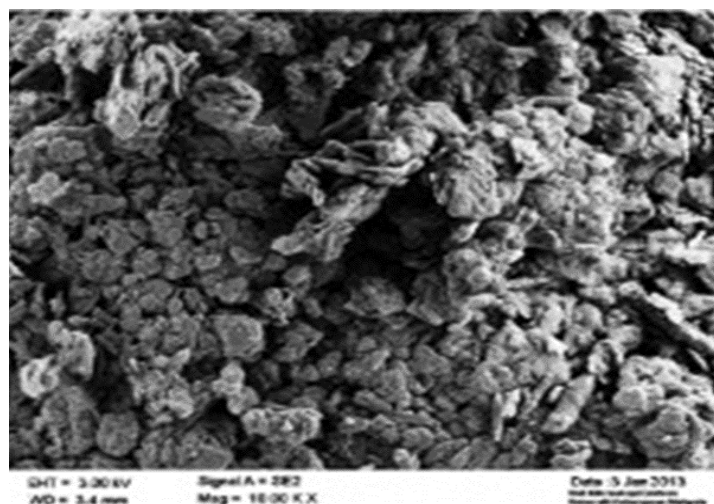


Figura 2.5 – Imagens de MEV de LETA ampliado até 10.000x. (HAIDER,2014).

Ainda nos estudos de Haider *et al.* (2014), foi realizado o ensaio de DRX (Difração de raio X) nas amostras LETA da Malásia in natura (tratado a 100°C). A Figura 2.5 mostra o resultado da análise de DRX dos componentes e minerais encontrados na amostra. Através dos resultados de DRX, verifica-se que o lodo da ETA da Malásia é constituído principalmente por quartzo e caulinita, além de pequenas quantidades de mica.

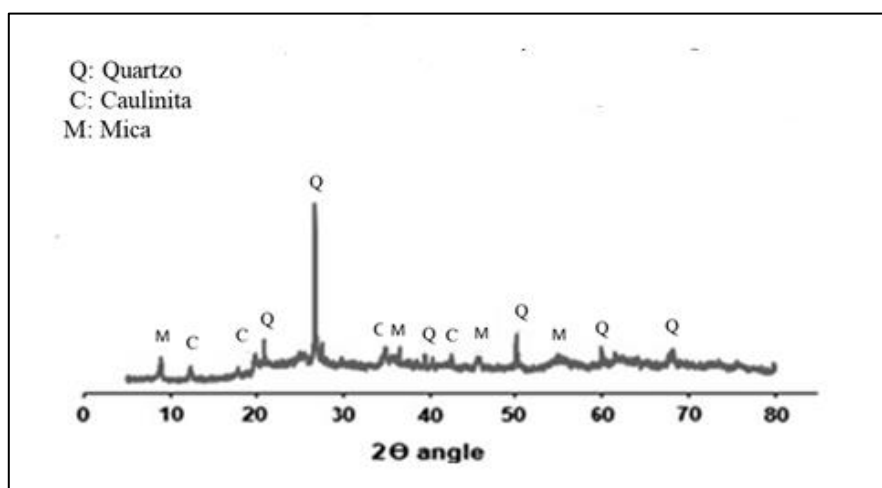


Figura 2.6 – Difração de raio X do lodo de ETA da Malásia. Adaptado de (HAIDER *et al.*, 2014).

De acordo com as normas brasileiras, o lodo de ETA é classificado como resíduo sólido e semissólido e deve ser tratado e descartado conforme exigido pelas autoridades reguladoras em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Assim, as empresas de saneamento do setor vêm buscando soluções alternativas e ambientalmente corretas para o descarte dos resíduos produzidos no processo de tratamento de água (RAMIREZ, 2018).

Além do impacto ambiental causado aos rios onde os resíduos de ETA são descartados, o lodo também pode representar um risco para a saúde humana devido à presença de agentes patogênicos e metais pesados (GASTALDINI *et al.*, 2015); Assim, o descarte ou a reutilização adequada desses resíduos é importante. Segundo Tsutiva e Hirata (2001), o principal desafio é a necessidade de novas pesquisas sobre alternativas para o descarte de lodo de ETA que sejam econômica e tecnicamente viáveis e vantajosas para o meio ambiente.

2.1.4 Comportamento térmico do lodo de ETA

Para serem usadas como adições minerais, o lodo de ETA necessita passar por um processo de ativação, o qual tem influência direta nas propriedades pozolânicas das cinzas produzidas e consequentemente na performance dos cimentos compostos por elas. Esse processo de ativação refere-se à queima que os materiais são submetidos para produção das cinzas.

De acordo com Ambroise e Pera (1992) a ativação térmica a 600 °C - 900 °C de muitos minerais argilosos leva, por desidroxilação, à quebra ou ruptura parcial da estrutura cristalina formando uma fase de transição com alta reatividade. A argila está em seu estado mais reativo quando a temperatura de calcinação leva à perda de hidroxilas e resulta em uma estrutura de argila colapsada e desarranjada. Para caulinita, a temperatura de calcinação para produzir o estado ativo de Metacaulinita (MK) é geralmente na faixa de 600 °C - 800 °C. Neste estudo os autores observaram através de análise de DRX que a caulinita desapareceu a 600 °C após 2 h de ativação térmica, devido à transformação da caulinita em MK. Além disso esse concluíram que calcinações de abaixo de 700 °C resultam em MK menos reativo com mais caulinita residual.

Silva e Fugaro (2011) submeteram amostras de Lodo bruto de ETA, aos ensaios de termogravimetria (ATG), juntamente com a termogravimetria derivada (DTG) para identificar os diferentes fenômenos que ocorrem nas amostras devido ao aquecimento. As curvas ATG e DTG obtidas (figura 2.6) mostraram uma perda de massa total no

aquecimento de 1440 °C de aproximadamente 32 % devido à eliminação de água adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica.

Nos resultados de Silva e Fugaro (2011) a curva DTG apresentou 4 picos (Figura 2.6). O primeiro evento em 76 °C corresponde à remoção de água fisicamente adsorvida tipicamente observada em materiais argilosos. Em 275 °C ocorre a desidratação de hidróxidos existentes, tais como gibsita e goetita. O pico em 320 °C, o qual não está associado a qualquer perda de massa, indicou a presença de gibsita e/ou decomposição de matéria orgânica. A temperatura de 491 °C ocorre desidroxilação da caulinita, levando à formação de metacaulinita. Um pequeno pico exotérmico em torno de 1000 °C e deve-se fundamentalmente à quebra da estrutura da metacaulinita para a formação de novas fases cristalinas tais como $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ e/ou mulita primária.

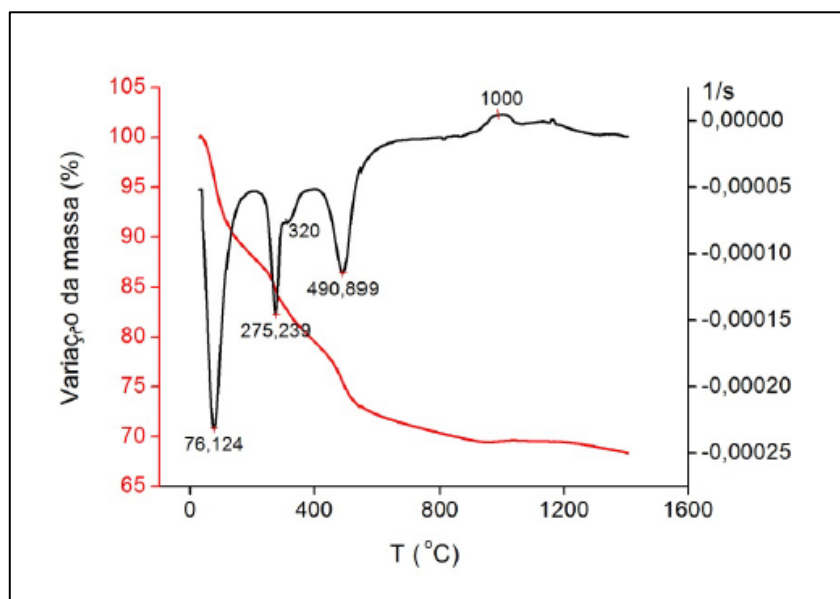


Figura 2.7 – Análise termogravimétrica (ATG e DTG) do lodo de ETA. (SILVA e FUGARO, 2011).

Texeira *et al.* (2015) avaliaram duas amostras de lodo de ETA a base de alumínio e ferro a partir da análise termogravimétrica. Os resultados da análise mostraram que houve perda de umidade de aproximadamente 9% (próximo a 65 °C), perda de água devido à decomposição de hidróxidos (alumínio e ferro) e queima de matéria orgânica da ordem de 7% (próximo a 265 e 315 °C), e perda de água estrutural de caulinita de 7% (em torno de 500 °C).

Nos estudos de Hagemann *et al.* (2019), foi realizado o ensaio de DRX em LETA in natura e em cinzas obtidas em diferentes temperaturas de calcinação. Os principais compostos mineralógicos observados no lodo bruto da ETA foram a caulinita e o quartzo.

A Figura 2.7 mostra que a calcinação do lodo de ETA resultou no desaparecimento dos picos atribuídos à caulinita e na manutenção dos picos relacionados ao quartzo. A análise química mostrou um conteúdo considerável de óxido de ferro, que não aparece no DRX do lodo in natura. Isto indica a presença de compostos de ferro amorfos ou mal cristalizados. O aumento da temperatura e/ou tempo de calcinação altera a estrutura desses compostos. Em CLETA calcinado acima de 700 °C e triturado por 2 h, os picos de hematita aparecem como resultado desse efeito.

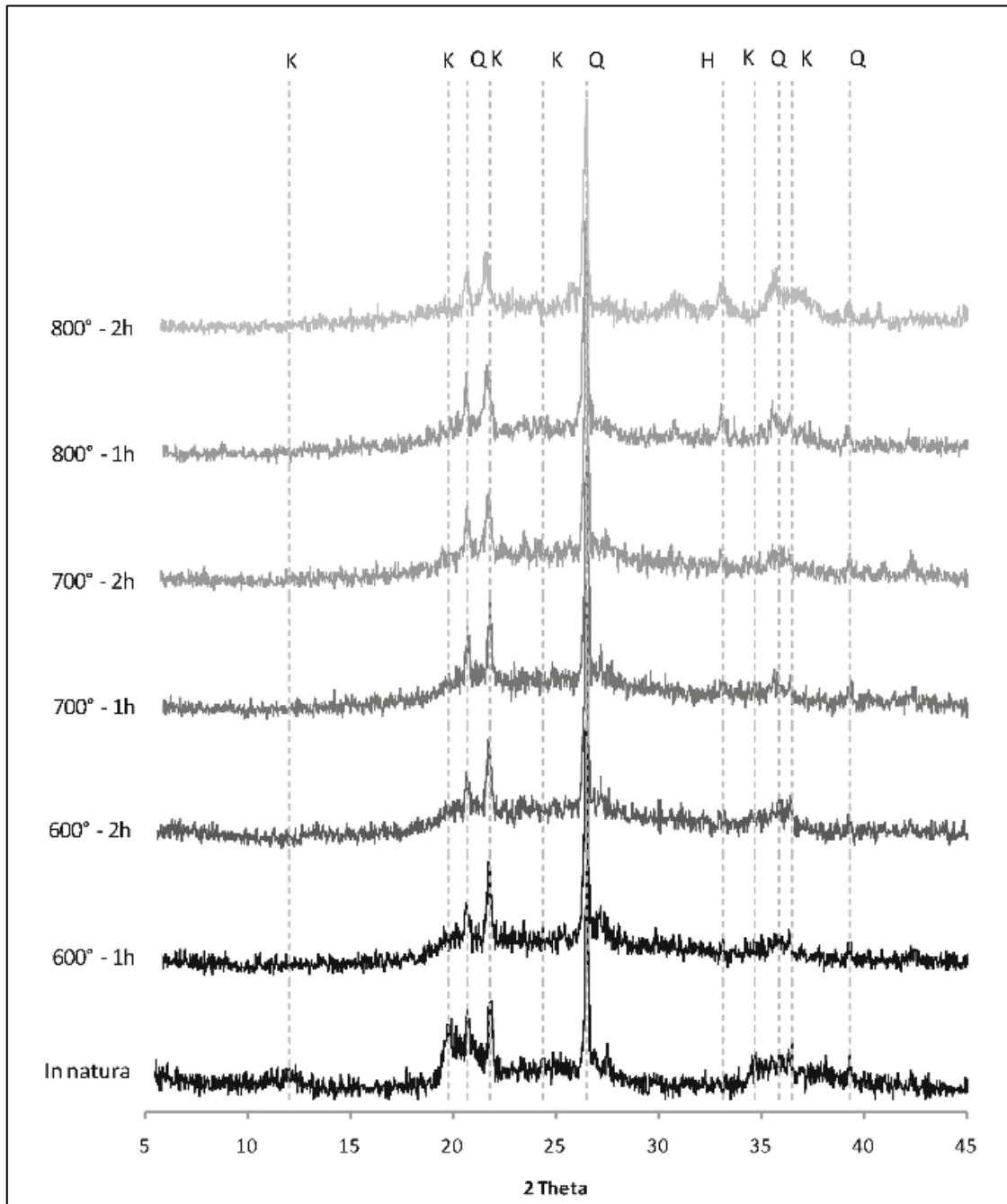


Figura 2.8 – DRX do lodo de ETA in natura e em cinzas (k - Caulinita, Q - Quartzo, H – Hematita). (HAGEMANN *et al.*, 2019)

Haider *et al.*, (2014), produziram CLETA ativada termicamente através da incineração de LETA in natura em um forno elétrico de laboratório a 800 °C por um período de 2h, e a taxa de aquecimento de 5 °C/min. Devido à ativação térmica a 800 °C , as partículas de LETA são significativamente reduzidas em tamanho e a área superficial específica do CLETA apresentaram-se maior do que o LETA in natura e o cimento Portland. A figura 2.8 mostra os aspectos físicos do LETA e da CLETA ativado termicamente a 800 °C.



Figura 2.9 – Aspecto Físico do LETA: a) LETA seco em forno a 110 °C; b) LETA moído; (c) CLETA ativado termicamente a 800 °C e (d) CLETA ativada termicamente moída. (HAIDER *et al.*, 2014)

Nos estudos de Tantawy *et al.* (2015), o LETA foi calcinado em uma mufla elétrica com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min a 400 – 900 °C por 2 h. A calcinação do lodo foi acompanhada de uma sequência de reações químicas incluindo a desidratação de $\text{Al}(\text{OH})_3$ coloidal, formação de Al_2O_3 e cristalização de sílica amorfa. Estas reações químicas afetam grandemente a microestrutura do lodo. Os autores concluíram que a calcinação de lodo a 800 °C preserva a natureza amorfa da sílica (Fig. 2.9c), enquanto a calcinação a temperatura mais alta leva à cristalização e agregação de sílica amorfa (Fig. 2.9 d).

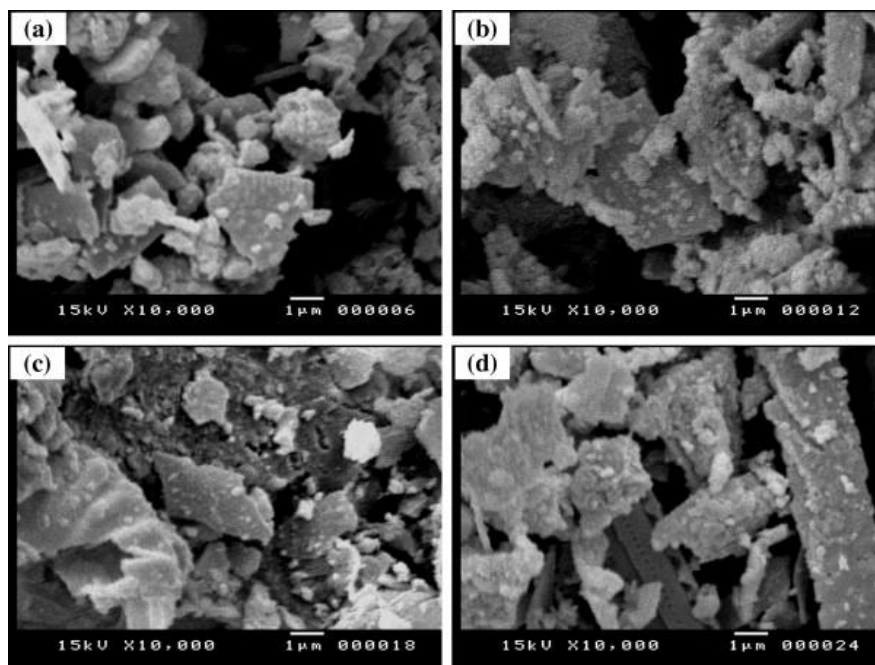


Figura 2.10 – Micrografia MEV de a) lodo de alumínio bruto e calcinado em temperaturas de b) 600 °C, c) 800°C d) 900° C. (TATAWY et al, 2015)

Ao estudar os efeitos da temperatura de ativação em amostras de LETA, calcinando-as em temperaturas variando 600 a 900 °C, por 2 h de retenção ao forno, Frias *et al.* (2013) observaram que a caulinita desapareceu após a ativação térmica a 600 °C devido à transformação da caulinita em MK, produto altamente pozolânico. Os autores concluíram que os produtos ativados obtidos por ativação do LETA apresentaram alta atividade pozolânica, levando em consideração o ensaio de atividade pozolânica pelo método de valores fixos de calcário. No entanto, do ponto de vista energético e ambiental, 600 °C e 2 h de retenção são condições de ativação adequadas para transformar um resíduo inerte em um material ativo para o setor de construção.

Nos estudos de Hagemann *et al.*, (2019), foram produzidas CLETA a partir da calcinação em forno mufla a 600, 700, 800 °C com tempos de permanência de 1 e 2h. A atividade pozolânica da CLETA foi avaliada pelo índice de atividade pozolânica (IAP) de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 5752 (ABNT,2014). Os resultados apontaram que o IAP variou de 93% a 107% da referência de resistência a compressão. Estes valores são superiores aos requeridos pela NBR 12653 (ABNT, 2015). Os autores concluíram que maiores temperaturas de calcinação aumentaram a resistência a compressão até 700 °C quando as amostras foram comparadas sob condições de permanência ao forno iguais e tempo de moagem. Já a CLETA calcinado a 800 °C por 1h houve uma redução da resistência a compressão devido o aparecimento de compostos de

cristalinos que indicaram perda de reatividade, confirmada pelos valores reduzidos de IAP.

Frias *et. al.*, (2014) analisaram as propriedades pozolânicas e termodinâmicas de lodo de ETA venezuelano ativado a 600 °C por 2h de retenção em forno elétrico. Os estudos de DRX, MEV e análise térmica confirmam a formação de géis C_2ASH_8 , C-S-H e C_4AH_{13} como os produtos de hidratação da reação pozolânica. A atividade pozolânica para este resíduo industrial ativado foi medido através de porcentagem fixa de calcário (%). Os resultados indicam que o lodo de água potável ativado apresenta altas propriedades pozolânicas, principalmente durante as primeiras 24h de reação. A atividade pozolânica do lodo de ETA ativado (LA) foi comparável, principalmente após 7 dias, a outros resíduos à base de caulinita termicamente ativados (Figura 2.10), como lodo de papel ativado (LPA) e resíduos de mineração de carvão (RMC), e mostrou uma atividade pozolânica mais alta que cinzas volantes (CV) pozolana tradicional na indústria cimenteira, nos primeiros 28 dias de reação.

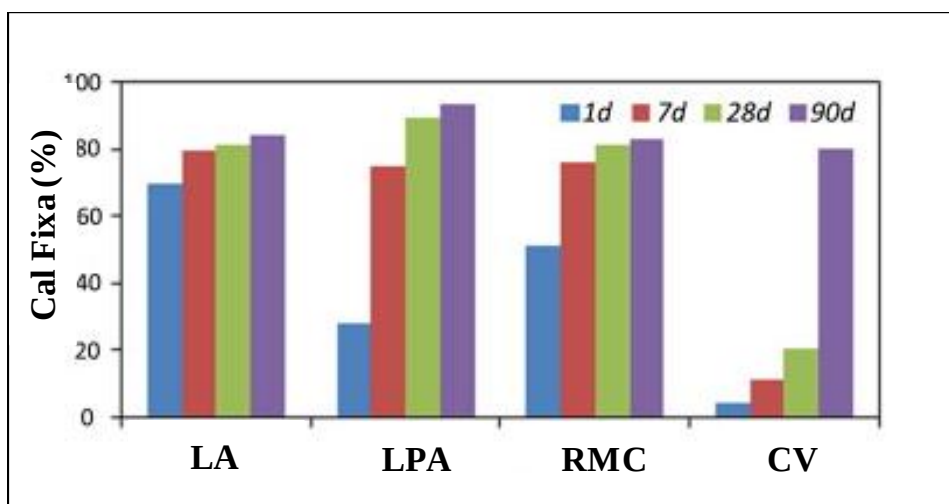


Figura 2.11 – Evolução da atividade pozolânica vs tempo de hidratação: Lodo de ETA ativado (LA), lodo de papel ativado (LPA), resíduos de mineração de carvão (RMC) e cinzas volantes (CV). (Frias *et al.*, 2014)

2.1.5 Reaproveitamento do LETA em material de construção

Nos últimos anos, tem surgido uma tendência para o uso benéfico do lodo de ETA, que vem deixando de ser considerado um “resíduo” para ser considerado um “produto”. Devido as características físico-químicas e mineralógica do LETA, conforme relatado na literatura, algumas linhas de pesquisas têm investigado o reaproveitamento do lodo como material de construção civil em diferentes aplicações: fabricação de tijolos e materiais cerâmicos, agregado leve, substituição a areia, geopolímero e substituição parcial ao

cimento Portland. A Tabela 2.5 apresenta alguns estudos desenvolvidos com diversas aplicações do LETA in natura e ativado pelo processo de calcinação no Brasil e no mundo.

Tabela 2.5 – Estudos desenvolvidos com LETA in natura e calcinado.

Autores	Local de Origem	Aplicação do LETA		Teores Utilizados
		In natura	Calcinado	
Tafarel <i>et al.</i> , (2016)	Paraná, Brasil	Agregado miúdo em concreto	–	5 e 10%
Gomes <i>et al.</i> , (2016)	Paraná, Brasil	Agregado miúdo em concreto	–	5; 7 e 10%
Benlalla <i>et al.</i> (2015)	Bouregreg, Marrocos	Cerâmica estrutural	–	5 a 30%
Texeira <i>et al.</i> , (2011)	São Paulo, Brasil	Cerâmica vermelha	–	10 a 20%
Kizinievič <i>et al.</i> , (2013)	Vínius, Lituânia	Tijolos	–	5 a 40%
Huang e Wang (2013)	Hsing-Zu, Taiwan	Agregado Leve	–	5 a 15%
Geraldo <i>et al.</i> , (2017)	São Paulo, Brasil	–	Geopolímeros	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,2$ $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = 0,2$
Waijarean <i>et al.</i> , (2014)	Bangkok, Tailândia	–	Geopolímeros	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,78$ $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2 = 0,25$
Ahmad <i>et al.</i> , (2018)	Ghaziabad, Índia	–	Cimento Portland	10, a 25%
Rocha <i>et al.</i> , (2017)	Porto Alegre, Brasil	–	Cimento Portland	0 a 10%
Amaral (2015)	Santa Maria, Brasil	–	Cimento Portland	10 a 20%
Gastaldine <i>et al.</i> , (2015)	Rio Grande do Sul, Brasil	–	Cimento Portland	5% a 30%
Frias <i>et al.</i> , (2014)	Caracas, Venezuela	–	Cimento Portland	15%
Batalha (2012)	Manaus, Brasil	–	Cimento Portland	5 a 15%

2.1.5.1 Fabricação de tijolos e materiais cerâmicos

Benlalla *et al.* (2015), avaliaram os efeitos da incorporação do LETA de Bouregreg, localizada em Marrocos, sobre as propriedades e microestrutura da argila utilizada como matéria-prima para a fabricação de cerâmica. O LETA foi adicionado a mistura substituindo a argila em diferentes proporções que variavam de 5 a 30%. As

amostras destas misturas foram queimadas a temperatura de 800, 900 e 1000 °C. A Figura 2.11 mostra o aspecto das amostras cruas e cozidas de 800 a 1000 °C. As amostras testadas apresentaram alta resistência mecânica, sem deformação ou defeitos. No entanto os autores concluem que no total, a melhor proporção de LETA no tijolo é de 20%, com um teor ótimo de umidade de 30%, preparado nas misturas moldadas e queimadas entre 900 °C e 930 °C para produzir tijolos de boa qualidade.

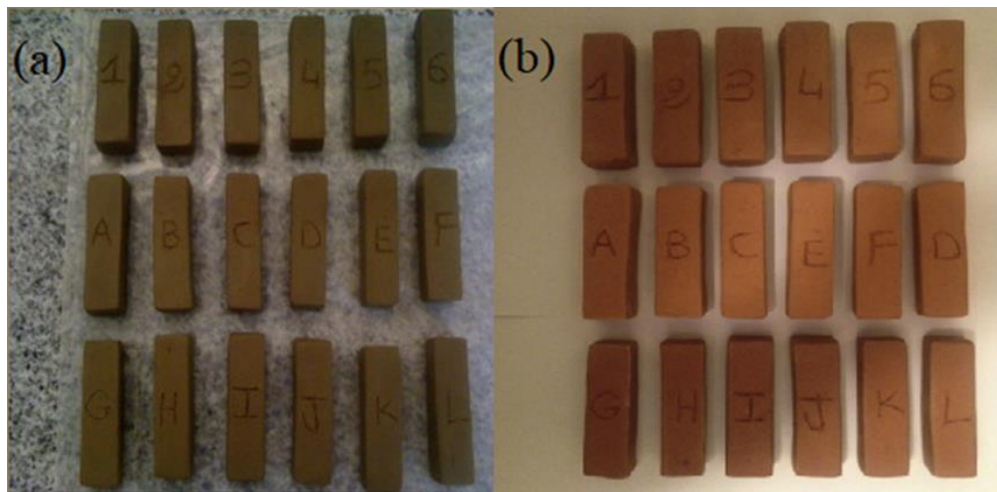


Figura 2.12– Aspecto das amostras (a) cruas e (b) queimadas de 800 a 1000 °C.
Adaptado de (BENLALLA *et al.*, 2015)

Teixeira et al. (2011), mostraram que o lodo à base de alumínio era mais deletério do que os coagulantes à base de ferro para materiais cerâmicos. Em geral, o lodo à base de ferro aplicado em produtos cerâmicos obteve melhores resultados quanto às propriedades mecânicas e também uma redução na temperatura de queima dos tijolos. Além disso, Kizinievič et al. (2013) concluíram que usualmente o lodo de ferro conferia uma cor mais avermelhada aos tijolos, agindo como um pigmento natural. No entanto, os resultados com a adição de altas proporções de lodo à base de alumínio mostram uma redução considerável no desempenho mecânico dos corpos cerâmicos com o aumento da adição de lodo (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

2.1.5.2 Agregado leves

Os agregados leves são produtos cerâmicos altamente porosos e esféricos com baixa densidade (0,8 a 2,0 g / cm³) e comumente usados na fabricação de vários produtos de construção (Soltan et al., 2016). O possível uso do lodo de ETA para a produção de agregado leve foi estudado pelos pesquisadores Huang e Wang (2013). Os experimentos nesse estudo envolveram lodos de 10 estações de tratamento de água de Taiwan. O lodo

coletado na ETA de Hsing-Zu, apresentou os melhores resultados para a fabricação de agregado leve estrutural e não estrutural em larga escala, usando um forno rotativo comercial. Os agregados resultantes do lodo desta ETA possuíam uma densidade de partícula de 1,3 g/cm³ ou 0,98 g/cm³ e uma densidade aparente de 726 kg/m³ ou 518 kg/m³ para o agregado leve estrutural e agregado leve não estrutural, respectivamente. O agregado leve estrutural atendeu aos requisitos da norma ASTM C330. Os autores concluíram que as propriedades de engenharia do concreto feitas a partir do agregado leve estrutural produzidos com lodo da ETA de Hsing-Zu atendem aos requisitos de concreto estrutural leve.

2.1.5.3 Substituição a areia

Tafarel *et al.* (2016) substituiu parcialmente a areia natural presente no concreto por um LETA a base de alumínio, em proporções de até 10% do peso seco da areia. Considerando os resultados, apenas as amostras com 5% de substituição de lodo apresentaram desempenho satisfatório de resistência à compressão de 15,5 MPa aos 28 dias, decréscimo na resistência próximo a 11% quando comparado ao concreto de referência. A incorporação de 5% e 10% de lodo levou a um aumento na absorção de água de 12% e 32%, respectivamente.

Em pesquisa semelhante, Gomes *et al.* (2017) investigaram os efeitos do lodo à base de alumínio em sua forma natural (úmida), variando de 0, 5, 7 e 10% de substituição de areia em concreto. Os resultados mostraram que a adição de lodo úmido reduziu a resistência mecânica e aumentou a absorção de água, pois mesmo 5% da substituição do lodo levou a uma redução de 50% na resistência à compressão e 45% na absorção de água.

2.1.5.4 Geopolímero

Geraldo *et al.* (2017) investigaram a substituição parcial do metacaulim (MK) pelo lodo de ETA na composição da argamassa geopolimérica. Uma solução alternativa ativadora alcalina foi preparada com NaOH e cinza da casca de arroz (substituindo o silicato de sódio). Além disso, devido à quantidade de SiO₂ ser menor no lodo de ETA em comparação com o MK, uma quantidade extra de cinza de casca de arroz foi adicionada nas misturas para equilibrar e aumentar a relação SiO₂/ Al₂O₃. Os resultados mostraram que à medida que a proporção de lodo de ETA aumentou, o tempo de acerto aumentou simultaneamente. O tempo final de decantação das amostras variou de 3,22 a

5,32 h; que foram maiores em comparação com geopolímeros de cinzas volantes para a mesma temperatura. A resistência à compressão e a trabalhabilidade das amostras diminuíram conforme a adição de Lodo de ETA. As resistências mecânicas em todas as idades de cura foram superiores ao mínimo requerido para os diversos tipos de componentes de construção, de acordo com a norma brasileira (tijolo de argila-fogo > 1,5 MPa, tijolo de solo-cimento > 2,0 MPa, bloco de concreto > 3,0 MPa).

Waijarean *et al.* (2014) utilizaram LETA à base de alumínio como material aluminossilício para sintetizar geopolímeros, visando sua aplicação na imobilização de resíduos de metais pesados. Os resultados mostraram que o lodo não calcinado não apresentou resistência à compressão nas idades iniciais e após 60 dias de cura alcançou 0,76 MPa. O perfil de DRX mostrou que a principal razão para esse fenômeno foi a não ocorrência de desidroxilação do haloisita. As amostras geopoliméricas calcinadas a 600 e 900 °C apresentaram menor resistência à compressão do que as calcinadas a 800 °C, atingindo 8,8 MPa após 60 dias de cura.

2.1.5.5 Substituição parcial do cimento Portland por cinzas do lodo de ETA

Ahmad *et al.* (2018) estudaram a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por CLETA à base de alumínio dos leitos de filtração de retrolavagem, calcinados a 800 °C para incorporação em argamassa e concreto. O cimento Portland foi substituído pela CLETA nas porcentagens variáveis de 0, 10, 15, 20 e 25% designadas como MM₀, MM₁₅, MM₂₀ e MM₂₅ respectivamente. Com relação às atividades pozolânicas da CLETA, os resultados mostram que, assim como os materiais pozolânicos tradicionais, o lodo calcinado reagiu com o Ca(OH)₂ e gerou quantidades significativas de produtos hidratados, podendo ser classificado como uma pozolana artificial. Os autores observaram que cimento substituído pelo CLETA aumenta a demanda de água para atingir a consistência padrão (Figura 2.12). A resistência à compressão das misturas diminuiu à medida que a CLETA foi adicionada. No entanto os resultados indicaram que as substituições do cimento Portland por de até 20% de CLETA calcinado a 800 °C poderiam atender ao padrão indiano exigido para a pasta feita pelo cimento Portland composto por pozolana.

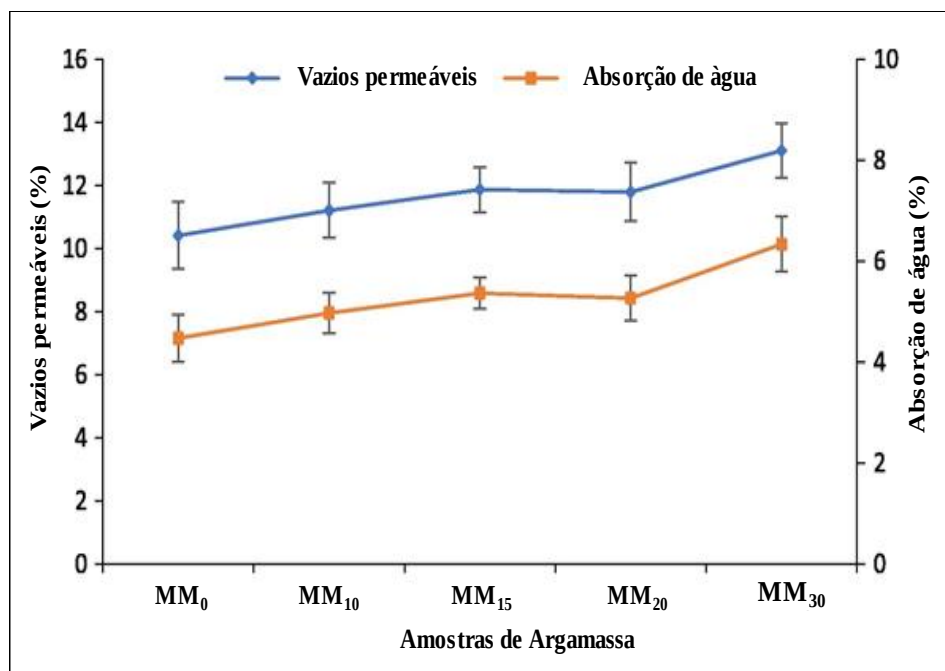


Figura 2.13 – Vazios permeáveis e absorção de água presente em argamassas com percentual variável de CLETA. (AHMAD *et al.*, 2018)

Frias *et. al.* (2014) avaliaram o comportamento de um lodo de água potável venezuelano ativado a 600 °C por 2h de retenção em forno elétrico, em matrizes de cimento misturado e preparado com 15% de lodo ativado (LA) e 85% de cimento Portland (CP). A incorporação de LA afetou levemente a microporosidade total, aumentando os valores tamanho médio do diâmetro médio dos poros das argamassas de cimento misturadas e com isso os autores observaram um aumento da demanda de água em 50% e uma redução de consistência de cerca de 38% em argamassas misturadas. O efeito da adição de LA na resistência à compressão da argamassa de CP (média de seis amostras), incluindo os intervalos de desvio padrão, é mostrado na Figura 2.13. Os resultados apontam que a adição de 15% de LA na fabricação de argamassas de cimento misturado produziu perdas de resistência à compressão entre 12% e 18% em função da idade de cura. Os autores concluem que apesar disso, todas as argamassas de cimento de 15% LA cumpriram os requisitos mecânicos especificados nos padrões existentes.

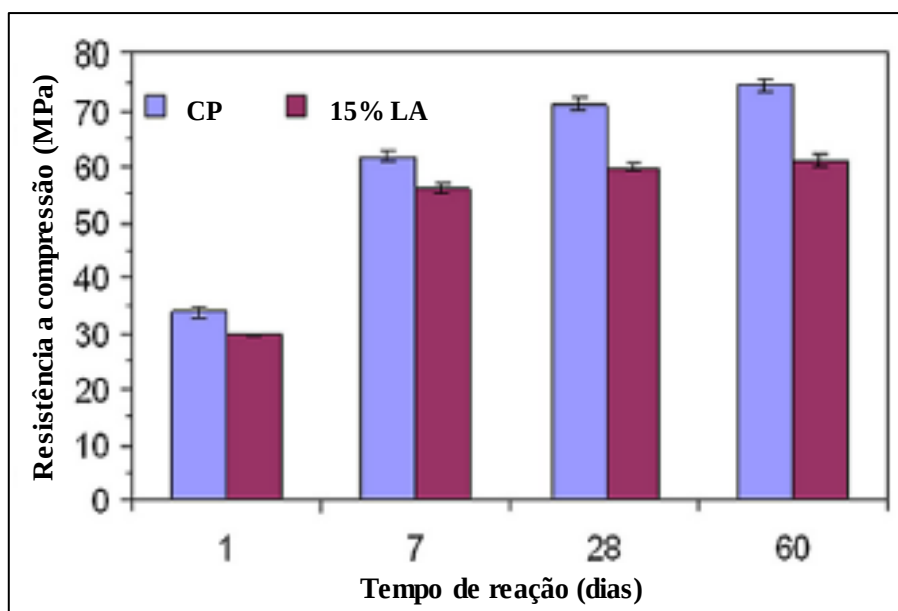


Figura 2.14 – Evolução da resistência a compressão até 60 dias de cura. (FRIAS *et. al.*, 2014)

Batalha (2012), estudou sobre a produção de argamassa de cimento Portland com a utilização da cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus em substituição parcial ao cimento Portland. A cinza do lodo, obtida após os processos de secagem, moagem e calcinação na temperatura de 650 °C, foi usada como componente da mistura substituindo parcialmente o cimento em 5%, 10% e 15% em massa. Os resultados apresentados mostram que o uso da CLETA é viável tecnicamente: as resistências à compressão das argamassas com teor de 5% e 15% de cinza substituindo o cimento apresentaram, aos 28 dias, resultados estatisticamente iguais em comparação à argamassa de referência. O ensaio de porosimetria mostrou que a cinza além de proporcionar redução no consumo de cimento na mistura, atuou no refinamento da estrutura de poros da argamassa com 5% de CLETA, reduzindo 15,64% os macroporos e aumentando em 4% os mesoporos em relação à argamassa de referência. No ensaio de absorção por capilaridade, as argamassas apresentaram taxas menores em relação à argamassa de referência, comprovando o efeito fíler da CLETA na matriz.

Amaral (2015), avaliou as propriedades mecânicas de concreto com adição de CLETA. No seu estudo, entre outros ensaios, foi analisado a resistência a compressão axial de concretos com CLETA em substituição ao cimento nas proporções de 0 (referência), 10, 15 e 20%, para três relação água cimento. Os autores observaram que a maioria das amostras com adição de CLETA apresentaram resistência de compressão axial superiores as amostras de referência (REF). A Tabela 2.5 apresenta os resultados do

ensaio de resistência a compressão axial de concreto com diferentes teores de CLETA em substituição ao cimento Portland.

Tabela 2.6 – Resultado do ensaio de resistência à compressão axial aos 7 dias de cura úmida. (AMARAL, 2015, adaptado por STEIN, 2016)

Mistura	Resistência a compressão axial (MPa)	
	Relação a/c	7 dias de cura úmida
REF	0,35	54,7
	0,5	40,7
	0,65	28,7
5% CLETA	0,35	56,5
	0,5	43,5
	0,65	34,5
10% CLETA	0,35	66,5
	0,5	44
	0,65	36
15% CLETA	0,35	67
	0,5	48,5
	0,65	35,5
20% CLETA	0,35	69
	0,5	45,6
	0,65	32,2

Nos estudos Rocha *et al.* (2017), também foi avaliado as propriedades mecânicas de concreto (resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral) nas idades de 7, 28 e 91 dias, utilizando o lodo de ETA calcinado a 600 °C por 1h, em substituição ao cimento, com teores de 0 a 10% e obtiveram resultados satisfatório.

Gastaldini *et al.* (2015) investigaram a possibilidade de usar lodo de ETA como adição mineral. Primeiramente, avaliaram o índice de pozolanicidade da CLETA, após a exposição do material a diferentes temperaturas de calcinação e tempos de permanência ao forno. As amostras com os melhores resultados foram utilizadas para investigar o desempenho de misturas de concreto onde o lodo de ETA foi substituído por cimento Portland em concentrações variando de 5% a 30% em três diferentes relações água/ligante (a/c) (0,35, 0,50 e 0,65). Os resultados indicam que o uso de cinza de lodo de ETA melhora a resistência de misturas de concreto quando comparado com concreto com cinza de casca de arroz ou sílica ativa. Os autores concluíram que usando CLETA, é possível obter a mesma resistência de uma mistura de concreto com 100% de cimento Portland e reduzir o consumo de cimento em 37 a 200 kg de cimento por m³ de concreto, dependendo da concentração de substituição e do nível de resistência desejado.

Ainda nos estudos de Gastaldini *et al.* (2015), os valores de resistência a compressão das misturas de concreto com cinzas do lodo de ETA (CLETA) foram comparadas com misturas com cinza da casca de arroz (CCA) calcinadas sob condições controladas e sílica ativa (SA) (Tabela 2.6). As misturas foram preparadas com relações a/c idênticas, o mesmo tipo e marca de cimento Portland, agregados semelhantes e foram curados em uma câmara úmida por 3 e 7 dias e ensaiados em 28 dias. Os resultados apresentados na Tabela 2.6 indicam que para as misturas de concreto curadas em câmara úmida por 3 dias, aquelas com cinza de lodo ETA usualmente apresentaram maior resistência à compressão quando comparadas às amostras com cinza de casca de arroz e substituições de sílica nas mesmas concentrações.

Tabela 2.7 – Resistência a compressão de concreto com cinzas de lodo de ETA, cinzas de casca de arroz (CCA), e sílica ativa (SA). (GASTALDINI *et al.*, 2015)

Misturas	a/c	Resistência a compressão (MPa)			
		3 dias de cura		7 dias de cura	
REF	0,35	54	54,7	58	54,7
	0,5	37,3	40,7	40	40,7
	0,65	29,0	28,8	33,2	28,8
5CCA	0,35	56,0	56,5	60,2	56,5
	0,5	43,5	43,5	47,2	43,5
	0,65	34,5	34,5	36,0	34,5
10CCA	0,35	66,5	66,5	65,0	66,5
	0,50	44,0	44,0	42,0	44,0
	0,65	36,0	36,0	35,6	36,0
20CCA	0,35	69,0	69,0	72,0	69,0
	0,5	45,6	45,6	43,0	45,6
	0,65	32,5	32,3	32,0	32,3
30CCA	0,35	65,3	65,3	72,6	65,3
	0,50	46,3	46,3	49,2	46,3
	0,65	34,5	33,0	31,6	33,0
5SA	0,35	56,5	56,5	59,7	56,5
	0,50	43,5	43,5	50,0	43,5
	0,65	34,5	34,5	38,0	34,5
10SA	0,4	66,5	66,5	55,5	66,5
	0,5	44,0	44,0	48,2	44,5
	0,7	36,0	36,0	39,5	36,5

*Resultados em negrito – Valores de resistência a compressão de misturas com CLETA nas mesmas concentrações de substituições.

2.2 CIMENTO PORTLAND

O cimento Portland é um produto de uso consagrado na indústria da construção civil, sendo conhecido como um material finamente moído que possui minerais em sua constituição capazes de promover propriedades ligantes quando combinado com água. O Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), define o cimento Portland como um pó muito fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água.

Para Callister (2014) o cimento Portland é considerado um ligante hidráulico, o que significa que, quando misturado com a água, forma uma pasta que faz presa e endurece devido as reações e processos de hidratação tanto expostos ao ar quanto dentro de água, tendo ainda capacidade de manter a resistência ao longo do tempo nos dois ambientes. É empregado principalmente em argamassas e em concretos, para aglutinar, em uma massa contínua, agregados de partículas inertes (areia e/ou brita)

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) o cimento Portland constituído principalmente de silicatos de cálcio e para sua produção deve-se adequar as proporções de cálcio e sílica presentes nas matérias-primas. Normalmente, o cálcio advém do calcário e a sílica, da argila. Quartzo e/ou dolomita podem aparecer como impurezas da fonte de cálcio. A argila, por sua vez, contém, também, alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e álcalis, que facilitam na formação dos produtos da hidratação em temperaturas mais baixas. (MEHTA e MONTEIRO, 2008; TAYLOR, 1997).

O processo de fabricação do cimento consiste essencialmente na moagem da matéria-prima em proporções adequadas, que são depois cozidas em grandes fornos rotativos a uma temperatura de 1450 °C, onde uma parte do material é sintetizado e fundido no seu interior, tomando a forma de esferas com diâmetros da ordem de 10 a 30 milímetros, conhecidas como clínqueres. Após o resfriamento, uma determinada quantidade de gesso e outros minerais são adicionados e a mistura é moída mais uma vez, resultando no cimento Portland comercial (NEVILLE, 2013).

No forno ocorrem várias reações químicas, o carbonato de cálcio (CaCO_3) decompõe-se dando origem a óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2), cujas proporções em termos de massa são de aproximadamente 56% e 44%, respectivamente. Por sua vez, a argila decompõe-se numa mistura de sílica (dióxido de silício - SiO_2), alumina (óxido de alumínio - Al_2O_3) - e óxido de ferro (Fe_2O_3). Na reação de

descarbonatação do carbonato de cálcio, são necessário aproximadamente 400 kcal por quilograma de clínquer, o que corresponde aproximadamente metade da energia gasta para sua produção.

No entanto as matérias-primas devem ser dosadas de modo a garantir que, depois de terem perdido no forno a água e o dióxido de carbono, apresentem uma composição aproximada da indicada na Tabela 2.7, a qual é constituída fundamentalmente pelos quatro óxidos acima referidos.

Tabela 2.8 – Composição da matéria-prima do cimento Portland. (GOMES *et al.*, 2013)

Designação	Constituição química	Abreviatura	Quantidade (%)
Cal (óxido de cálcio)	CaO	C	60 - 69
Sílica (dióxido de silício)	SiO ₂	S	17 - 25
Alumina (óxido de alumínio)	Al ₂ O ₃	A	2 - 9,
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	F	0,5 - 6

2.2.1 Características Químicas do Cimento Portland

Em decorrência do seu processo de obtenção o cimento é um produto constituído por vários óxidos combinados, formando compostos complexos que apresentam a propriedade de se combinarem com água. As características químicas do clínquer depende da composição e finura da matéria-prima, da cozedura no forno e das condições de arrefecimento, as quais condicionam as propriedades do cimento portland, em particular as características de resistência (NEVILLE, 1997).

O aquecimento no forno provoca a descarbonatação do calcário e a desestruturação dos argilominerais, liberando os quatro elementos principais; Ca, Si, Al e Fe, que se recombina no interior do forno rotativo, sob pressão negativa e ambiente oxidante e alcalino, sintetizando os componentes formadores do clínquer Portland, alita, belita, C₃A e C₄AF, sendo estáveis nessas condições (CENTURIONE, MARINGOLO e PECCHIO, 2003).

A composição química do clínquer deve conter os seguintes óxidos: CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, raramente esses componentes são encontrados em uma única rocha em proporções adequadas. O aquecimento no forno provoca a descarbonatação do calcário e a desestruturação dos argilominerais, liberando os quatro elementos principais; Ca, Si, Al e Fe, que se recombina no interior do forno rotativo, sob pressão negativa e ambiente oxidante e alcalino, sintetizando os componentes formadores do clínquer Portland, alita, belita, C₃A e C₄AF, sendo estáveis nessas condições (BATALLHA, 2012).

Os quatro componentes considerados principais constituintes do cimento Portland são também denominados de minerais do clínquer. A denominação abreviada é utilizada pela química de cimento, na qual cada óxido é descrito por uma letra, sendo: $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$. (NEVILLE, 2013). Os limites adotados para os percentuais de cada componente são definidos dependendo do tipo de cimento que se deseja produzir, tendo como referência os teores apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.9 – Composto do cimento Portland. (NEVILLE; BOOKS, 2013)

Nome do Composto	Composição em óxidos	Nome do mineral	Abreviatura
Silicato tricálcico	3CaOSiO_2	Alita	C_3S
Silicato dicálcico	2CaOSiO_2	Belita	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	Aluminato	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ferrita	C_4AF

O silicato tricálcico (C_3S) e o silicato dicálcico (C_2S) são os compostos mais importantes na composição química do cimento, por serem eles os responsáveis pela resistência mecânica da pasta. O C_3S representa de 50% a 70% do clínquer em massa, é o maior responsável pela resistência em todas as idades especialmente até o fim do primeiro mês de cura. Já o C_2S representa de 10% a 30% do clínquer, tendo contribuição na resistência mecânica do cimento, acima dos 28 dias de cura. O aluminato tricálcico (C_3A) também contribui para a resistência, especialmente o primeiro dia. O ferro aluminato de cálcio (C_4AF) em nada contribui para a resistência (NEVILLE, 2013).

O aluminato de cálcio (C_3A) é o componente mais reativo do clínquer, o que hidrata mais rápido, é responsável pela pega do cimento e libera muito calor de hidratação. Já o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF), tem a função de equilibrar a composição química da pasta por apresentar boa estabilidade química (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A Figura 2.14 apresenta, de forma esquemática, a imagem de uma superfície polida de clínquer que pode ser obtida em microscópio óptico, com uma ampliação da ordem de 100 vezes, na qual é possível observar cristais de C_3S , de C_2S envolvidos por uma matriz de C_3A e de C_4AF criptocristalinos (estrutura constituída por cristais muito pequenos) que são dificilmente distinguidos num microscópio óptico. A figura permite verificar que cada uma das duas primeiras fases corresponde a uma solução sólida de minerais designando-se normalmente por alite, a solução de C_3S , e belite, a solução sólida de C_2S .

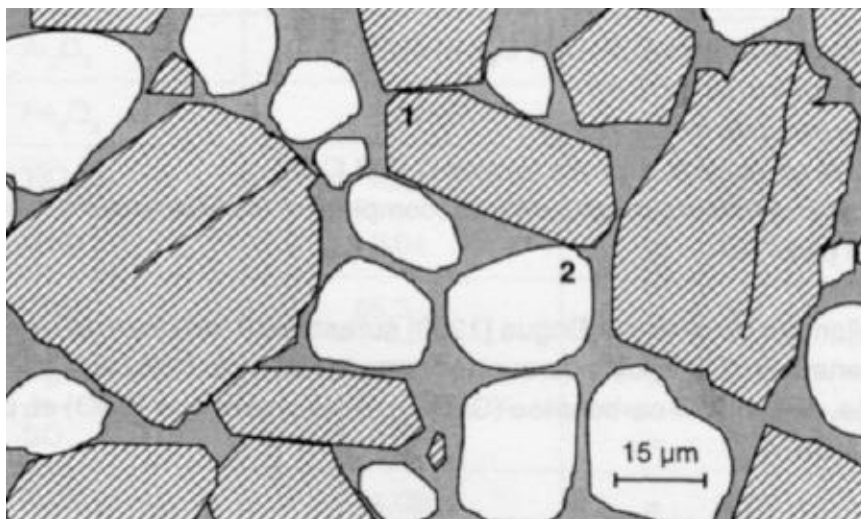


Figura 2.15 – Imagem esquemática da microestrutura da superfície de um clínquer polida. Pode-se observar cristais poliédricos alongados de C_3S (1) e cristais arredondados de C_2S (2) envolvidos por uma matriz de C_3A e de C_4AF . Adaptado de (GOMES *et al.*, 2013).

Além daqueles constituintes principais do cimento, ainda existem os compostos secundários que surgem em quantidades muito pequenas, como Na_2O , K_2O , SO_3 , MgO , TiO_2 , Mn_3O_4 e P_2O_5 . Os óxidos de sódio e de potássio (Na_2O e K_2O) são álcalis do cimento, podendo reagir com alguns agregados produzindo uma reação que causa a desintegração do concreto e influenciam a velocidade de aumento de resistência do cimento (NEVILLE, 2013).

2.2.2 Hidratação do Cimento Portland

A mistura de cimento, pó muito fino, com água forma uma pasta, cujo endurecimento resulta de reações químicas dos seus constituintes com a água, as quais formam um material sólido com resistência mecânica, a pasta de cimento hidratada. Em contato com a água, os silicatos e aluminatos que constituem o cimento reagem com a água, dando origem a novos compostos estáveis, que cristalizam sob a forma de agulhas que, emaranhando-se e ligando-se entre si, conferem resistência ao conjunto.

No processo de hidratação, os grãos de cimento, que de início se encontravam em suspensão, vão-se aglutinando uns aos outros em resultado da floculação, entretanto ocorrida, formando uma imbricada malha de cristais que vão promover a construção de um “esqueleto” sólido, responsável pela estabilidade estrutural da pasta (COUTINHO, 2012). Assim, com o decurso do processo, a pasta começa a perder a plasticidade endurecendo progressivamente e adquirindo as propriedades físicas, mecânicas e

químicas da pasta de cimento endurecida. O início das reações é caracterizado pelo aumento brusco da viscosidade e pela elevada temperatura (REN, 2017).

A hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S) inicia algumas horas após a hidratação do cimento e resultam na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um composto hidratado microcristalino, e o hidróxido de cálcio (CH) na forma cristalina (NEVILLE, 2016). Ambos os silicatos requerem aproximadamente a mesma quantidade de água para a hidratação, mas o C_3S produz mais do que o dobro da quantidade de $Ca(OH)_2$ formada na hidratação do C_2S . Nas equações 2.1 e 2.2 apresentam o resultado da reação entre a hidratação do silicato bicálcico (C_2S) e do silicato tricálcico (C_3S), que geram respectivamente, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH):



A propriedade adesiva da pasta de cimento hidratada deve-se, essencialmente, à formação do C-S-H, que representam cerca de 50 a 60% dos volumes de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratado. O hidróxido de cálcio constitui cerca de 20 a 25% da pasta hidratada e contribui pouco para a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada e pode ser responsável por problemas de durabilidade, ao ser, facilmente, lixiviado pela água. (METHA e MONTEIRO, 2006).

Quanto a hidratação dos aluminatos, a reação do C_3A com a água é imediata e provoca a liberação de grande quantidade de calor. A gipsita, adicionada ao clínquer com o propósito de retardar ou, pelo menos, inibir parcialmente as reações extremamente rápidas do C_3A , reage com este composto e forma o sulfoaluminato de cálcio, etringita, que produz uma camada de baixa permeabilidade na superfície do aluminato tricálcico e impede a rápida hidratação do composto. Em geral, a reatividade do C_4AF é mais lenta do que a do C_3A , porém cresce com o teor de alumina e diminuição da temperatura resultante da reação de hidratação, exercendo pouca influência na resistência mecânica da pasta (METHA e MONTEIRO, 2006).

A Figura 2.15 apresenta uma micrografia eletrônica de varredura da microestrutura de um cimento hidratado, apresentando o aspecto do C-S-H, do C-H, e da etringita. Dependendo da proporção de alumina e sulfatos na composição do cimento, a

etringita pode se tornar instável e decompor-se formando monosulfoaluminato de cálcio hidratado, que possui formas de placas hexagonais.

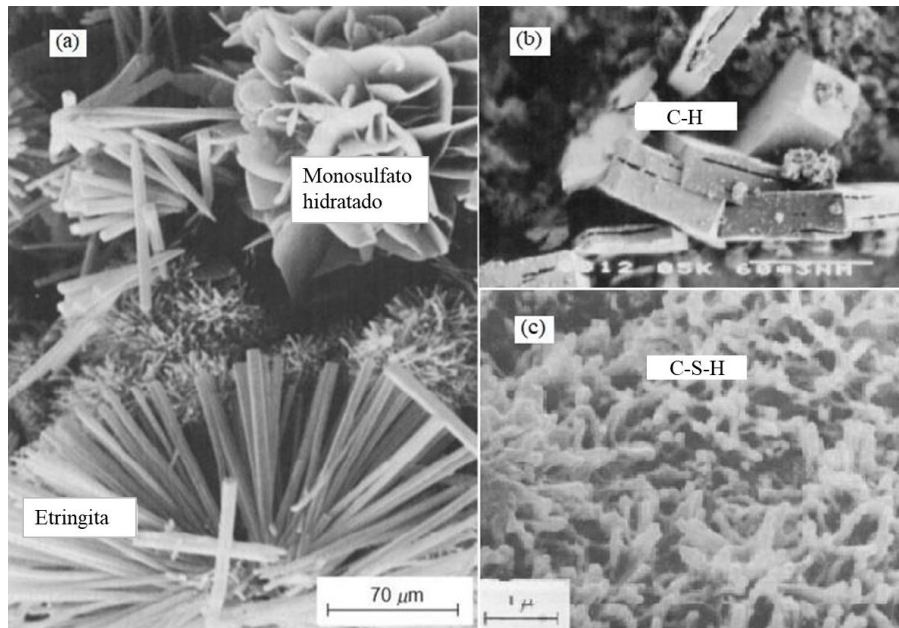


Figura 2.16 – Microestrutura do cimento hidratado (a) aspecto dos cristais de etringita e monossulfato hidratado; (b) Cristais de C-H; (c) Formação do C-S-H. Adaptado de (METHA e MONTEIRO 2006).

A hidratação do cimento é uma reação exotérmica e a taxa de liberação calor é um indicativo da velocidade de hidratação. De acordo com Picanço (2011) a hidratação do cimento pode ser compreendida por meio de transformações das fases anidras e metaestáveis do clínquer. No entanto, os campos de estabilidade envolvem temperaturas superiores a 1000 °C, acontecendo em todas as fases hidratadas nas condições ambientais. (RIBEIRO, 2013).

Para os cimentos Portland mais usados, aproximadamente metade do calor de hidratação é liberado entre o primeiro e o terceiro dia, três quartos em sete dias e cerca de 90% em seis meses. O calor de hidratação depende da composição química do cimento e pode ser comparada a soma dos calores de hidratação individuais de cada composto (NEVILLE, 2013).

2.2.3 Tipos de Cimento Portland

O cimento Portland comum é obtido pela moagem de clínquer, onde durante a operação é adicionado quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio (gesso). Durante a moagem é permitido adicionar a mistura materiais pozolânicos, escória granuladas de alto forno e outros materiais carbonáticos, nos teores especificados sendo possível obter variações do produto inicial (ABNT NBR 5732, 1991). A indústria brasileira de cimento tem disponibilizado para o mercado nacional diversos tipos de cimento Portland, que diferem, principalmente, com relação à sua composição por possuírem distintos tipos e quantidade de adições.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui normas específicas para cada tipo de cimento, as quais devem ser seguidas por todas as fábricas produtoras desse aglomerante no Brasil, uma vez que o cimento Portland para ser comercializado deve apresentar características e propriedades mínimas, tal como os ensaios empregados para verificar se os mesmos estão de acordo com as normas. O cimento Portland pode ser classificado por sua resistência: 25 MPa, 32 MPa ou 40 MPa, que representam as resistências mínimas a compressão, aos 28 dias de idade (período de cura). A tabela 2.9, abaixo apresenta classificação e a composição dos principais tipos de cimento de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 2.10 – Tipos de cimento Portland e composições.

Tipo	Sigla	Clinquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Comum	CP I	95 – 100		0 – 5	
	CP I-S	90 – 94	0	0	6 – 10
Composto	CP II-E	51– 94	6– 34	0	0 – 15
	CP II-Z	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
	CP II-F	75 – 89	0	0	11 – 25
Alto-Forno	CP III	25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Pozolânico	CP IV	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta resistência inicial	CP V	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland Branco	CPB	75 – 100	–	–	0 – 25
		50 – 74	–	–	26 – 50

No total somam-se onze tipos de cimentos comercializados no Brasil, todos os tipos são adequados para quaisquer estruturas e aplicações, no entanto existem alguns que são mais recomendáveis ou vantajosos para determinadas situações, dependendo de suas características. O Brasil ocupa a 4ª posição mundial em termos de produção de cimento Portland, com uma produção aproximada de 69 milhões de toneladas produzidas em 2014 e é também um importante mercado consumidor, tendo consumido 70,0 milhões de toneladas em 2014. Entre junho de 2013 e maio de 2014 registou-se um consumo de 70,7 milhões de toneladas, consistindo num aumento de 3,7% em relação a igual período do ano anterior (ABCP, 2014).

2.3 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, que são incorporados às argamassas ou aos concretos com a finalidade de obter características específicas visando melhorar. Estes são geralmente utilizados em grandes quantidades, com a finalidade de reduzir os custos e melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo até melhorar a sua resistência á fissuração térmica, a expansão alcali-agregado e ao ataque por sulfatos (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), os materiais utilizados como adições minerais são divididos em dois grupos:

a) Materiais naturais: são aqueles que normalmente seu processamento envolve, britagem, moagem e separação granulométrica, ou até mesmo são submetidos a ativação térmica, com a finalidade de produzir uma pozolana, como os vidros vulcânicos, tufos vulcânicos, argilas calcinadas e terras diatomáceas;

b) Materiais de subprodutos: são os subprodutos industriais que podem ou não ser submetidos ao processamento antes de serem usados como adição mineral, ou seja, o processamento de secagem e pulverização, como a cinza volante, escória de alto-forno, sílica ativa e cinza da casca de arroz.

Segundo Lima (2013) cada tipo de adição mineral atua de modo distinto, de acordo com a finura, atividade química, física ou ainda quantidade na mistura, tendo em vista que esses fatores proporcionam diferentes interações com a pasta. Alterações do tipo ou teor da adição mineral e da relação a/c influem na microestrutura dessas pastas e

resultam em comportamento mecânico e de durabilidade distintos. Em relação a ação físico-química, as adições minerais, se classificam como:

- Material pozolânico: materiais silicosos ou silico-aluminosos finamente divididos que, quando e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes;
- Material cimentante: não necessita de hidróxido de cálcio presente no cimento para formar produtos como o C-S-H. Logo, a sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material com fins estruturais. É representado pela escória granulada de alto forno;
- Fíler: material finamente dividido sem atividade química, com sua ação resumindo-se a efeito físico de empacotamento granulométrico e como pontos de nucleação para a hidratação do cimento.

Os aditivos minerais utilizados em matriz cimentícia normalmente melhora a coesão e a trabalhabilidade pela redução de tamanho e volume de vazios, redução do calor de hidratação pela metade do calor médio produzido pela hidratação do cimento Portland, aumento da resistência e da impermeabilidade devido ao refinamento dos poros, melhorias na durabilidade devido aos ataques químicos, tais como, soluções ácidas ou por sulfatos e a expansão pela reação álcali-agregado, como também a redução do aparecimento de fissuras por retração térmica e por secagem, devido a liberação de calor ser lenta (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O refinamento dos poros quando se faz uso das adições minerais pode ser observado no trabalho de Senhadji *et al.* (2014), sendo evidenciado que as argamassas de cimento Portland possuem porosidade total mais elevada que as argamassas com adições minerais. Também, foi verificado que a redução dos poros de maior volume é mais acentuada para a argamassa contendo adições minerais do que para a argamassa de referência, sendo esta redução mais significativa quando as adições apresentam pozolanicidade. Nos trabalhos de Krivenko *et al.* (2014), foi observado que a presença de metacaulim e cinza volante permite reduzir a expansão ocasionada pela reação álcali-agregado a graus admissíveis ou evitá-la completamente.

Dal Molin (2011) expõe que as adições minerais atualmente utilizadas são normalmente resíduos provenientes das mais variadas indústrias, que geralmente tem como destino o meio ambiente, resultando em grandes riscos de poluição. Suas incorporações aos produtos do cimento proporcionam redução nos custos de produção do cimento ao substituírem uma parcela do clínquer por materiais de menor custo energético.

Sob a perspectiva ambiental, as adições diminuem os impactos ambientais gerados na produção do clínquer Portland, ao reduzir as emissões de gases que provocam o efeito estufa na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO₂), e a exploração das jazidas naturais de calcário, além de contribuírem para a reciclagem de rejeitos industriais. De modo geral, as adições também proporcionam efeitos positivos no desempenho tecnológico do cimento, porém de variadas formas dependendo da classificação.

2.3.1 Adição Pozolânica

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), materiais pozolânico são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, sozinhos possuem pouca ou nenhuma propriedade ligante, mas que, quando finamente divididos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. A norma também apresenta uma classificação geral para os materiais pozolânicos condicionada à conformidade de exigências químicas e físicas, os quais são divididos em três classes distintas conforme a Tabela 2.10.

Tabela 2.11 – Classificação dos materiais Pozolânicos. (ABNT NBR 12653, 2015)

Classe	Materiais que obedecem aos requisitos
N	Pozolanas naturais e artificiais, materiais vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas.
C	Cinzas volantes provenientes da queima do carvão mineral.
E	Qualquer pozolana que difere das classes anteriores.

A divisão em três classes é baseada em características físicas e químicas pré-estabelecidas e que definem parâmetros mínimos dos materiais pozolânicos. São apresentadas na Tabela 2.11 as exigências químicas mínimas.

Tabela 2.12– Exigências Químicas. (ABNT NBR 12653, 2015)

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mínima	70	70	50
SO ₃ , % máxima	4	5	5
Teor de umidade, % máxima	3	3	3
Perda ao fogo, % máxima	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máxima	1,5	1,5	1,5

As exigências físicas para o material ser classificado como pozolânico estão apresentados na Tabela 2.12.

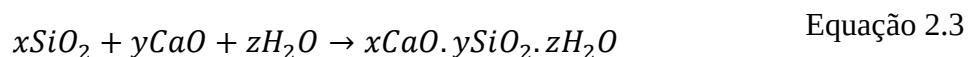
Tabela 2.13– Exigências Físicas. (ABNT NBR 12653, 2015)

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
Material retido na peneira de 45 µm	< 20	< 20	< 20
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90	≥ 90	≥ 90
Atividade pozolânica com cal aos sete dias (MPa)	≥ 6	≥ 6	≥ 6

Segundo Cordeiro (2006), conforme citado por Batallha (2012), pozolanas naturais são materiais vítreos e amorfos normalmente de origem vulcânica, eles contêm mais de 50% de sílica, além de alumina, óxido de ferro e cal, mas normalmente possuem mais de 10% de álcalis e dispensa qualquer tratamento para apresentar ou potencializar sua pozolanicidade, exceto a moagem, procedimento que aumenta a área de contato para as reações. Já, no caso das pozolanas artificiais, aquelas que necessitam de beneficiamento, os tratamentos a elevadas temperaturas influenciam na cristalização do material, pois durante o resfriamento as fases cristalinas são transformadas em amorfas, atribuindo reatividade ao material. Os materiais com estrutura desordenada (amorfa) são os que apresentam maior reatividade comparada aos de estrutura cristalina.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) os materiais pozolânicos são geralmente encontrados contaminados com minerais argilosos, sendo necessário ser ativado termicamente para elevar sua reatividade pozolânica. As argilas cauliníticas e os caulins quando submetidas a temperaturas entre 600 °C e 900 °C ocorre a remoção dos íons hidroxilas da sua estrutura cristalina, passando a formar um material amorfo com grande instabilidade termodinâmica, denominado metacaulinita (Al₂Si₂O₇), que é responsável pela atividade pozolânica, com formação predominante de C-S-H e C₄AH_x. Já em temperaturas acima de 900 °C, são formados compostos cristalinos, que não possuem capacidade aglomerante.

As pozolanas são, principalmente, constituídas por óxido de silício, óxido de alumínio, de ferro e de cálcio e anidrido sulfúrico. A reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são os maiores responsáveis pela melhoria das características técnicas no material cimentício. O principal produto dessa reação é o silicato de cálcio hidratado, mas também podem ser formados aluminatos e sílico-aluminatos, em função da composição química das pozolanas. Isoladamente as pozolanas não possuem capacidade aglomerante, elas necessitam de cálcio, sendo que algumas pozolanas possuem na sua composição química 25% de cálcio. De maneira simplificada Equação 2.2 apresenta o que ocorre durante uma reação pozolânica na matriz cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2008).



A sílica amorfa é o principal constituinte das pozolanas e para que as reações pozolânicas ocorram de maneira eficiente, as pozolanas devem conter teores elevados de sílica amorfa, pois a mesma possui uma estrutura molecular na qual suas ligações são instáveis e vulneráveis ao hidróxido de cálcio, permitindo a reação entre eles. O efeito químico obtido da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é denominado reação pozolânica e como aspectos principais apresenta: a reação é lenta, desta forma a liberação de calor e o desenvolvimento da resistência também são lentos. Os produtos das reações são muito eficientes em preencher os espaços capilares, melhorando o desempenho (resistência e impermeabilidade) do produto final (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.3.2 Filer

Segundo Neville (2015) fíler é um material finamente moído, com aproximadamente a mesma finura do cimento Portland que, em razão de suas propriedades físicas, expõe um efeito benéfico em algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, exsudação e tendência à fissuração. Geralmente são quimicamente inertes, no entanto, não é uma desvantagem caso eles possuam algumas características hidráulicas ou reajam de maneira não prejudicial com os produtos da pasta de cimento hidratada.

Os fílers podem ser materiais de origem natural ou obtidos a partir do processamento de minerais inorgânicos. Possuem propriedades que corrigem os finos da areia e melhoram a qualidade e durabilidade do concreto, quando presentes em pequenas

quantidades no mesmo (DAL MOLIN, 2005). O essencial é que eles possuem características uniformes, especialmente finura. Eles não devem aumentar a demanda de água quando utilizados no concreto, a menos que utilizados com um aditivo redutor de água, nem afetar negativamente a resistência do concreto ao intemperismo ou a proteção dada à armadura pelo concreto.

De acordo com Petrucci (1995), citado por Fonseca (2010, p.44) utiliza-se o fíler principalmente nos seguintes casos: espaçador de asfaltos fluidos; fabricação de mástiques betuminosos; preparação de argamassas betuminosas; preparação de concretos hidrocarbonatos; adição a cimentos; fabricação de borracha artificial; adição a concretos com consumos baixos de cimento para colmatar os vazios.

A maioria das adições minerais inclui alguma forma de sílica vítrea que pode compatibilizar com a cal na presença de água, à temperatura ambiente, para formar silicato de cálcio hidratado idêntico aquele formado pela hidratação do cimento. No entanto, conforme Aïtcin (2009), alguns fílers empregados como adição ao cimento não possuem essa propriedade, sendo utilizado com finalidade exclusivamente pela sua presença física, gerando assim um efeito microfíler, que é responsável por aumentar a densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio de partícula, deve ser semelhante ou menor que o do cimento (PILAR, 2012) e ainda atuando como pontos de nucleação para início da hidratação dos grãos de cimento (DAL MOILN, 2005). Como o fíler é mais brando do que o clínquer, é preciso moer bem o material composto por mais tempo, a fim de garantir a presença de uma parte de partículas com maior finura, que são necessárias para as resistências iniciais (NEVILLE, 2015).

Conforme NEVILLE (2015), embora as normas, como as brasileiras, estabeleçam percentuais de 0 a 10% de teor de fílers em relação à massa do cimento, a norma europeia BS EM 197-1: 2000 já admite o uso de até 35% de fíler calcário, desde que o restante do material cimentício seja apenas cimento Portland, e com este teor de adição o cimento passa ter o nome de Portland Calcário (classe II/B-L). Como o calcário moído adicionado é na realidade um fíler, pode-se dizer que já existem cimentos com teores de até 35%. NEVILLE (2015) acredita que para determinadas finalidades, num futuro próximo, se tornem populares cimentos com 15% a 20% de fílers.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia experimental, esquematizada na Figura 3.1 e 3.2, foi elaborada para facilitar a visualização e compreensão das etapas, ensaios e passos adotados na pesquisa, que está dividida em três etapas:

- A ETAPA 1: Refere-se à produção das cinzas do lodo da ETA. Primeiramente foi realizado o processo de coleta e secagem do lodo bruto. Em seguida, foi realizado um estudo das mudanças de fases e perda de massa do resíduo com o aumento da temperatura através da análise termogravimétrica (ATG e DTG) afim de verificar os efeitos da temperatura nas características do material, para posteriormente determinar a faixa de temperatura de calcinação para produção das cinzas do Lodo da ETA.
- A ETAPA 2: Consiste na caracterização dos materiais utilizados na produção das pastas e argamassas desta pesquisa. Foi realizada a caracterização das cinzas a fim de verificar suas propriedades químicas, físicas, mineralógicas e sua pozolanicidade, a partir de então, determinou-se a temperatura de calcinação mais adequada para sua utilização como substituto parcial do cimento Portland em argamassas.
- A ETAPA 3: A última etapa foi realizada a produção de argamassas, utilizando cinzas de LETA, substituindo parcialmente o cimento nas proporções de 6, 10 e 14%. Foi avaliado sua resistência a compressão axial, resistência a tração na flexão, absorção de água, índice de vazios e análise microscópica eletrônica de varredura (MEV). A partir da realização dos ensaios citados fez-se uma comparação do desempenho entre as argamassas controle (referência) e argamassas com cinzas de LETA.

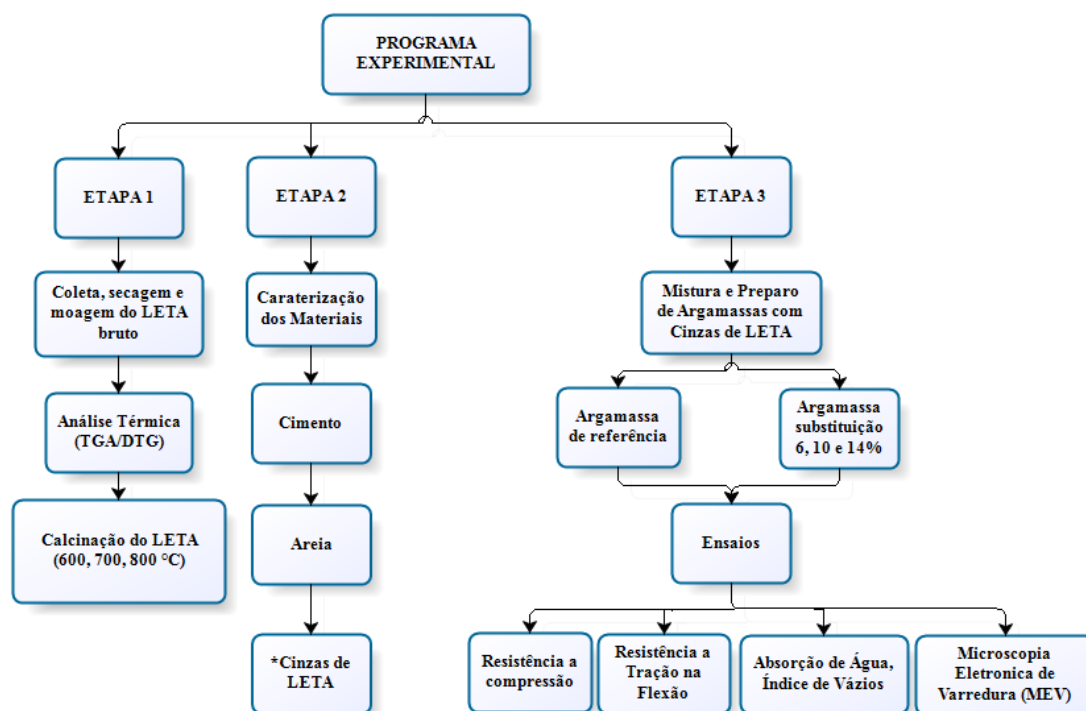


Figura 3.1– Fluxograma do planejamento da pesquisa.

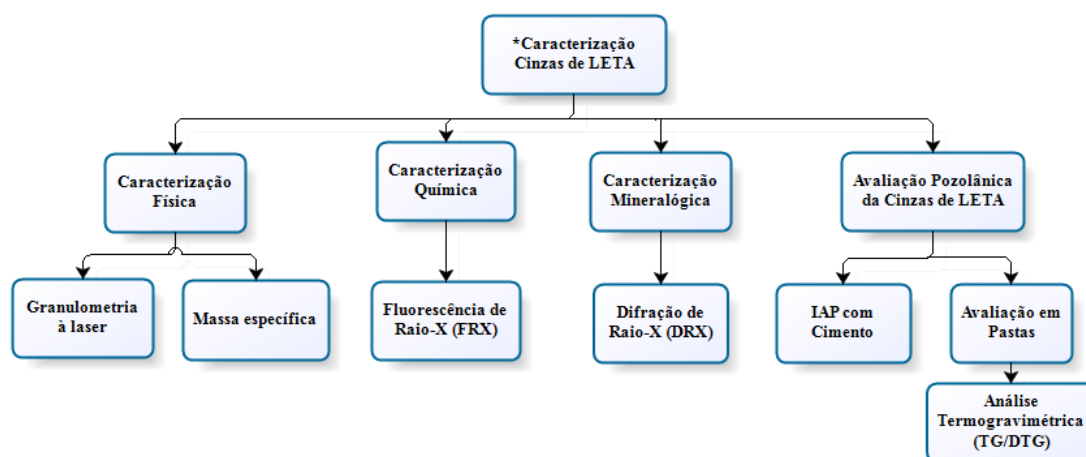


Figura 3.2 – Fluxograma da caracterização das cinzas de LETA.

3.2 ETAPA 1: PRODUÇÃO DAS CINZAS DE LETA

3.2.1 Coleta, secagem e moagem do LETA bruto

O lodo utilizado nesta pesquisa foi proveniente de coleta realizada no dia de limpeza dos decantadores da ETA Bolonha, localizada na cidade de Belém, estado do Pará. O processo de limpeza dos decantadores do lodo da ETA Bolonha é realizado a cada 30 dias e para a coleta do lodo foi implantado no local uma unidade de desaguamento de lodo (UDL), próximo ao tanque dos decantadores, que teve como base o estudo de Silva

(2016). Na Figura 3.3 é apresentada uma vista panorâmica dos decantadores da ETA Bolonha.



Figura 3.3– Vista panorâmica dos decantadores da ETA Bolonha. (GOOGLE EARTH, 2019)

A coleta do lodo foi realizada no mês de dezembro de 2018 e iniciada antes do processo de limpeza dos decantadores para que não fossem contaminadas as amostras. A retirada do material foi realizada de forma manual utilizando uma escada de madeira, que proporcionou a descida do operador até o ponto de coleta no fundo do decantador. Com auxílio de um balde plástico, que foi içado através de corda, o operador lançou o lodo na UDL. A Figura 3.4 mostra o processo de coleta do lodo no fundo do decantador da ETA Bolonha.



Figura 3.4 – Processo de coleta do lodo (a) ponto içamento do lodo; (b) UDL com lodo úmido; (c) raspagem do material e transporte até o ponto de içamento.

Do volume de lodo gerado pela ETA Bolonha, coletou-se uma amostra segundo as prescrições da NBR 10007 (ABNT, 2004), que trata da amostragem de resíduos sólidos. Aproximadamente 1000 L (Figura 3.4c) de lodos foram retiradas dos decantadores da ETA Bolonha, com permissão do diretor da COSANPA e encaminhadas para o Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram armazenadas em recipientes plásticos, para serem utilizadas neste estudo.

Ao chegar no LEC da UFPA, o lodo foi acondicionado em bandejas de plásticos com capacidade para 25 litros e expostos ao sol para a sedimentação dos sólidos e retirada da água em excesso existente por um período de 48 h (Figura 3.5).



Figura 3.5 – LETA Bolonha exposto ao sol.

Devido ao alto teor de umidade ainda existente após a exposição ao sol, as amostras foram colocadas em bandejas de alumínio e levadas à estufa em temperatura de 105 ± 5 °C para a obtenção da constância de massa (lodo seco). A Figura 3.6 mostra o lodo em processo de secagem na estufa e seco.

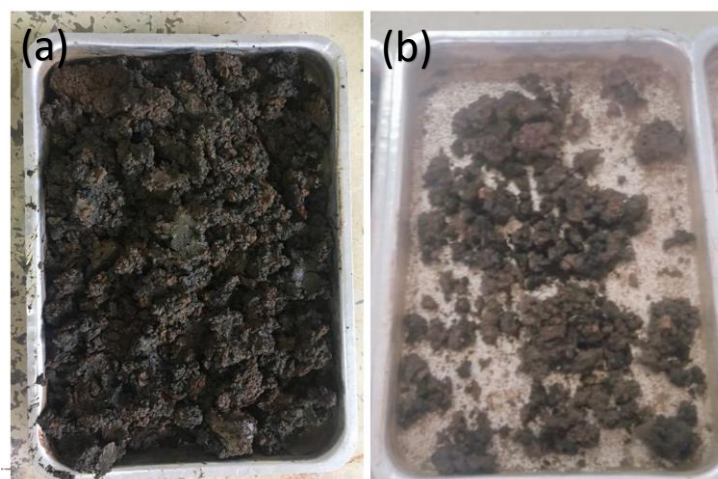


Figura 3.6 – (a) Lodo da ETA bruto; (b) Lodo da ETA após a secagem á 105 °C em estufa.

Como após secagem da lama, formaram-se torrões (Figura 3.6), os mesmos precisaram passar por um processo de destorroamento, através da moagem do material por 2h. Esse processo é largamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de um material, pois a granulometria é um fator importante para aumentar a superfície específica exposta a temperatura de calcinação. O equipamento usado foi dois moinhos rotativo de porcelana da marca EMIC, 12 rpm, com capacidade para 5 litros, e bolas de porcelana. A realização do processo de moagem foi executada com base na aplicação feita por Pouey (2006), onde foram empregadas a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg do material a ser moído. A quantidade de bolas foi dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, visto que as bolas menores possuem maior potencial de moagem. A figura 3.7 mostra o processo de moagem do LETA realizado no Laboratório Experimental de Materiais de Construção (LEMAC) da UFPA.



Figura 3.7– Processo de moagem do resíduo.

As cinzas do lodo de ETA também foram submetidas ao processo de moagem após a calcinação por um período de 6h (MENDONÇA, 2018). Em seguida para caracterização das cinzas, as amostras passaram por processo de peneiramento em peneiras de malha 0,075 mm, para se obter uma granulometria igual ou inferior à granulometria do cimento utilizado na pesquisa.

3.2.2 Análise Térmica

A análise térmica do lodo in natura (ATG/DTG/DTA) foi realizada no laboratório PCT Guamá da UFPA no equipamento Mettler Star SW 9.30 em cadinho aberto de platina com uma taxa de aquecimento do forno de 10 °C/min, em intervalo de temperatura entre 40 °C e 1000 °C.

O comportamento térmico (ATD/ATG/DTG) do resíduo de ETA é mostrado na Figura 3.8. Conforme observado nesta figura a amostra do LETA apresenta uma perda de massa total de 31,23%. Esta perda ocorre em 3 etapas. Na primeira etapa ($T < 100\text{ °C}$), ocorre uma perda de 6,84 %, a qual pode estar relacionada com a liberação de umidade livre adsorvida na superfície das partículas do argilomineral caulinita (PINHEIRO et al., 2014). Na segunda etapa (entre 260 e 363 °C), tem-se a maior perda de massa na ordem de 16,9%. Esta perda de massa pode estar relacionada com os seguintes fatores: i) liberação das moléculas de água devido a decomposição de hidróxidos tais como a gibbsita e a goetita, ii) combustão de matéria orgânica e, iii) perda de água quimicamente ligada devido a presença de sulfatos, como por exemplo, o sulfato de alumínio. Na terceira

etapa (entre 446 e 512 °C), pode ser observado uma perda de massa de 6,67 %, a qual pode estar relacionada, principalmente, com a desidroxilação do argilomineral caulinita levando a formação de metacaulinita (Frias et al., 2013).

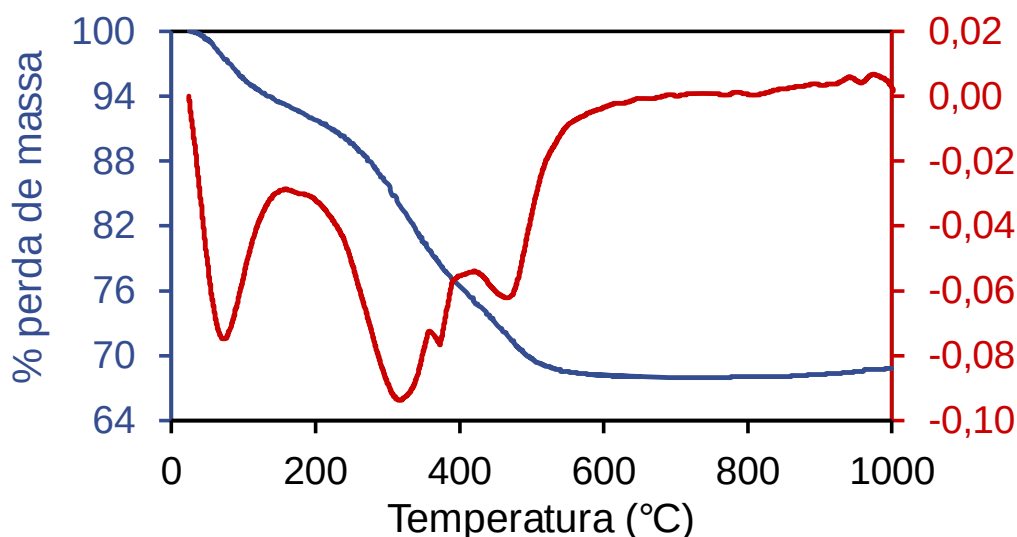


Figura 3.8– Análise térmica (TGA/DTG/DTA) do lodo da ETA Bolonha.

Tomando como base os resultados da análise térmica do Lodo ETA Bolonha, bem como informações obtidas na literatura (FRIAS et al., 2014; HAIDER et al., 2014; TEXEIRA et al., 2015; HAGEMANN et al., 2019) acerca das temperaturas usualmente empregadas na calcinação desse tipo de resíduo, optou-se pela utilização das temperaturas de 600, 700 e 800 °C para a produção e caracterização das cinzas de LETA afim de ser usada como adição mineral no cimento Portland. O material resultante do processo de calcinação foi denominado de cinzas do lodo de Estação de tratamento de água (CLETA) e identificado conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1– Identificação das cinzas geradas no processo de calcinação. Autor

Identificação da amostra	Descrição do material
CLETA600	Cinzas do Lodo de ETA obtidas à 600 °C
CLETA700	Cinzas do Lodo de ETA obtidas à 700 °C
CLETA800	Cinzas do Lodo de ETA obtidas à 800 °C

3.2.3 Calcinação do lodo da ETA (quanto de lodo foi calcinado?)

A calcinação do lodo da ETA foi realizada no laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, em um forno Mufla com 3720W de potência e 220V de voltagem. A taxa de aquecimento do forno foi de 10 °C/min, com residência de 2 horas para cada temperatura de calcinação (600, 700 e 800 °C). Foram utilizados dois cadinhos cerâmicos para que o material fosse depositado no interior da mufla, evitando que houvesse contaminação. O resfriamento foi lento, realizado dentro da própria mufla, a qual foi aberta após 24 horas de seu desligamento. A Figura 23, mostra lodo seco a 105 °C (LETA in natura) e as cinzas do LETA obtidas no processo de calcinação nas temperaturas de 600, 700 e 800 °C.



Figura 3.9 – Aspecto Físico do LETA Bolonha in natura e ativado termicamente a 600 (CLETA600), 700 (CLETA700) e 800 °C (CLETA800).

3.3 ETAPA 2: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.3.1 Cimento

Nesta pesquisa utilizou-se dois tipos distintos de cimento. Para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) das CLETAs com o cimento Portland aos 28 dias foi utilizado o cimento Portland composto com fíler, CP II-F, com classe de resistência 32, conforme prescrito pela NBR 5752 (ABNT, 2014). No entanto nas outras matrizes cimentícias avaliadas, foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, por ser dentre os cimentos disponíveis na região, o mais puro, ou seja, o que apresenta com maior quantidade de clínquer possibilitando a realização de análises mais precisas quanto ao comportamento das CLETAs utilizadas em substituição parcial ao

cimento Portland. As massas específicas dos dois cimentos foram determinadas conforme o ensaio prescrito na NBR 16605 (ABNT, 2017) e estão dispostas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Massa específicas dos cimentos utilizados na pesquisa.

Cimento	Massa Específica (g/cm³)
CP II-F-32	3,08
CP V - ARI	2,99

3.3.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo que será utilizado é de origem quartzosa proveniente de jazidas do município de Ourém/PA. O agregado passará por um processo de secagem prévio em estufa, para que sua umidade possa interferir na relação água/cimento das argamassas. Para efeito de caracterização foi determinado a sua composição granulométrica NBR NM 248 (ABNT, 2003), massa unitária (NBR NM 45, 2006) massa específica de acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009).

Tabela 3.3 – Caracterização do agregado miúdo.

Agregado Miúdo (Areia)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
4,75	0,71	0,1	0	ABNT NBR NM 248 (2003)
2,36	6,67	1,3	1	
1,18	0,15	0,0	1	
0,6	107,37	21,5	23	
0,3	275,03	55,1	78	
0,15	59,51	11,9	89	
Fundo	49,36	9,9	100	
	498,8	100		
Massa Específica		2,70 g/cm³	ABNT NBR NM 52 (2009)	
Massa Unitária		1,54 g/cm³	ABNT NBR NM 45 (2006)	
Módulo de Finura		1,92	ABNT NBR NM 248 (2003)	
Dimensão Máxima		4,75 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)	

A curva granulométrica com os respectivos limites superiores e inferiores utilizáveis e limites superiores e inferiores ótimos do agregado miúdo estão apresentados na Figura 3.10. A areia utilizada na pesquisa se enquadra na zona utilizável inferior, caracterizando-se como um material bastante fino. De modo geral, agregados mais finos tendem a demandar uma maior quantidade de água para que a argamassa produzida apresente consistência adequada para a moldagem.

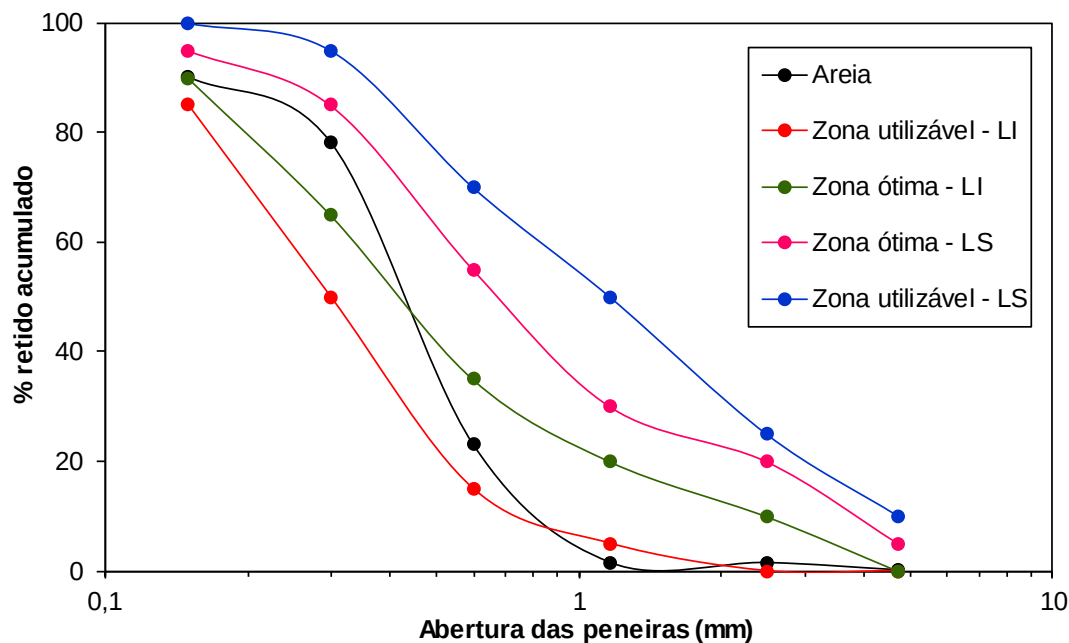


Figura 3.10 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites das zonas ótima e utilizável, segundo a NBR NM 7211 (ABNT, 2009).

3.3.3 Aditivo

Para a melhoria da trabalhabilidade das misturas produzidas, será utilizado um o superplastificante com composição básica de solução de policarboxilato em meio aquoso, densidade de $1,08 \pm 0,02$ kg/ litro, pH de $5,0 \pm 1,0$ e com dosagem recomendada pelo fabricante de 0,30 a 2% sobre a massa do aglomerante (cimento Portland).

3.3.4 Água

A água utilizada nesta pesquisa será proveniente da Universidade Federal do Pará (Campus Belém), que atualmente produz sua própria água.

3.3.5 Cinzas de LETA

As cinzas de LETA utilizadas para a produção das argamassas provêm da calcinação do lodo da ETA Bolonha nas temperaturas de 600, 700 e 800 °C.

3.3.5.1 Caracterização Física

As características físicas avaliadas nas cinzas de LETA (600, 700 e 800 °C) foram distribuição granulométrica e massa específica (NBR NM 23,2001).

A caracterização da composição granulométrica, que tem por objetivo determinar a curva granulométrica e definir o diâmetro médio das partículas das cinzas lodo estudado, será executada através do ensaio de Granulometria à Laser. Este método utiliza um

analisador de partículas a laser modelo Analysette 22 Micro Tec Plus da marca Fritsch GmbH, com intervalo de medida de 0,08 a 2000 µm, para gerar as curvas granulométricas das cinzas. Essa análise foi realizada no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações (LAMIGA) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

A massa específica foi determinada de acordo com a norma NBR 16605 (ABNT, 2017), que estabelece o método para a determinação da massa específica do cimento Portland e outros materiais em pó partir do frasco volumétrico de Le Chatelier. Este ensaio foi realizado no LEMAC do laboratório de engenharia civil da UFPA. A massa específica das cinzas de LETA foi calculada a partir da Equação 3.1 abaixo.

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

ρ = massa específica do material ensaiado, em g/cm³;

m = massa do material ensaiado, em g;

V = volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$), em cm³.

3.3.5.2 Caracterização Química

O ensaio de Fluorescência de Raio X, (FRX) foi realizado no laboratório de análise química de Rochas do Instituto de Geociência da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. As análises das amostras serão obtidas por Espectrometria de Fluorescência de Raios X, utilizando espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca PANalytical, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. Na preparação será utilizada a pastilha prensada com 5 g de amostra e 1,5 g de aglomerante (cera de parafina), em sequência a mistura será prensada com uma carga de 20 toneladas. As aquisições e tratamento dos dados serão realizados por meio do software SuperQ Manager da PANalytical.

3.3.5.3 Caracterização Mineralógica

A caracterização mineralógica foi obtida através do ensaio de Difração de Raios X (DRX), pelo método do pó, realizado no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará. Este ensaio permite a determinação da composição mineralógica dos sólidos cristalinos existentes e será executado com o propósito de se identificar as fases, amorfa ou cristalina, dos minerais que constituem as cinzas do LETA, indicando, caso haja

predominância da forma cristalina, baixa atividade e caso apresente-se amorfo, maior potencial pozolânico.

Os materiais com fases cristalinas se caracterizam por apresentarem em seus difratogramas formas com intensa quantidade de picos, enquanto que os materiais com fases amorfas se caracterizam por apresentarem curvas com formas abauladas e ausência de picos. Portanto, um material cristalino é aquele em que os átomos estão situados em um arranjo que se repete, ou periódico, ao longo de grandes distâncias atômicas (CALLISTER, 2014).

3.3.5.4 Avaliação da Atividade Pozolânica

Atividade pozolânica das cinzas de LETA foram avaliadas pelo método indireto de índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento Portland de acordo com a norma brasileira a NBR 5752 (ABNT 2014). E para ampliar a análise acerca da pozolanicidade das cinzas, foi realizado uma análise termogravimétrica (TG/ATG) em pastas como técnicas analíticas complementares na avaliação da atividade pozolânica das cinzas produzidas.

3.3.5.5 Análise Termogravimétrica em pastas de cimento Portland/CLETAs

Para que seja possível entender o efeito das CLETAs na hidratação do cimento Portland, foram produzidas pastas para avaliação do consumo de cal por atividade pozolânica. A quantidade de material em massa para cada pasta foi estabelecida pela norma NBR 5752 (ABNT 2014), ou seja, considerou-se uma substituição de 25% em massa do cimento Portland por CLETAs calcinadas na temperatura de 600, 700 e 800 °C.

A moldagem das pastas manteve a relação água/ligantes (cimento + CLETA) constante em 0,48 o que resulta em pastas com diferentes consistências no estado fresco, porém sem interferência significativa na análise termogravimétrica. A determinação da relação água/ligantes foi baseada na quantidade mínima de água para que as pastas de cimento contendo CLETAs pudessem ser misturadas adequadamente. Após a mistura, as pastas foram moldadas em recipientes de 25 mL e levados a cura até a data dos ensaios.

Na data das análises, as amostras moídas em almofariz de porcelana com pistilo e o pó resultante foi passado na peneira com abertura de 0,075 mm, em seguida foram acondicionadas em tubos m tubos tipo Eppendorf (2 mL) e destinadas aos ensaios.

As pastas produzidas foram submetidas à análise termogravimétrica (TG/DTG) aos 28 dias de cura. O ensaio foi realizado no Laboratório de Óleos da Amazônia PCT-

Guamá em um equipamento da marca TA Instruments, modelo 2960 SDT, utilizando o nitrogênio grau analítico (100 mL/minuto) como purga dos gases volatilizados. A taxa de aquecimento foi de 10 °C/minuto entre 35 °C e 1.000 °C, em cadinho de alumina sem tampa. A massa média de amostra foi de 10 mg.

A análise termogravimétrica foi empregada com o objetivo de estimar o percentual de teor portlandita a partir do desprendimento da água adsorvida na transformação de Ca(OH)_2 em CaO , referente ao segundo pico da DTG, na faixa II. O teor de hidróxido de cálcio (CH%) foi calculado a partir da equação 3.2, na qual M_0 e M_f referem-se à massa inicial e final, em porcentagem, na respectiva faixa de temperatura, M_{CH} e M_{H} às massas molares do hidróxido de cálcio e da água, respectivamente (RODIER et al., 2017).

$$\%CH = M_0 - M_f \cdot \left(\frac{M_{\text{CH}}}{M_{\text{H}}} \right) \quad \text{Equação 3.2}$$

3.3.5.5.1 Índice de atividade pozolânica com cimento Portland (NBR 5752)

Esse método avalia o índice de desempenho com o cimento Portland a partir do ensaio de compressão simples em argamassas. A determinação do IAP com cimento Portland requer, para fins de comparação, que a argamassa pozolânica a ser avaliada tenha 25% em massa do cimento substituído por adição mineral. A quantidade de material em massa para cada argamassa foi estabelecida pela norma NBR 5752 (ABNT 2014) e Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Consumo de materiais das argamassas para avaliação da atividade pozolanicidade das CLETA.

Argamassa	CPII-F-32 (g)	CLETA 600(g)	CLETA 700(g)	CLETA 800(g)	Areia(g)	Água(g)
IAP:REF	624,00	—	—	—	1872,00	374,40
IAP:CLETA600	468,00	156,00	—	—	1872,00	374,40
IAP:CLETA700	468,00	—	156,00	—	1872,00	374,40
IAP:CLETA800	468,00	—	—	156,00	1872,00	374,40

Durante as misturas utilizou-se aditivo superplastificante para que as argamassas apresentassem um índice de consistência pré-estabelecido na norma supracitada de 225 ± 5 mm. Após o ensaio de abatimento, foram moldados quatro corpos prova cilíndricos de 50 x 100 mm para argamassa de referência e quatro para cada argamassa com

substituição. O índice de atividade pozolânica com o cimento Portland do cimento foi calculado como a razão entre a resistência à compressão da argamassa “f_{cB}” aos 28 dias de cura dividida pela resistência à compressão da argamassa “f_{cA}” (referência) na mesma idade, conforme a equação 3.2. Para que o material ensaiado seja considerado pozolânico, esse índice deve ser maior ou igual a 90%, de acordo os requisitos físicos da NBR12653 (ABNT, 2014).

$$IAP_{cimento} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

IAP_{cimento} = índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, onde o resultado é expresso em porcentagem (%);

f_{cB} = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento Portland CP II F-32 e substituição de 25% de material pozolânico (argamassa B);

f_{cA} = resistência à compressão média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados somente com cimento Portland CP II F-32 como material cimentício (argamassa A).

3.4 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CLETA

3.4.1 Desenvolvimento das argamassas

Na última etapa foi avaliado os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por cinzas de lodo da ETA nas propriedades das argamassas. Foi preparado uma argamassa referência (REF) de relação cimento/areia igual a 1:3 e a relação água/cimento 0,5, sem substituição do cimento Portland e argamassas substituindo em massa o cimento Portland por cinzas de LETA nas proporções de 6% (CLETA6), 10% (CLETA10) e 14% (CLETA14). Esses percentuais de substituição são baseados no cimento tipo CP II-Z, conforme a norma NBR 16697 (ABNT, 2018) que estabelece um percentual de 6 a 14% de teor de pozolana em relação a massa do cimento. Para manter a consistência de 220±20mm para todas as argamassas, sem alterar a relação água/ (cimento + CLETA), foi adicionado aditivo superplastificante caso necessário.

Após a mistura das argamassas e determinação dos índices de consistência, foram moldados 4 corpos de prova para cada ensaio e teor de substituição. Corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm foram utilizados para os ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade e absorção total, enquanto os corpos de prova prismáticos com dimensões de 140 x 40 x 160 mm foram utilizados para o ensaio de resistência a tração na flexão. Para as análises microestrutural por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), foram retiradas pequenas amostras dos corpos de prova já ensaiados. A Tabela 3.5 apresenta o resumo dos corpos de provas a serem confeccionados.

Tabela 3.5 – Quantidade de corpos de prova do Programa experimental.

Quantidade de Corpos de Provas do Programa Experimental					
Amostras	(%) de Subst.	Compressão Axial		Tração na Flexão	Absorção de Água e Índice de Vazio
		28 dias	63 dias		
AREF	0%	4	4	4	4
A06CLETA	6%	4	4	4	4
A10CLETA	10%	4	4	4	4
A14CLETA	14%	4	4	4	4
TOTAL PARCIAL		16	16	16	16
TOTAL					64

A Tabela 3.6 apresenta os consumos de materiais relativos aos traços de argamassas de referência (AREF), e argamassas com substituição do cimento Portland por de CLETA. Para o cálculo da quantidade de CLETAs foram usadas as massas específicas do cimento (3,12 g/cm³) e das cinzas (2,70 g/cm³). Devido o cimento Portland e a CLETA ter massas específicas diferentes a quantidade de resíduo foi determinada para obtenção do mesmo volume de cimento subtraído, mantendo a relação volumétrica entre pasta e agregado.

Tabela 3.6 – Consumo de Materiais em Kg/m³ para todas as argamassas.

Argamassas	Cimento	CLETA	Areia	Água
AREF	511,33	–	1533,98	255,66
A06CLETA	480,65	27,80	1533,98	255,66
A10CLETA	460,19	46,33	1533,98	255,66
A14CLETA	439,14	64,87	1533,98	255,66

As argamassas foram produzidas no LEMAC/UFPA, onde foi utilizado um misturador mecânico (argamassadeira) de duas velocidades e movimento planetário, com capacidade para 5 litros. Para a mistura e moldagem das argamassas foi seguido as recomendações na norma NBR 7215 (ABNT,1997).

3.4.2 Propriedade das argamassas no estado endurecido

3.4.2.1 Resistência a Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no LEC/UFPA conforme as recomendações das normas NBR 7215 (ABNT, 1996) com ruptura dos corpos de prova nas idades de 28 e 63 dias. Para este ensaio foi usado uma prensa hidráulica universal da marca EMIC onde cada corpo de prova foi posicionado na máquina de forma centralizada em relação ao eixo de carregamento. A resistência à compressão de cada corpo de prova foi calculada a partir da divisão da carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova.

3.4.2.2 Resistência a Tração na Flexão

Os ensaios de resistência à tração a Tração na flexão, assim como a moldagem e cura dos corpos de prova foram realizados conforme a norma técnica NBR 13279 (ABNT, 2005). O ensaio foi executado em uma prensa, da marca EMIC, com velocidade de carregamento de 50 N/s. No ensaio, foi aplicado um carregamento na parte central do corpo de prova, biapoiado sobre suportes de aço em forma de roletes distantes entre si de $100 \pm 0,5$ mm para reduzir as tensões de tração, A resistência à tração na flexão foi calculada de acordo com a Equação 3.3.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot L}{40^3} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

R_f = resistência à tração na flexão (MPa);

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N);

L = distância entre os suportes (mm).

3.4.2.3 Absorção de Água e Índice de Vazios

O ensaio de absorção total de água foi realizado de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Para se obter a massa no estado seco, as amostras foram mantidas em estufa a 105°C (± 5) por 72 horas. Em seguida, foi determinado a massa na condição

saturada dos corpos de prova, onde ao ser retirada da estufa, os mesmos serão imersos em água a 23°C (± 2) por um período de 72 horas. A absorção de água por imersão (A_i) de cada corpo-de-prova (A_i), em porcentagem, foi determinada pela equação 3.5.

$$A_i = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

m_{sat} = massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

m_s = massa da amostra seca (g).

Para se obter o índice de vazios (I_v), após a determinação da massa saturada, os corpos de prova foram colocados em um recipiente cheio de água, que foi progressivamente levada à ebulição, por um período de 5 horas, com volume aproximadamente constante. Após a fervura, a água foi resfriada lentamente até a temperatura de 23°C (± 2). Os CPs foram pesados na condição saturada superfície seca e posteriormente, foram pesados na balança hidrostática com precisão de 0,1g. O índice de vazios pode ser obtido através da Equação 3.6

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

m_i = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

3.4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura das Argamassas (MEV)

A caracterização microestrutural das argamassas foi realizada no laboratório de Metalurgia do IFPA a partir da análise em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo VEJA 3 LMU da marca TESCAN. Essa técnica permite a observação da textura do material, sua morfologia, distribuição dos compostos e o aspecto geral da amostra em escala micrométrica auxiliando na explicação do comportamento mecânico e interpretação dos resultados. Além disso permite identificar e analisar os poros dentro da pasta e a interação da pasta com o agregado.

Para investigação das argamassas por MEV foram retirados fragmentos dos corpos de prova oriundos do ensaio de resistência à compressão, na idade de 28 dias da argamassa de referência e das argamassas com teores de substituição parcial do cimento por CLETA (6%, 10% e 14%).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS DO LODO DA ETA

4.1.1 Caracterização Física

Os resultados das massas específicas do LETA in natura e das CLETAS ativadas termicamente, obtidos pela média de dois ensaios consecutivos estão dispostos da Tabela 4.1. Para as amostras ensaiadas observou-se que com o aumento da temperatura de calcinação ocorreu o aumento da massa específica, comportamento semelhante ao analisado por Mendonça (2018) para cinzas de bambu.

Tabela 4.1– Massa específica do LETA in natura e das CLETAs ativadas termicamente.

Amostras	Medida	m (g)	V ₁ (cm ³)	V ₂ (cm ³)	ρ (g/cm ³)	$\rho_{\text{médio}}$ (g/cm ³)
In natura	1°	38,58	18,60	0,40	2,12	2,12
	2°	38,60	18,40	0,30	2,12	
CLETA600	1°	48,38	18,10	0,20	2,70	2,70
	2°	48,42	18,20	0,30	2,71	
CLETA700	1°	48,31	18,00	0,70	2,79	2,79
	2°	48,50	18,20	0,80	2,78	
CLETA800	1°	49,41	18,00	0,60	2,84	2,84
	2°	49,50	18,10	0,70	2,84	

As curvas granulométricas, obtidas a partir da análise por granulometria à laser, do cimento Portland e das cinzas CLETA600, CLETA700 e CCB800 podem ser visualizadas nas Figuras 4.1. As curvas das CLETAs foram obtidas para um tempo de moagem de 6h.

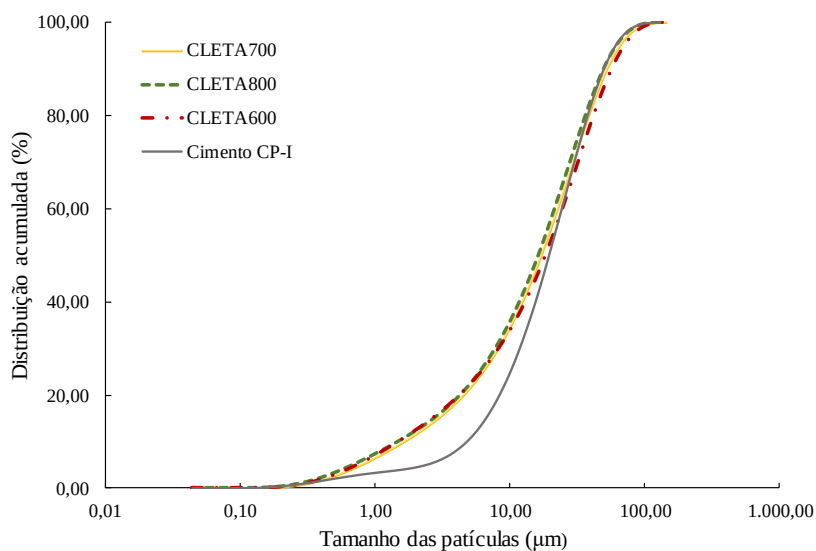


Figura 4.1– Curvas granulométricas do Cimento CP-I e das Cinzas do lodo da ETA Bolonha calcinadas a 600, 700 e 800 °C.

Verifica-se na Figura 4.1, que todas as amostras de CLETAS apresentaram curva granulométrica contínua. Uma curva granulométrica contínua indica que os grãos estão bem graduados, a descontínua, por sua vez, indica a ausência de grãos com diâmetros intermediários, ou seja, há grãos bastante pequenos e outros, com diâmetros bem maiores. Fazendo um paralelo com o comportamento dos agregados, quando estes apresentam curvas granulométricas contínuas, eles tendem a preencher e densificar mais efetivamente as misturas do que os agregados com curvas descontínuas.

Afim de avaliar quantitativamente o tamanho dos grãos, foi determinado o diâmetro médio (d50) das CLETAs e do cimento CP-I. Verifica-se na Tabela 4.2 que todas as amostras de CLETAs apresentaram diâmetro médio menor que o cimento CP-I. Além disso, pode-se observar que com o processo de calcinação houve uma diminuição do tamanho médio dos grãos das CLETAs.

Tabela 4.2– Determinação do diâmetro médio (d50) do Cimento CP-I e das CLETAs após 6h de moagem.

Cimento CP (μm)	CLETA600 (μm)	CLETA700 (μm)	CLETA800 (μm)
20,6	19,2	18,1	17,1

Segundo a NBR 12653 (2014), para que um material seja considerado pozolânico, 80% dele deve possuir granulometria inferior a 45 μm . Portanto, todas as amostras de CLETAs estudadas nessa pesquisa se adequam a norma supracitada, já que possui diâmetros médios menores do que 20 μm .

4.1.2 Caracterização Química

A composição química elementar do resíduo do lodo da ETA in natura e ativado termicamente nas temperaturas de 600, 700 e 800 °C estão apresentados na Tabela 4.3. Os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo da ETA Bolonha são discutidos na sequência.

Tabela 4.3 – Composição química dos principais óxidos presente no Lodo in natura e ativado termicamente.

Amostras	Óxidos principais (%)										Perda ao Fogo
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	
LETA in natura	27,90	24,7	13,5	0,6	0,10	0,60	0,30	0,10	0,90	0,60	29,90
CLETA 600°C	39,96	30,97	17,89	0,82	0,10	1,52	0,51	0,29	1,09	0,81	6,00
CLETA 700°C	42,80	31,31	17,82	0,86	0,10	1,49	0,48	0,27	1,17	0,80	2,99
CLETA 800°C	43,76	31,37	17,73	0,87	0,10	1,58	0,75	0,31	1,18	0,83	1,43

A perda ao fogo das amostras analisadas deve-se principalmente à presença de águas intersticiais, hidroxilas dos argilominerais e dos hidróxidos existentes. No entanto, verificou-se que a perda ao fogo do lodo in natura é da ordem de 29,90%, enquanto que as cinzas de lodo de ETA calcinadas nas temperaturas de 600, 700 e 800 °C são respectivamente 6,04%, 2,99%, 1,43%. Isso ocorre devido a volatilização de componentes da matéria orgânica presente na amostra de lodo in natura, o que não se verifica nas amostras de lodo ativadas termicamente.

A somatória dos óxidos SiO₂ (27,9%), Al₂O₃ (24,7%) e Fe₂O₃ (13,5%) na matriz do lodo in natura correspondeu a cerca de 66,1% dos componentes químicos totais, estes valores estão próximos ao encontrado por Ramirez (2015), que em sua primeira coleta obteve para os mesmos óxidos 65%. O autor afirma que estas concentrações, principalmente de SiO₂ e Al₂O₃ são esperadas devido à própria composição do material sedimentado no tratamento de água e do coagulante utilizado no processo de tratamento, que reflete diretamente na composição majoritária de Al.

Através da caracterização química infere-se que o lodo in natura não pode ser classificado como adição mineral pozolânica, uma vez que a somatória de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ e a perda ao fogo não atendem as exigências químicas da NBR 12653 (ABNT, 2014). A amostra não atendeu a somatória para classes N e C que solicita o mínimo de 70%, no entanto atendeu a somatória dos óxidos para a classe E de 50%, porém a perda ao fogo foi superior a exigida na norma que é de 10% para classe N e 6% para classes C e E. Já as amostras de CLETAs ativadas termicamente a 600, 700 e 800 °C por 2h, alcançaram somatória dos óxidos supracitados respectivamente 88,82%, 91,93%, 92,82

%, com perda ao fogo menor ou igual a 6%, ultrapassando exigências químicas mínima para serem classificados como material pozolânico.

Os resultados da composição química das cinzas do lodo da ETA Bolonha são diferentes dos cinzas dos lodos de ETA do estado de Rio Grande do Sul estudados por Gastaldini et al. (2015), e cinzas dos lodos de ETA de Caracas, estudadas por Frias et al (2014), onde pode-se observar que os principais teores de óxido de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 mostraram-se inferiores aos publicados no presente estudo.

4.1.3 Caracterização Mineralógica

Os difratogramas de raios X do LETA in natura e das CLETAS ativadas termicamente a partir do processo de calcinação nas temperaturas de 600, 700 e 800 °C por 2h são mostrados na figura 4.2.

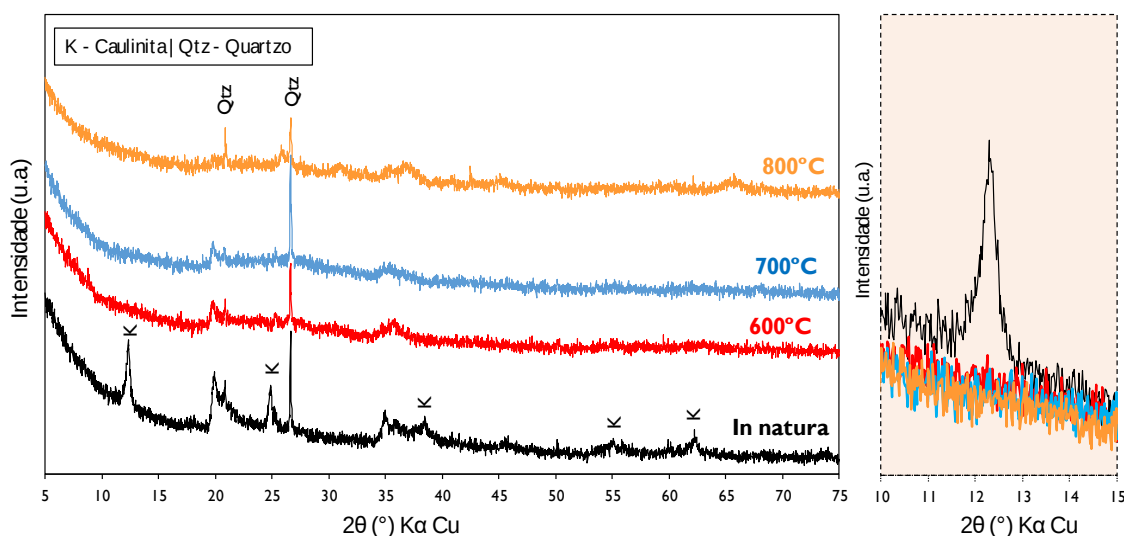


Figura 4.2 – Difratogramas do LETA in natura e das CLETAS ativadas termicamente a 600, 700 e 800 °C.

A partir da análise dos resultados dos DRX na Figura 4.2, pode-se observar que o LETA in natura contém picos de difração característicos das seguintes fases cristalinas: caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e quartzo (SiO_2). Além disso com o processo de calcinação do LETA conforme mostrado na figura supracitada resultou na manutenção dos picos relacionados ao quartzo e quebra dos picos característicos da caulinita, que deixa de existir devido a sua transformação em metacaulinita, no estado amorfo. A calcinação entre 600 e 800°C não há nenhuma mudança perceptível, ou seja, permanecem os minerais encontrados à 600°C. Esses resultados são semelhantes ao de Frias et al (2013) e Hagemann et. al (2019), que ao calcinar e caracterizar amostras de um LETA da

Venezuela observaram que a caulinita desapareceu após a ativação térmica a 600 °C devido à transformação da caulinita em Metacaulinita, produto altamente pozolânico.

4.1.4 Avaliação da atividade pozolânica

4.1.4.1 Análise Termogravimétrica em pastas de cimento Portland/CLETAs

A análise termogravimétrica (TG/DTG) das pastas similares às contidas nas argamassas utilizadas no ensaio de IAP com cimento Portland, conforme metodologia da norma NBR 5.752, aos 28 dias, permite quantificar o teor de compostos hidratados formados, o teor de portlandita remanescente na matriz hidratada e, também, o teor de carbonato de cálcio. Resultados da análise termogravimétrica da amostra da pasta de referência e das pastas produzidas com CLETAS ativadas a 600, 700 e 800°C podem ser visualizados nas Figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 respectivamente.

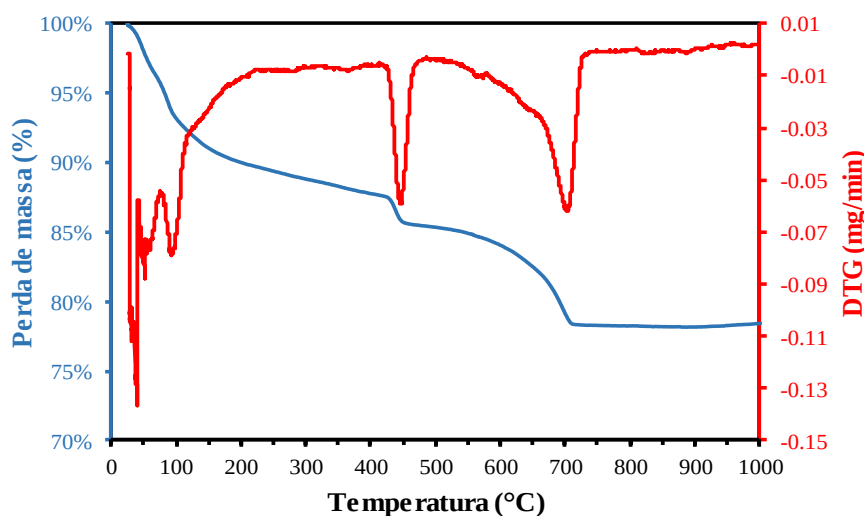


Figura 4.3 – TG/DTG da pasta de referência.

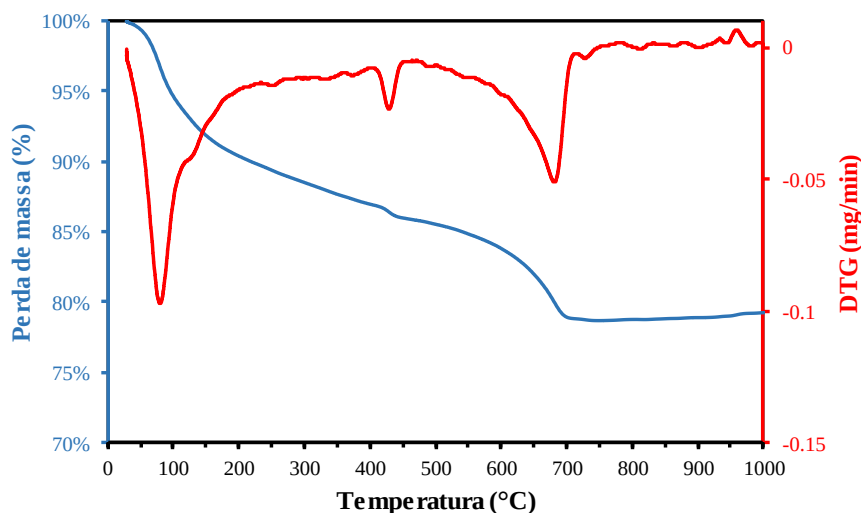


Figura 4.4 – TG/DTG da pasta com CLETA600.

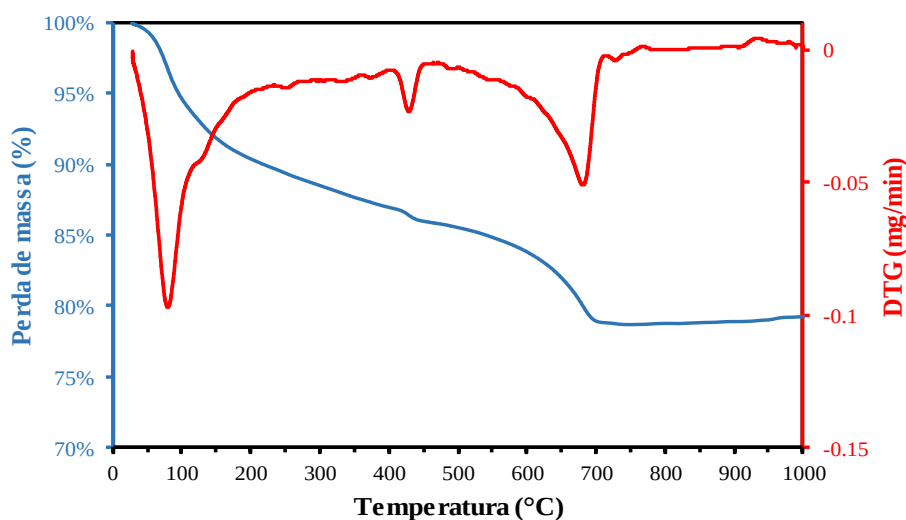


Figura 4.5 – TG/DTG da pasta com CLETA700

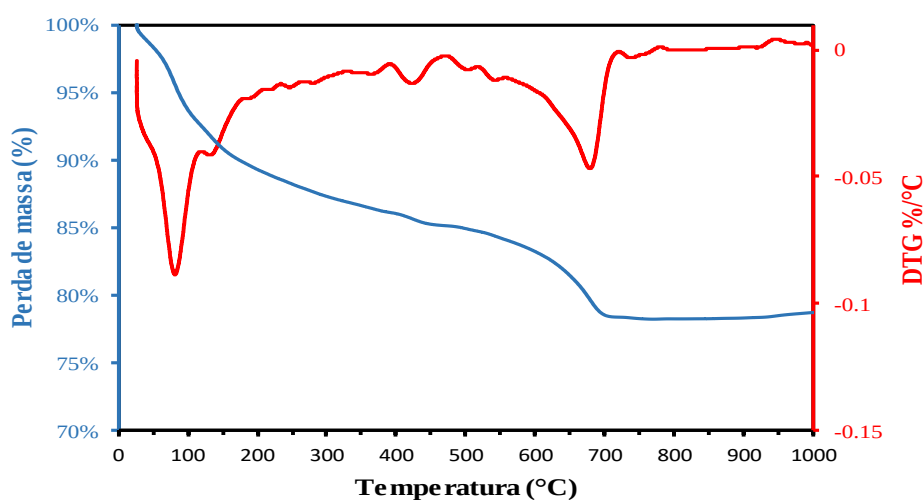


Figura 4.6 TG/DTG da pasta com CLETA800

Através da análise das curvas obtidas foi possível descrever a degradação térmica de todas as amostras basicamente em três faixas de temperaturas com estágios mais acentuados. Verificou-se que na faixa I de temperatura (35° a 385°) em todas as amostras, a presença de picos de perda de massa na DTG, está relacionado à perda de massa por água evaporável e por liberação da água interlamelar das fases hidratadas (etringita, C-S-H e/ou C-A-H.). Na faixa II ((385° a 485°), observa-se a presença de um pico bem definido em todas as DTG, com uma acentuada perda de massa e está associada à desidratação do hidróxido de cálcio. A terceira e acentuada perda de massa, que ocorreu na faixa III, em torno de 680 °C, refere-se à decomposição do carbonato de cálcio em dióxido de carbono e óxido de cálcio. Para que essas variações fossem quantificadas, determinou-se a perda de massa, em percentual, de cada faixa de temperatura para todas as amostras (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Perda de massa das pastas por faixa de temperatura

Amostras	Faixa I	Faixa II	Faixa III
CPV-ARI	11,33%	4,07%	6,60%
CLETA600	13,05%	1,15%	6,51%
CLETA700	13,07%	1,07%	6,62%
CLETA800	13,85%	0,99%	6,45%

Os resultados da Tabela 4.4 mostram que a adição CLETAs nas pastas em substituição ao cimento Portland provocou um aumento na perda de massa na faixa I, indicando uma maior quantidade de água evaporável e ligada aos compostos hidratados. Na faixa II de temperatura, o efeito foi inverso, a adição de CLETAs provocou uma menor perda de massa referente à decomposição do hidróxido de cálcio. Na faixa III, em decorrência da decomposição das fases carbonáticas, as amostras com CLETAs, apresentam perdas de massa próximas a de referência.

A importância do hidróxido de cálcio na reação pozolânica está no seu papel de ativador dessa reação, sendo maior o seu consumo quanto mais reativa for a pozolana. A partir dos resultados fornecidos pelo ensaio termogravimétrico, aplicou-se a equação 3.2 para determinar o teor de hidróxido de cálcio livre presente na pasta de referência e nas que tiveram substituição parcial do cimento Portland pelas CLETAs em estudo. A Figura 4.7 apresenta o teor hidróxido de cálcio presente nas pastas a partir da perda de massa na Faixa II de temperatura.

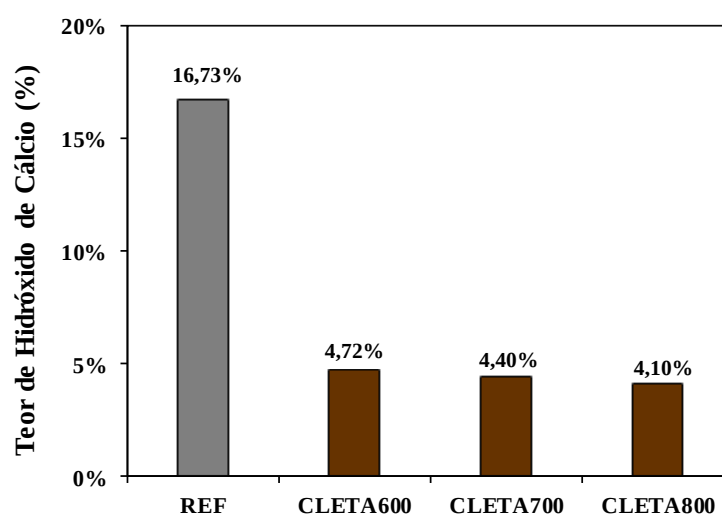


Figura 4.7 – Teor de hidróxido de cálcio presente nas amostras, aos 28 dias, determinadas a partir do ensaio de termogravimetria.

A partir dos resultados obtidos na Figura 4.7, verifica-se que a diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio nas pastas foi bastante expressiva nas amostras com

CLETAs em relação à amostra de referência, com destaque para amostra com CLETAs ativadas termicamente a 800°C, que dentre todas, apresentou a menor quantidade de hidróxido de cálcio. Esses resultados confirmam o que foi visto na análise mineralógica das pastas, a qual demonstrou uma diminuição de intensidade do pico da portlandita nas pastas que continham CLETA em relação à pasta de referência.

4.1.4.2 Determinação do índice de atividade pozolânica com cimento Portland.

Os resultados de resistência das argamassas de referências e das argamassas com 25% de substituição em massa do cimento Portland por CLETAs ativadas nas temperaturas de 600, 700 e 800 °C estão dispostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resistência das argamassas para o ensaio de IAP com cimento Portland.

Argamassa	Amostras	Resistência à compressão individual	Desvio relativo máximo	Resistência à compressão média
IAP-REF	REF-01	25,22	-1,22	25,53
	REF-02	25,72	0,73	
	REF-03	24,71	-3,22	
	REF-04	26,48	3,71	
IAP-CLETA600	600-01	23,20	-4,16	24,21
	600-02	19,92	-17,71	
	600-03	25,72	6,25	
	600-04	27,99	15,63	
IAP-CLETA700	700-01	22,44	-8,72	24,59
	700-02	22,19	-9,74	
	700-03	27,99	13,85	
	700-04	25,72	4,62	
IAP-CLETA800	800-01	27,74	11,10	24,97
	800-02	24,97	0,01	
	800-03	22,95	-8,08	
	800-04	24,21	-3,03	

Os resultados da Tabela 4.5 mostram que todas as argamassas com CLETAs ativadas com 25% de substituição do cimento Portland apresentaram resistência à compressão em 28 dias bem próximo aos valores encontrados para a mistura de referência - cimento Portland com 0% de substituição. Os índices de desempenho com o cimento

Portland (IAP) aos 28 dias para as argamassas com CLETAs podem ser visualizados na Figura 4.8. Para que esse material seja considerado pozolânico, a norma NBR12653 (ABNT, 2014) estabelece que as argamassas com substituição apresentem um IAP $\geq 90\%$.

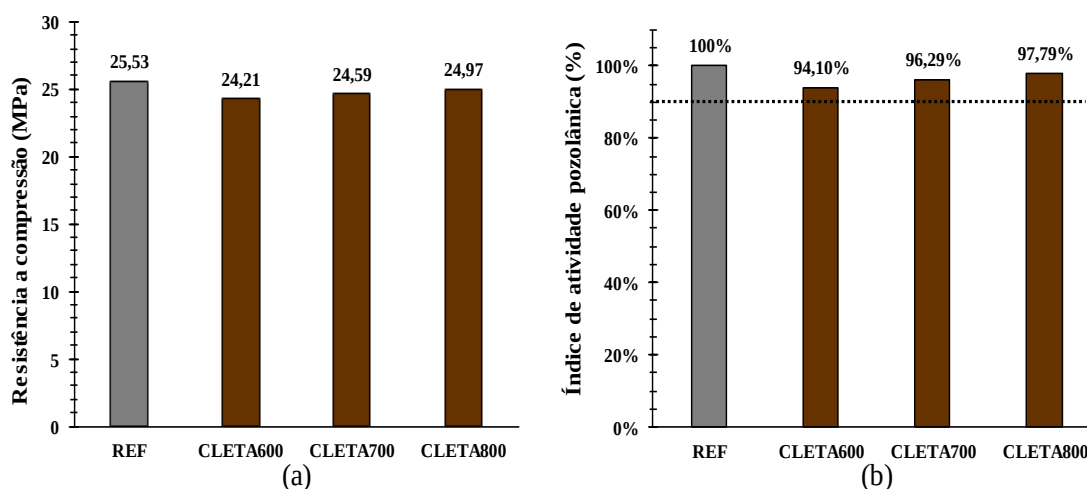


Figura 4.8 – (a) Resistência a compressão; (b) Índice de desempenho com o cimento Portland.

Observa-se na Figura 4.8 que todas as CLETAs avaliadas nesta pesquisa alcançaram índice superior ao que estabelece a norma supracitada, com destaque para a cinza do lodo ETA calcinada em temperatura de 800 °C que apresentou o maior índice com 97,79%. Isso ocorre por que a metacaulinita presente nas cinzas no estado amorfo fica mais reativa com o aumento da temperatura de calcinação e consequentemente influencia diretamente no índice de atividade pozolânica das argamassas avaliadas. (Ambroise, 1992)

Embora o melhor índice de atividade pozolânica tenha sido o da amostra com cinzas de lodo de ETA calcinadas a 800 °C (24,97 MPa), esse valor foi muito próximo ao da amostra calcinada a 600 °C (24,21 MPa - apenas 3,04% menor). Um aumento na força de apenas 3,04% não compensa a energia necessária para atingir uma temperatura de 800 °C. Portanto, a temperatura de 600 °C por 2h foi adotada para avaliação em argamassa.

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR CLETA

Os dados das argamassas foram analisados quanto a sua normalidade e sua homocedasticidade utilizando-se os testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Atestando sua normalidade e a homocedasticidade, estes foram comparados utilizando-se testes paramétrico através da análise de variância de uma via (ANOVA) e teste de Tukey, pois havia mais de duas condições independentes. Caso os dados não apresentassem uma distribuição homogênea, estes foram comparados utilizando-se análise de variância de Kruskal-Wallis. Os dados estão apresentados como média $\pm$ desvio padrão (dp), sendo considerado diferenças significativas quando $P < 0,05$.

4.2.1 Resistência à Compressão

A Figura 4.9 apresenta o resultado do ensaio de resistência à compressão simples realizado em amostras de argamassas de referência (AREF) e com substituição do cimento Portland por CLETAs calcinadas a 600°C por 2h nas proporções de 6% (A6CL), 10% (A10CL) e 14% (A14CL), nas idades 28 e 63 dias.

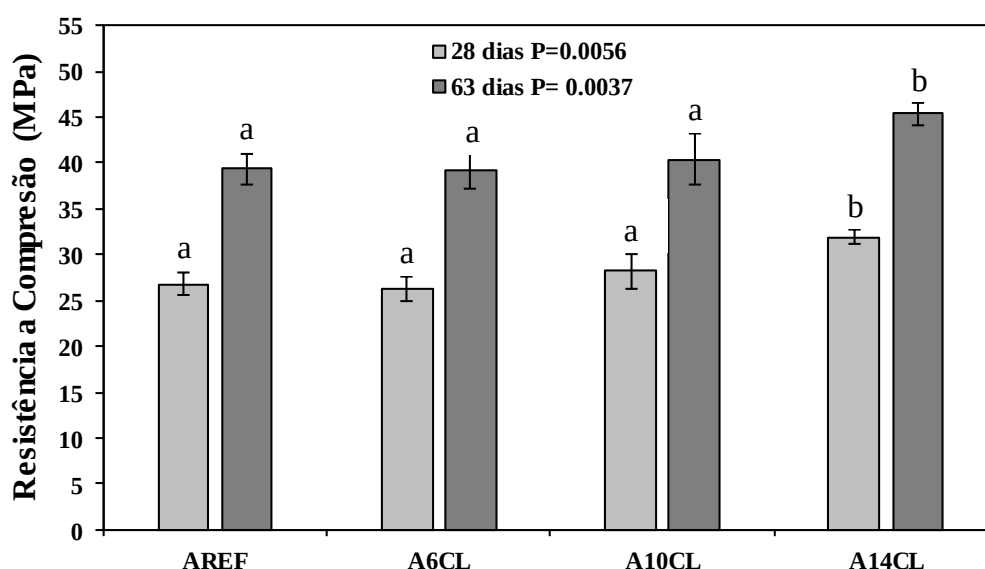


Figura 4.9 – Resistência à compressão simples nas idades de 28 e 63 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. ($n=4$, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)

A partir dos resultados observados na figura 4.9, verifica-se que de modo geral, ocorreu o aumento da resistência à compressão para todas as argamassas aos 63 dias de idade. Além disso a substituição parcial do cimento Portland por CLETA ativada a 600°C

resultou em um acréscimo na resistência à compressão das argamassas, podendo ser associado ao resultado da reação pozolânica que pode ter ocorrido com o acréscimo das cinzas, devido a mesma ser responsável pelo consumo do hidróxido de cálcio (Figura 4.7) e produção de compostos mais resistentes, como o C-S-H.

Através da análise estatística dos resultados, verificou-se que embora todas as argamassas com cinzas de lodo apresentassem maior resistência mecânica do que as argamassas de referência, apenas a argamassa A14CL apresentou diferença significativa de comportamento em relação às demais amostras, tanto para os ensaios nas idades de 28 dias quanto para 63 dias. A argamassa A14CL foi a que apresentou maior resultado, 31,76 Mpa e 45,38 MPa respectivamente nas idades de 28 e 63 dias enquanto as argamassas de referência foi a que apresentou menor resultado, 27,56 Mpa e 39,38 Mpa. Ou seja, ocorreu um acréscimo de, aproximadamente 13,5% na resistência à compressão da argamassa com 14% de substituição do cimento por cinza de lodo de ETA, em relação à argamassa de referência.

Batalha (2012), ao estudar sobre a produção de argamassa de cimento Portland com a utilização da cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Manaus em substituição parcial ao cimento Portland nas proporções de 5%, 10 e 15% em massa, verificou que ao 28 dias de cura, as resistências à compressão das argamassas com teor de 5% e 15% de cinza substituindo o cimento apresentaram resultados estatisticamente iguais em comparação à argamassa de referência, o que assemelha-se com este estudo com exceção da proporção de 14% de substituição que obteve estatisticamente desempenho melhor do que todas as outras amostras.

El-Didamony *et al.* (2014) investigaram a substituição de uma escória granulada de alto forno por lodo de ETA nas proporções de 5%, 10% e 15% em peso para a fabricação de cimento Portland composto. Os resultados mostraram que a portlandita livre aumentou nos primeiros 7 dias de cura e depois diminuiu aos 90 dias. Em um outro estudo recente e similar a este trabalho, Ahmad *et al.* (2018) avaliaram a viabilidade da substituição parcial do cimento Portland por um lodo à base de Alumínio dos leitos de filtração de retrolavagem, calcinados a 800 °C para incorporação em argamassa. Com relação às atividades pozolânicas do lodo, os resultados mostraram que, além dos materiais pozolânicos tradicionais, o lodo calcinado reagiu com Ca(OH)_2 e gerou quantidades significativas de produtos hidratados, podendo, portanto, ser classificado como pozolana artificial. Os resultados mostraram que as substituições de até

20% poderiam atender ao padrão indiano para a pasta feita pelo cimento Portland pozzolana

A literatura explica que as cinzas do lodo ativado possuem características pozolânicas capaz de produzir um efeito químico nas misturas com cimento Portland, ao reagirem com o hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento, na presença de água e produzirem compostos hidratados mais resistentes. As análises mineralógicas e termogravimétricas realizadas nessa pesquisa no item 4.1.4.2 e 4.1.4.3 evidenciaram uma diminuição na concentração de hidróxido de cálcio.

4.2.2 Resistência à Tração na Flexão

O gráfico da Figura 4.10 expõe a média dos resultados da resistência à tração na flexão, aos 28 dias, para amostras de argamassas com e sem cinza de lodo de ETA, e as barras de erro indicam $\pm$ o desvio padrão.

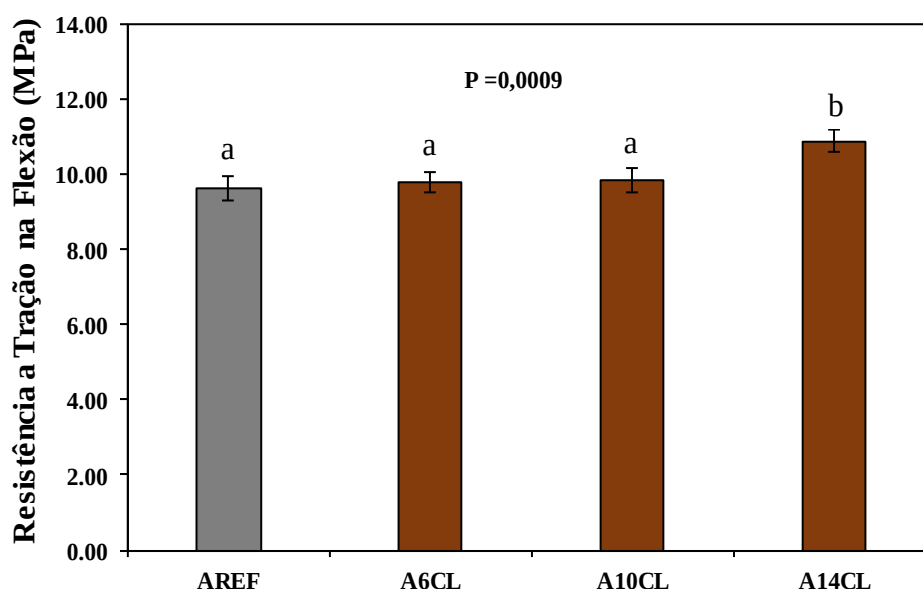


Figura 4.10 – Resistência à Tração na Flexão na idade de 28 dias. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)

O comportamento das argamassas nos ensaios de resistência à tração na flexão se apresentou de maneira semelhante ao comportamento constatado nos ensaios de resistência à compressão, conforme pode ser verificado na Figura 4.9. Todas as argamassas com CLETA apresentaram resistência mecânica maior do que a argamassa de referência, no entanto pela análise estatística apenas a argamassa A14CL, ou seja, a

argamassa com 14% de substituição do cimento Portland por cinza, apresentou uma diferença significativa de valores em relação as demais.

De acordo com o gráfico da Figura 4.10 a argamassa de referência (AREF) obteve média de 9,62 MPa para o rompimento em 28 dias de idade, enquanto que a argamassa com 14% (A14CL) de incorporação do resíduo calcinado obteve média de 10,90 MPa, corroborando um aumento de aproximadamente 12% na resistência à tração na flexão de argamassas com CLETA ativada, o que garante, para esta propriedade avaliada, que a matriz hidratada do compósito sofreu melhor densificação da rede porosa mediante a produção de compostos hidratados, o que favoreceu desempenho mecânico superior a argamassa ausente da adição.

Dahhou *et al.* (2018) investigaram a substituição parcial do cimento Portland por várias quantidades de cinza de lodo de ETA em amostras de argamassa com dimensões de 40x40x160 mm. Eles observaram que a adição de 5% CLETA no cimento Portland não afetou a mineralogia do produto final. No entanto com base nos ensaios de resistência a compressão e a tração na flexão aos 28 dias, as argamassas com 5% de substituição de lodo foram classificadas como pertencentes à classe 32,5 R, de acordo com o Padrão Marroquino.

4.2.3 Absorção de Água e Índice de Vazios

Os resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios realizados aos 28 dias de idade podem serem visualizados na Figura 4.11. A substituição parcial do cimento Portland por CLETA surtiu efeito na absorção de água total e, da mesma forma, para o índice de vazios. Os resultados do ensaio de absorção de água demonstraram coerência quando comparado ao índice de vazios das mesmas argamassas.

Entre a argamassa de referência (AREF) e as argamassas com 6% e 10% de cinza de lodo de ETA (A6CL e A10CL) não houve diferenças significativas tanto para a absorção quanto para o índice de vazios, mas quando comparados com a argamassa com 14% de substituição, verificou-se que a absorção e o índice de vazios diminuíram em 1,26% e 2,66% respectivamente.

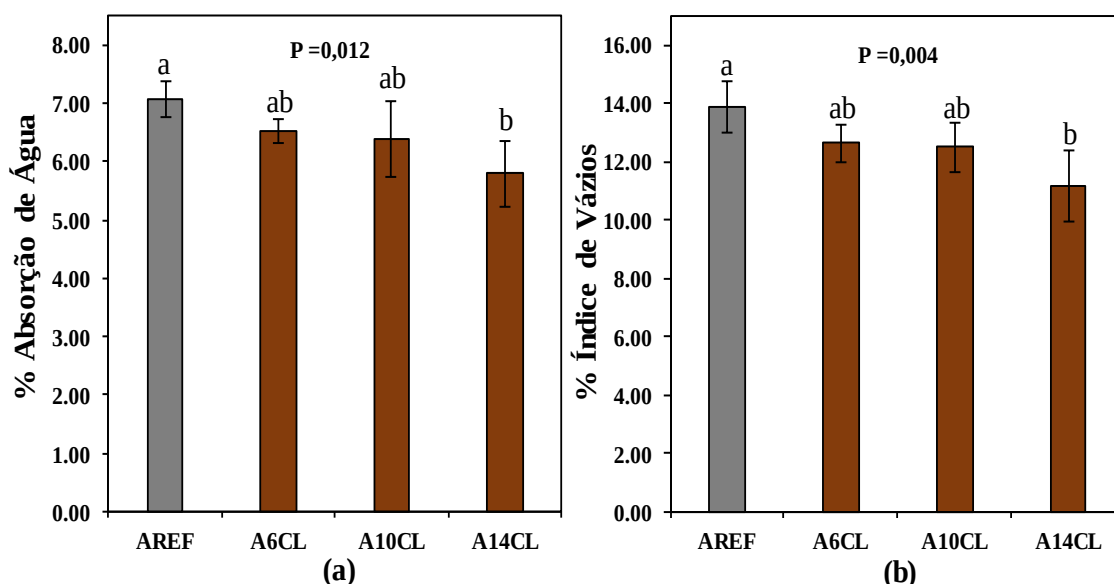


Figura 4.11 – (a) absorção de água (b) índice de vazios. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística quando comparado entre grupos. (n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste ANOVA, Tukey)

Assim como um maior índice de vazios pode proporcionar uma maior absorção de água nas argamassas, é natural que as argamassas que apresentem menor índice de vazios e absorção apresentarão, por consequência, maiores resistências, da mesma maneira que índice de vazios e absorção maiores apresentarão resistências menores. Conforme pode ser observado na Figura 4.11, o comportamento de absorção e índice de vazios são inversamente proporcionais ao comportamento da resistência a compressão das mesmas argamassas verificada na Figura 4.9. A redução na necessidade de absorver água proporcionada pela adição de 14% de CLETA na argamassas, denota a aptidão de tal dosagem para aumentar a durabilidade do material cimentício.

Comportamento semelhante foi verificado por Kaish *et. al* 2018, que em seus estudos avaliaram a influência de cinzas de lodo de ETA na produção de concreto autoadensável de alta resistência, composto por 0% (amostra controle), 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de substituição de cimento. Ao submeter as amostras ao ensaio de absorção de água, observaram que a menor taxa de absorção de água foi registrada para as amostras com 15% de cinza de lodo, com percentagens de 3,27%, 2,99% e 2,81% em 28, 56 e 90 dias de idade, respectivamente. Além disso, a taxa de absorção de água das amostras concreto com 15% de cinzas foi menor do que a das amostras de controle.

No presente trabalho, a diminuição na taxa de absorção de água da argamassa A14CL em comparação com argamassa controle pode ser devida ao refinamento dos

poros pela reação pozolânica das cinzas do lodo ativado. Consequentemente, a estrutura tornou-se mais densa (KANNAN E GANESAN, 2014). Esse resultado está de acordo com os resultados encontrados por Razak *et al.* (2004) e por Kaish *et. al* (2018), o que portanto, confirma o efeito benéfico da incorporação das cinzas do lodo de ETA para aumentar a durabilidade de argamassas.

4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura das Argamassas (MEV)

A micrografia eletrônica de varredura permite a observação de aspectos microestruturais das pastas cimentícias endurecidas, possibilitando a visualização da morfologia de partículas individuais que compõem a matriz e também do agrupamento e arranjo das partículas. Com o equipamento acoplado a um espectrômetro é dispersivo de energia, é possível obter informações qualitativas sobre a composição química de regiões visualizadas no MEV. Primeiramente realizou-se uma varredura num nível de observação de 100 μm buscando visualizar a imagem como um todo. Seguidamente, a varredura deu-se através do aumento do grau de observação, através da ampliação da lente para 10 μm .

A Figura 4.12 apresenta a superfície aumentada 100x das amostras de fragmentos da argamassa de referência e das amostras com CLETAs com teor de 6, 10 e 14% de substituição. Ao analisar as fissuras e porosidades das amostras supracitadas, verifica-se, a partir das imagens geradas pelo MEV, que a substituição do cimento Portland por CLETAs nos teores de 6% e 10% não obteve diferenças significativas em relação a amostra de referência. Já a argamassa com 14% de substituição do cimento Portland por CLETA apresentou uma superfície mais densa e menos porosa do que a argamassa de referência, que pode ser justificado pela ação pozolanica das CLETAs na densificação da matriz cimentícia.

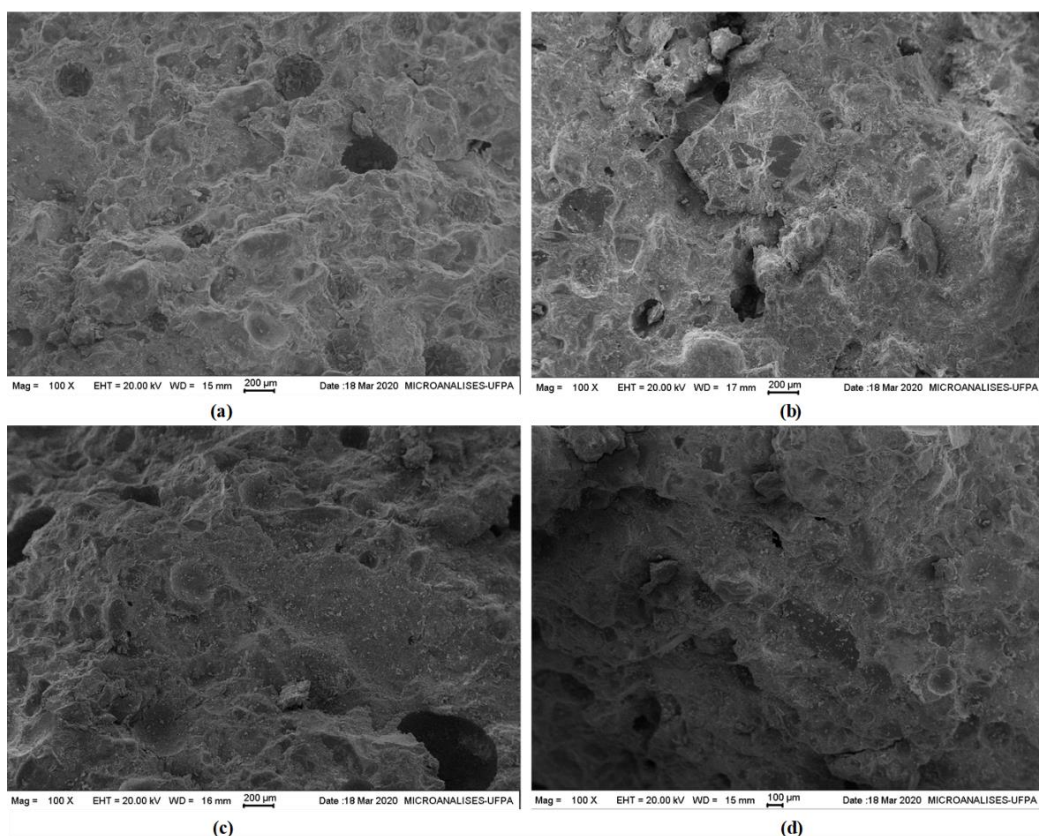


Figura 4.12 – MEV de fragmentos da amostra (a) AREF, (b) A6CL (c) A10CL e (d) A14CL.

Vale ressaltar que quanto maior a quantidade de poros, menor será a resistência à compressão e maior será o índice de absorção de água, ou seja, a quantidade de poros está intimamente associada à resistência à compressão e ao índice de absorção de água (TAVARES, 2015). As imagens obtidas corroboram com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e de absorção de água, o qual as argamassas com 14% de CLETA apresentou melhor desempenho do que a argamassa de referência.

A Figura 4.13 mostra a microestrutura da argamassa AREF. Marcou-se alguns pontos nas imagens para análise elementar através de EDS e os elementos majoritários nos pontos identificados estão dispostos na Tabela 4.4. No ponto 1, foi identificado concentrações de silício, oxigênio, cálcio e alumínio. Já no ponto 2, nota-se a presença de um cristal hexagonal, hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento Portland.

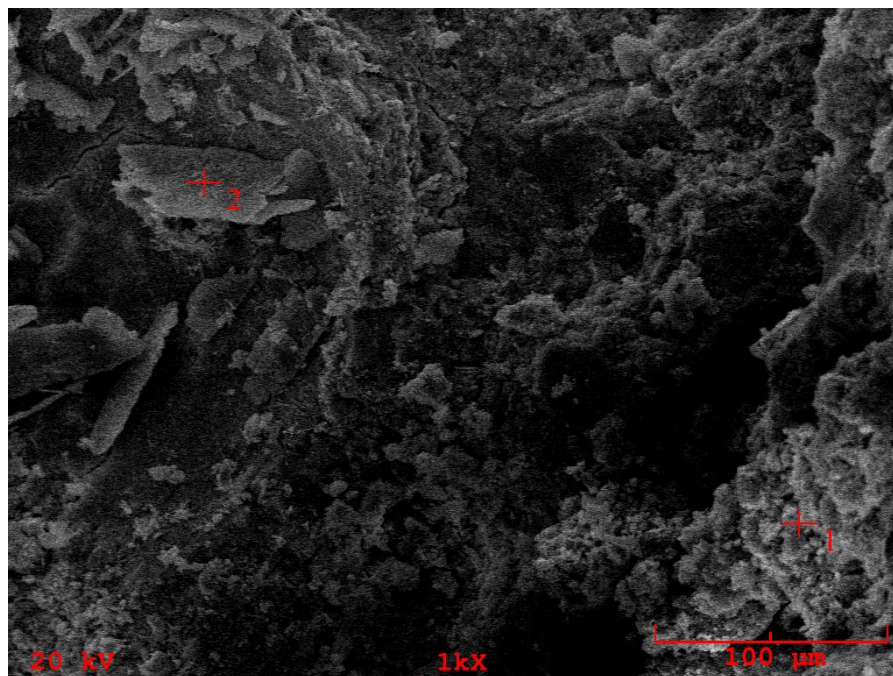


Figura 4.13 – Microestrutura da Argamassa AREF

Tabela 4.6 – Resultado dos elementos majoritários encontrado na análise de EDS da amostra AREF.

Elemento	Concentração (%)	
	Ponto 1	Ponto 2
Si	12,87	2,17
O	52,93	37,60
Ca	31,38	60,23
Al	2,83	—

Na Figura 4.14 apresenta-se a o aspecto da microestrutura da amostra A14CL. Observa-se que a matriz argamassa de cimento produzida com 14% de CLETA aparenta possuir quantidade maior de compostos mais densos do que a matriz da argamassa de referência. É possível observar aglomerados maciços junto de aglomerados semelhantes aos observados no corpo de prova do traço de referência. Na análise EDS dos pontos 1 e 2 são compostos basicamente por Magnésio, oxigênio, alumínio, silício e cálcio. A composição da região analisada é apresentada na Tabela 4.5.

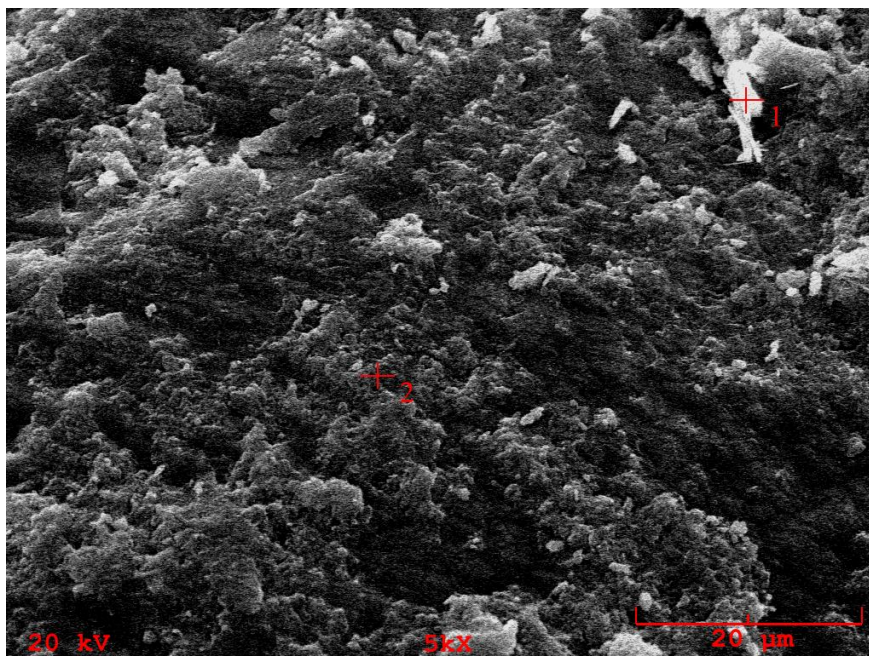


Figura 4.14 – Microestrutura da Argamassa A6L

Tabela 4.7 – Resultado dos elementos majoritários encontrado na análise de EDS da amostra A6L

Elemento	Concentração (%)	
	Ponto 1	Ponto 2
Si	8,13	60,71
O	61,82	23,51
Ca	23,94	14,49
Al	4,61	1,27
Mg	1,87	—

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Através deste estudo, atesta-se que as cinzas do lodo de ETA possuem grande potencial pozolânico e podem ser utilizadas como substituição parcial do cimento Portland em pasta e argamassas. A partir das análises dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A calcinação do LETA em temperaturas superiores a 600°C provoca a ativação do material através da quebra dos picos característicos da caulinita, que deixa de existir devido a sua transformação em metacaulinita, no estado amorfo, produto altamente pozolânico.
- A composição química majoritária do lodo in natura e calcinado são formados por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , entretanto apenas as cinzas ativadas termicamente tiveram teores superiores a 70% e perda ao fogo menor ou igual a 6%.
- As CLETAs produzidas através da ativação por 2h nas temperaturas de 600°C, 700°C e 800°C possuem potencialidade para serem utilizadas como pozolana em matrizes cimentícias, visto que os ensaios de DRX, FRX, IAP e TG/DTG realizados nesta pesquisa indicam tal potencialidade.
- As pastas contendo CLETA800 em substituição do cimento apresentaram menores quantidades de hidróxido de cálcio aos 28 dias, dentre todas as avaliadas, tanto na análise mineralógica, quanto na termogravimétrica.
- O índice ótimo de atividade pozolânica foi obtido com uma temperatura de calcinação de 800 °C por 2h. No entanto, esse valor é apenas 3,04% superior ao valor obtido com uma temperatura de calcinação de 600 °C por 2h, o que requer menos energia. Como resultado, usar uma temperatura de 800 °C não é econômico.
- Todas as argamassas com CLETA600 apresentaram resistência a compressão e tração na flexão maior do que a argamassa de referência, no entanto pela análise estatística apenas a argamassa A14CL, ou seja, a argamassa com 14% de substituição do cimento Portland por cinza, apresentou uma diferença significativa de comportamento em relação as demais amostras com um acréscimo

de resistência 13,5% e 12% nos ensaios de resistência a compressão e a tração na flexão respectivamente.

- Os resultados do ensaio de absorção de água demonstraram coerência quando comparado ao índice de vazios das mesmas argamassas. Entre a argamassa de referência (AREF) e as argamassas com 6% e 10% de cinza de lodo de ETA (A6CL e A10CL) não houve diferenças significativas tanto para a absorção quanto para o índice de vazios, mas quando comparados com a argamassa com 14% de substituição, verificou-se que a absorção e o índice de vazios diminuíram.
- Pela análise de superfície utilizando a MEV, notou-se que a microestrutura da pasta cimentícia produzida com 14% de CLETA600 apresentou-se aparentemente mais densas e menos porosa do que a argamassa de referência, que pode ser justificado pela ação pozolânica da CLETA na densificação da matriz cimentícia.

5.2 SUGESTÕES

Diante da enorme quantidade de lodo provenientes do tratamento de águas residuais na região metropolitana de Belém e seu descarte irregular nos rios, aliados aos benefícios ambientais e técnicos da utilização das cinzas do lodo que foram abordados nessa pesquisa é importante a continuação e ampliação do estudo. Desta forma, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisas:

- Estudo do potencial de utilização de CLETA em concretos, como adição mineral.
- Analisar os efeitos do aproveitamento das CLETA em substituição ao cimento Portland nos teores de 20, 30 e 50% nas idades de 7, 28 e 63 dias, analisar as propriedades no estado fresco, assim como, analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade.
- Avaliar o desempenho do uso de CLETA em argamassa sem o uso de aditivos.
- Efetuar a análise da atividade pozolânica das pastas com CLETAs através do ensaio de DRX;
- Analisar a viabilidade técnico-econômica do resíduo, determinando a relação custo x benefício para utilização de CLETA como substituição ao cimento Portland para a indústria de construção civil.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. São Paulo: 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do cimento Portland. 8ª ed. São Paulo: ABCP, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos – Requisitos: NBR 12653.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos – Classificação: NBR 10.004.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Comum: NBR 5732.** Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos: NBR 10004.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica: NBR NM 23.** Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente de agregado miúdo: NBR NM 52.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação da massa unitária e do volume de vazios: NBR NM 45.** Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de resistência a tração na flexão e à resistência a compressão: NBR 13279.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica: NBR 9778.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: NBR 5752.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland Composto – Especificação: NBR 11578.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão: NBR 7215.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto: determinação do módulo estático de elasticidade à compressão: NBR 8522.** Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da composição granulométrica: NBR NM 248.** Rio de Janeiro, 2003.

ABE, Y, T. Tratamento e disposição do lodo de ETA. Disponível em: <http://www.fec.unicamp.br/~bdta/modulos/saneamento/lodo/lodo.htm#conceito>. Acesso em: 21/02/2019.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. Utilização de indicadores de desempenho para gerenciamento de sistemas de tratamento de água. In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23., Campo Grande – MS, 2005.

ANDRADE, C. F.; SILVA, C. M.; OLIVEIRA, F. C. Gestão ambiental de saneamento: uma revisão das alternativas para tratamento e disposição do lodo de ETA e seus impactos na qualidade das águas. In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Anais. Belo Horizonte: IBEAS, p. 1-11, 2014.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Investigating calcined filter backwash solids as supplementary cementitious material for recycling in construction practices. *Construction and Building Materials*, v.175, p. 664–671, 2018.

AITCIN, P.C. *Concreto de Alto Desempenho*. São Paulo: Pini. 2009.

AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3 “R” concept. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 1-13, 2016.

AMARAL, F. D. Resistividade elétrica e absorção capilar de concretos compostos com cinza de lodo de ETA. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

BARBOSA, R. M. Avaliação do impacto de efluentes (lodos) de ETA's à biótica aquática através de testes de toxicidade. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

BATALHA, C. T. Avaliação das propriedades da argamassa com substituição parcial do cimento Portland por cinza do lodo da estação de tratamento de água da cidade de Belém. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Amazônia. Manaus, 2012.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. 1946 p. Cap 6.

BENLALLA, A. et al. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics bricks. *Applied Clay Science*, v. 118, p. 171-177, 2015.

CAMARGO, Carolina Nascimento de Oliveira. Avaliação do lodo amarelo de eta para incorporação em cerâmica vermelha. Dissertação. Centro de Ciências e Tecnologia. da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goyatacazes, 2014.

COELHO, R. V.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; FONTENELE, H. B.; TEIXEIRA, R. S. Uso de lodo de estação de tratamento de água na pavimentação rodoviária. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v.10, n.02, p. 10-22, 2015.

CHEN, H.; MA, X.; DAI, H. Reuse of water purification sludge as raw material in cement production. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 436–9, 2010.

COUTINHO, A. Sousa. Fabrico e propriedades do betão. 5ª ed, v. 1. LNEC. 2012

CUNHA, Bruna Baia da. Resíduo do lodo da Estação de Tratamento de Água Bolonha como material de construção civil. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. 1 ed., São Paulo: IBRACON, 2005. pp. 345-379.

DA SILVA, M. V; FUGARO, D. A. Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Água e Cinzas de Carvão Visando sua Utilização na Manufatura de Tijolo. 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2011.

DE LIMA, Jefferson Fernandes. Avaliação da incorporação de cinzas de lodo de esgoto como adição mineral em concretos de cimento Portland. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. L. Ensaios de tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: Rima, 2002.

EL- DIDAMONY, H. K. A.; KHALIL, K. A.; HEIKAL, M. Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes. *Jornal Housing and Building Research Center*, v. 10, p. 73-81, 2014.

FONSECA, Gustavo Celso da. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica. Dissertação. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

FRIAS, M; VILLA, R. V; GARCIA, R; ROJAS, M. I. S; BALOA, T. A. Mineralogical Evolution of Kaolin-Based Drinking Water Treatment Waste for use as Pozzolanic Material. The Effect of Activation Temperature. *Journal American Ceramic Society*, v. 96, p. 3188-3195, 2013.

FRÍAS, M.; VIGIL DE LA VILLA, R.; DE SOTO, I.; GRACÍA, R.; BALOA, T. A. Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: Characterization and properties. *Composites: Part B*, v.60, p. 14-20, 2014.

GASTALDINI. A. LG.; HENGGEN, M. F.; GASTALDINI, M. CC.; DO AMARAL, F. D.; ANTOLINI, M. B.; COLETTI, T. The use of water treatment plant sludge ash as a mineral addition. *Construction and Building Materials*, v.94, p. 513-520, 2015.

GERALDO, R.H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. *Journal of Cleaner Production*, V. 149, p. 146-155, 2017.

GOMES, R. K.; POSSAN, E.; DEZEN, B.; SANTOS, G.; COLOMBO, M. Potential uses of waste sludge in concrete production. *International Journal Management of Environmental Quality*, v. 28, n.6, p. 821-838, 2017.

HAGEMANN, S.E. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, v.214, p. 916-926, 2019.

HAIDER, M. et al. Influence of thermally activated alum sludge ash on the engineering properties of multiple-blended binders concretes. *Construction and Building Materials*, v.61, p. 216-229, 2014.

HUANG, C. H; WANG, S.Y. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. *Construction and Building Materials*, v.43, p. 174-183, 2013.

KATAYAMA, V. T. Quantificação da produção de lodo de estação de tratamento de ciclo completo: Uma análise crítica. Tese. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

KIZINIEVIČ, Olga et al. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. *Construction and Building Materials*, v. 41, p. 464-473, 2013

KRIVENKO, P.; DROCHYTKA, R.; GELEVERA, A.; KAVALEROVA, E.. Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement concretes. *Cement & Concrete Composites*. N° 45, 157-165, 2014.

MATTOS, M. R. U.; TEXEIRA, L. C. M. G.; Caracterização físico química e ensaios de adensamento em coluna de lodo produzido em ETA de grande porte. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 28, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2ª edição. São Paulo. IBRACON. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2ª ed., São Paulo, PINI, 1997.

NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto / A. M. Neville, J. J. Brooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OOI, T. Y.; YONG, E. L.; DIN, M. F. M.; REZANIA, S.; ARNINUDIN, E.; CHELLIAPAN, S.; RAHMAN, A. A.; PARK, J. Optimization of aluminium recovery from water treatment sludge using response surface methodology J. Environ. Manage, v. 228, p. 13-19, 2018

PICANÇO, M S. Arenito zeolítico com propriedades pozolânicas adicionadas ao cimento portland. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

PILAR, R. Avaliação da Atividade Pozolânica da Cinza Pesada Moída em Pastas de Cimento Portland. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

PINHEIRO, B. C. A.; ESTEVÃO, G. M.; SOUZA, D. P.; Lodo proveniente da estação de tratamento de água do município de Leopoldina, MG, para aproveitamento na indústria de cerâmica vermelha Parte I: caracterização do lodo. Revista Matéria, v.19, n.03, p. 204-211, 2014.

REN, C., WANG, W., LI, G. Preparation of high-performance cementitious materials from industrial solid waste. Construction and Building Materials, v. 152, p. 39-47, 2017.

ROCHA, G.H; WENZEL, M. C; BUSELATTO, D. M; SCHEMMER, L. B; REISS, J. O.; PAVOUX, R. B.; SANTOS, J. W.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Concretos de cimento Portland com substituição de lodo de estação de tratamento de água (ETA): análise da potencialidade de emprego na construção civil. In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. Anais do 59º congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: 2017.

RIBEIRO, C.C.; PINTO, J.D.S.; STARLING, T. Material de Construção Civil. 4. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG, 2001

RICHTER, C. A. Tratamento de Lodos de Estações de Tratamento de Água. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2001.

ROCHA, G.H; WENZEL, M. C; BUSELATTO, D. M; SCHEMMER, L. B; REISS, J. O.; PAVOUX, R. B.; SANTOS, J. W.; SILVA, S. R.; ANDRADE, J. J. O. Concretos de cimento Portland com substituição de lodo de estação de tratamento de água (ETA): análise da potencialidade de emprego na construção civil. In: 59º Congresso Brasileiro do Concreto, 2017, Bento Gonçalves. Anais do 59º congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: 2017.

SALES, A.; SOUZA, F. R.; ALMEIDA, F. C. R. Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. Construction and Building Materials, v.25, n.6, p. 2793-2798, 2011

SAMPAIO, D. J. R. Análise da viabilidade técnica da utilização de lama de eta para substituição parcial de cimento na produção de betão. Dissertação. Programa de mestrado em engenharia do ambiente. Faculdade de Engenharia de Porto. Porto, 2017.

SANEPAR. Sistema Corporativo de Controle Industrial. Foz do Iguaçu, PR. 2014.

SENHADJI, Y.; ESCADEILLAS, G.; MOULI, M.; KHELAFI, H. BENOSMAN. Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. Powder Technology. 314–323, 2014.

SOLTAN, A. M. M.; KAHL, W. A.; EL-RAOOF, F.ABD.; ABDEL-HAMID EL-KALIOUBY, B.; ABDEL-KADER SERRY, M.; ABDEL-KADER, NA. Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay. Journal of Cleaner Production, v. 117, p. 139-149, 2016.

SILVA, A. P.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L da M. Avaliação da Lixiviação de Alumínio e da Produção de Ácidos Graxos Voláteis em Reatores Anaeróbios Utilizados para Estudar a Disposição Final de Lodos de ETAs em Aterros Sanitários. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária. Anais. Porto Alegre, 2000.

SILVA, T. H. P.; RODRIGES, H. A. C; MOREIRA, M. L. T. Influência da substituição parcial do cimento por CLE na resistência a compressão do concreto. In: Congresso Técnico e Científico da Engenharia e da Agronomia. Anais. Foz do Iguaçu, 2016.

STEIN, R. T. Características de pastas de cimento Portland com adição de cinza de Lodo de ETA. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.

TAFAREL, N. F.; MACIOSKI, G.; CARVALHO, K. Q.; NAGALLI, A.; DE FREITAS, D. C.; PASSIG, F. H. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. Revista Matéria, v.21, n. 04, p. 974-986, 2016

TANTAWY, M. A. Characterization and pozzolanic properties of calcined alum sludge. Materials Research Bulletin, v.61, p. 415-421, 2015.

TAYLOR, H. F. W. Cement Chemistry. 2 ed. London: Thomas Telford, 1997.

TEIXEIRA, S. R.; DE SOUZA, S. A.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. Cerâmica, v.52, 215-220, 2015.

TEIXEIRA, S.R.; SANTOS, G.T.A.; SOUZA, A.E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S.A.; SOUZA, N.R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. Applied Clay Scienc, v. 53, p. 561-565, 201

TSUTIVA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do Estado de São Paulo. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

WAIKAREAN, N.; ASAVAPISIT. S.; SOMBATSOMPOP, K. Strength and microstruture of water treatment residue-based geopolymers containng heavy metals. Construction and Building Materials, v.50, p. 486-491, 2014.

