



Bruna Baia da Cunha

**RESÍDUO DO LODO DA ESTAÇÃO DE  
TRATAMENTO DE ÁGUA DA REGIÃO  
METROPOLITANA DE BELÉM EM  
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO  
PORTLAND EM ARGAMASSA.**

**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



**Bruna Baia da Cunha**

**Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa.**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Marcelo de Souza Picanço

Belém  
Abril de 2019

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruna Baia da Cunha.

TÍTULO: Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa.

GRAU: Mestre ANO: 2019

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.

---

### **Bruna Baia da Cunha.**

brunabcunha@ufpa.br

Av. Augusto Correa, nº1, Campus Universitário do Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém, Pará.  
CEP 66075-970

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)

---

C972r      Cunha, Bruna Baia da

Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa. / Bruna Baia da Cunha. — 2019.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Orientação: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço Picanço

1. Lodo da ETA. 2. Caracterização. 3. Substituição. 4. Propriedades Mecânicas. 5. Argamassa. I. Título

CDD 620.11

---

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



**Bruna Baia da Cunha**

## **Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço**  
Orientador  
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

**Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira**  
Examinador Interno  
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

**Prof. Dr. Ricardo José Carvalho Silva**  
Examinador Externo  
Universidade Estadual Vale do Acaraú

Belém, 25 de Abril de 2019.

*“O importante é não parar de questionar, a curiosidade  
tem sua própria razão de existir”  
(Albert Einstein)*

## **Agradecimentos**

A Deus, que me conduziu e modificou para alcançar este objetivo, não se limitando a um aumento de conhecimento, e sim as parcelas de sua existência.

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, pelas palavras de incentivo e motivação nesta caminhada e, também, pela disposição em transmitir os conhecimentos necessários à pesquisa.

Aos laboratórios parceiros, nos quais foram realizados os ensaios: Laboratório de Física (Pesquisa), Laboratório de Geociência, Central de Extração da Faculdade de Química, Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da UFPA e Laboratório de Metalurgia do IFPA.

A diretoria da COSANPA e os funcionários da Estação de Tratamento de Água Bolonha, que colaboraram no fornecimento dos resíduos que foram a matéria-prima deste estudo.

Aos meus pais, Astério e Rosely, por terem me encaminhado, incentivado e ajudado no caminho dos estudos. As minhas irmãs e sobrinho, Aryane, Sabrina e Felipy, pelo simples fato de existirem. A minha psicóloga, coaching pessoal, engenheira autodidata, amiga e companheira de vida Wellenice, por toda paciência e carinho, esse título é em parte seu.

Aos colegas do mestrado, os quais me ajudaram sempre que precisei. Bem como nos momentos difíceis: Wallyson, Denisson, Maurílio, Izabela, João Vitor, Valéria e Kaissin. A todos os colegas que cursaram as disciplinas e dividiram comigo grupos de estudos e apresentações. Aos amigos da faculdade e de vida, que estiveram sempre presentes e me incentivando.

Os meus sinceros agradecimentos.

## Resumo

CUNHA, B. B. **Resíduo do lodo da estação de tratamento de água da região metropolitana de Belém em substituição parcial ao cimento Portland em argamassa.**

Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

Em decorrência do crescimento das cidades, a demanda por água potável tem aumentado nas últimas décadas. Como qualquer processo industrial, a produção de água para uso humano gera subprodutos, sendo o principal deles designado de resíduo, lama ou lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA). Até o momento, o destino mais comum para o resíduo de Estação de Tratamento de Água (RETA) são os cursos d'água, ainda que seja considerado um resíduo sólido. Estes fatores motivam pesquisas que visam atenuar os problemas causados pelo seu descarte incorreto no meio ambiente. Neste sentido, o presente trabalho apresenta uma proposta alternativa de disposição do RETA em argamassa, substituindo parcialmente no cimento, cuja extração e emprego também causam impacto ambiental. O RETA foi empregado na argamassa com a menor alteração possível, ou seja, foi utilizado *in natura* para evitar gastos energéticos e viabilizar seu emprego. Inicialmente, foi realizada a caracterização dos materiais utilizados, bem como a caracterização física, química, mineralógica, microestrutural e térmica do lodo extraído da ETA Bolonha, localizada na região metropolitana de Belém. A primeira investigação estudou seu aproveitamento como pozolana no cimento Portland, para tal foi realizado os ensaios que analisaram sua potencial reatividade com cal e com cimento. A investigação da atividade pozolânica, tanto com cal quanto com cimento do tipo CP II-F-32, evidenciaram que as argamassas com teores de substituição obtiveram resultados inferiores ao exigido pelas respectivas normas, descartando o seu uso para este fim. A segunda investigação analisou os efeitos do aproveitamento do resíduo como filler no cimento Portland, utilizou-se a argamassa de referência (sem adição do lodo) e traços com adições de 6, 8 e 10%. Na resistência à compressão o teor de 6% de substituição do cimento Portland CP I-25 por RETA produziu um acréscimo de resistência de 8,93% aos 7 dias e 3,24% aos 28 dias de idade, em relação à argamassa de referência, além de absorver 7,81% de água a menos que a argamassa convencional. Ainda que o aproveitamento do lodo ocorra em pequenas quantidades a sua utilização é viável, uma vez que sua incorporação diminuirá o consumo da matéria-prima requerida para a produção de argamassa.

### Palavras-chave:

Lodo de ETA; Caracterização; Substituição; Propriedades Mecânicas; Argamassa.

## **Abstract**

As a result of the growth of cities and the greater demand for quality of life, the demand for drinking water has increased in recent decades. Like any industrial process, the production of water for human use generates large quantities of by-products, being the main designated residue of waste, sludge or sludge of Water Treatment Station (WTPS). So far, the most common destination for the WTPS is the watercourse, although it is considered a solid waste. These factors motivate research aimed at alleviating the problems caused by incorrect waste disposal in the environment. In this sense, the present paper presents an alternative proposal for the disposal of WTPS in mortar, partially replacing cement, whose extraction and employment also cause environmental impact. The WTPS was used in the mortar with the least possible alteration of the residue, that is, its *in natura* use to avoid energy expenditure and to enable its use. The characterization of the materials used, as well as the physical, chemical, mineralogical and thermal characterization of the sludge extracted from WTP Bolonha, located in the metropolitan area of Belém, was carried out. The analyzes provided data that were the basis for investigations of viable applications for the residue. The first investigation studied its use as pozzolan in Portland cement, for which the tests that analyzed its potential reactivity with lime and cement were carried out. The investigation of the pozzolanic activity, both with lime and cement CP II-F-32, showed that mortars with replacement contents obtained lower results than required by the respective standards, discarding their use for this purpose. The second research analyzed the effects of the use of the residue as a filler in Portland cement, the reference mortar (without addition of sludge) and traces with additions of 6, 8 and 10% were used. In the compressive strength the 6% replacement content of the cement Portland CP I-25 by WTPS produced a resistance increase of 8,93% at 7 days and 3,24% at 28 days of age, in relation to the reference mortar, besides absorbing 7,81% water less than conventional mortar. Although the use of sludge occurs in small quantities, its use is feasible, since its incorporation will reduce the consumption of the raw material required for the production of mortar.

### **Keywords:**

Water Treatment Plant Sludge; Characterization; Replacement; Mechanical Properties; Mortar.

# Sumário

Capítulo	Página
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.2 OBJETIVOS .....	14
1.2.1 Objetivo Geral .....	14
1.2.2 Objetivos Específicos .....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 ÁGUA DE QUALIDADE.....	15
2.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	16
2.3 REJEITO DO LODO DE ETA.....	18
2.3.1 Localização e Coleta do Resíduo.....	18
2.3.3 Classificação do Resíduo.....	21
2.3.3 Aplicação do Resíduo de ETA .....	22
2.4 ADIÇÃO MINERAL .....	30
2.4.1 Material Pozolânico.....	31
2.4.2 Fíler.....	34
2.5 AGREGADO .....	35
2.5.1 Agregado miúdo .....	36
2.6 ARGAMASSA .....	37
2.6.1 Propriedades da argamassa no estado fresco.....	38
2.6.1.1 Trabalhabilidade .....	38
2.6.1.2 Concistência e plasticidade.....	38
2.6.1.3 Retenção de água .....	39
2.6.1.4 Densidade de massa e Teor de ar incorporado .....	39
2.6.1.5 Retração por secagem.....	40
2.6.2 Propriedades da argamassa no estado endurecido.....	40
2.6.2.1 Densidade da massa.....	40
2.6.2.2 Permeabilidade .....	41
2.6.2.3 Resistência mecânica.....	41
2.6.2.4 Retração .....	42
2.7 CIMENTO PORTLAND .....	43

2.7.1 Produção do Cimento .....	44
2.7.2 Hidratação do Cimento.....	45
2.7.3 Tipos de Cimento .....	46
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>48</b>
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	48
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	51
3.2.1 Cimento Portland.....	51
3.2.2 Agregado Miúdo.....	53
3.2.3 Água .....	55
3.2.4 Lodo de ETA .....	55
3.3 MÉTODOS UTILIZADOS .....	55
3.3.1 Caracterização Física.....	55
3.3.1.1 Composição Granulométrica à Laser .....	55
3.3.1.2 Massa Específica .....	56
3.3.2 Caracterização Química.....	57
3.3.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raio-X (ED-FRX) .....	57
3.3.3 Caracterização Mineralógica .....	57
3.3.3.1 Difração por Raio-X (DRX) .....	57
3.3.4 Caracterização Térmica .....	58
3.3.5 Investigação da Atividade Pozolânica (IAP).....	58
3.3.5.1 Investigação da atividade pozolânica com cal.....	59
3.3.5.2 Investigação da atividade pozolânica com cimento Portland.....	60
3.3.6 Produção das Argamassas .....	61
3.3.6.1 Definição do Traço da Argamassa.....	61
3.3.6.2 Preparo das Argamassas .....	61
3.3.7 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	63
3.3.7.1 Índice de consistência.....	63
3.3.7.2 Absorção de Água por Capilaridade.....	64
3.3.7.3 Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade.....	65
3.3.7.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	66
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	67

4.1.1 Granulometria à Laser .....	67
4.1.2 Massa Específica .....	68
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	68
4.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raio-X (ED-FRX) .....	68
4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA .....	70
4.3.1 Difração por Raio-X (DRX) .....	70
4.4 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA .....	71
4.5 INVESTIGAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA (IAP).....	73
4.5.1 Investigação da Atividade Pozolânica com cal .....	73
4.5.2 Investigação da Atividade Pozolânica com cimento Portland .....	74
4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....	75
4.6.1 ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA .....	75
4.6.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE .....	75
4.6.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	78
4.6.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) E ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSIVA (EDS) .....	80
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>86</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	86
5.2 SUGESTÕES .....	87
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>89</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1 – Índice de riscos da qualidade da água estimados para 2050	15
Figura 2.2 - Fluxograma de uma Estação de Tratamento de Água Convencional	16
Figura 2.3 – Sistema de tratamento da ETA Bolonha	19
Figura 2.4 - Estação de Tratamento de Água Bolonha	20
Figura 2.5 – Beneficiamento do lodo da ETA Bolonha	21
Figura 2.6 - Argamassa preparada após 28 dias de endurecimento	23
Figura 2.7 - Porcentagem e quantidade de água necessária para as massas de formação.	26
Figura 2.8 - Amostra 1-5% de RETA, amostra 2-sem lodo, amostra 3-10% de RETA	26
Figura 2.9 - (a) CC com 5% de RETA; (b) CC com 40% de RETA	27
Figura 2.10 - (a) Forno-mufla utilizado; (b) RETA após o processo de calcinação	30
Figura 2.11 - Cimento hidratado (a) sem adições; (b) com adição de pozolana	33
Figura 2.12 - Efeito fíler dos aditivos minerais	34
Figura 2.13 - Variação da retenção de água em função da composição das argamassas	39
Figura 3.1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa	49
Figura 3.2 – Granulometria à laser do cimento Portland CP V	53
Figura 3.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009)	54
Figura 4.1 - Análise de granulometria à laser das amostras de resíduo de lodo de ETA	67
Figura 4.2 - Difratoograma de raio X do RETA	70
Figura 4.3 – Curva TGA/ DTG do lodo.	72
Figura 4.4 – IAP com cal	73
Figura 4.5 – (a) Resistência à compressão; (b) Índice de desempenho com cimento Portland	74
Figura 4.6 – Absorção de água por capilaridade dos CP`s	76
Figura 4.7 – Redução da absorção de água dos CP`s	77
Figura 4.8 – Resistência à compressão das argamassas. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão	78
Figura 4.9 – Módulo de elasticidade das argamassas. Valores expressados em médias $\pm$ desvio padrão	79
Figura 4.10 – Lodo <i>in natura</i> aumentado (a) x200 ; (b) x1.000; (c) x2.500; (d) x5.000	81
Figura 4.11 – Lodo <i>in natura</i> e EDS dos pontos marcados	82
Figura 4.12 – Superfície da amostra A <sub>REF</sub> e EDS dos pontos marcados	83
Figura 4.13 – MEV ampliado x40 (a, c, e) e MEV ampliado x100 (b, d, f)	84

## Lista de Tabelas

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1 – Descrição dos processos no tratamento convencional da água	17
Tabela 2.2 – Produtos químicos utilizados na ETA Bolonha	22
Tabela 2.3 – Estudos desenvolvidos com RETA	22
Tabela 2.4 – Comparação entre os resultados da densidade e força da areia	24
Tabela 2.5 – Resultado dos ensaios de determinação da resistência à compressão	25
Tabela 2.6 – Composição química dos CC com 5% e 40% de aditivo RETA, % em peso	28
Tabela 2.7 – Exigências químicas mínimas	32
Tabela 2.8 – Exigências físicas mínimas	32
Tabela 2.9 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo	36
Tabela 2.10 – Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil	47
Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados, finalidade e referências normativas	50
Tabela 3.2 – Exigências químicas do CP II	51
Tabela 3.3 - Exigências físicas do CP II	51
Tabela 3.4 - Exigência mecânica do CP II	51
Tabela 3.5 – Exigências químicas do CP I	52
Tabela 3.6 - Exigências físicas do CP I	52
Tabela 3.7 - Exigência mecânica do CP I	52
Tabela 3.8 – Massa específicas dos cimentos utilizados na pesquisa.	53
Tabela 3.9 – Caracterização do agregado miúdo natural	54
Tabela 3.10 – Resumo dos materiais utilizados	60
Tabela 3.11 – Resumo dos materiais utilizados	60
Tabela 3.12 - Teores das argamassas	62
Tabela 3.13 - Especificações dos CP's	63
Tabela 4.1 – Massa específicas do lodo.	68
Tabela 4.2 - Análise química do resíduo do lodo	69
Tabela 4.3 - Análise térmica do lodo.	71
Tabela 4.4 – Resultado IAP com cal	73
Tabela 4.5 – Resultado IAP com cimento	74
Tabela 4.6 – Resultado do índice de consistência das argamassas	75
Tabela 4.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade dos CP's	75
Tabela 4.8 – Redução na absorção de água em porcentagem dos CP's	76

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>ABCP</i>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>ALAF</i>	Água de Lavagem de Filtros
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	Óxido de Alumínio – Alumina
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas
<i>C<sub>2</sub>S</i>	Silicato Dicálcico
<i>C<sub>3</sub>A</i>	Aluminato Tricálcico
<i>C<sub>3</sub>S</i>	Silicato Tricálcico
<i>C<sub>4</sub>AF</i>	Ferro Aluminato Tetracálcico
<i>CaO</i>	Óxido de Cálcio
<i>CO<sub>2</sub></i>	Gás Carbônico
<i>COSANPA</i>	Companhia de Saneamento do Pará
<i>C-S-H</i>	Silicato de Cálcio Hidratado
<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>CC</i>	Corpo Cerâmico
<i>IAP</i>	Índice de Atividade Pozolânica
<i>IBGE</i>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<i>MEV</i>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentada
<i>ONU</i>	Organização das Nações Unidas
<i>RETA</i>	Resíduo de Estação de Tratamento de Esgoto
<i>SNIS</i>	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
<i>SiO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Silício – Sílica

# 1 INTRODUÇÃO

Em virtude do aumento da população nos centros urbanos, a demanda por serviços em vários setores, por consequência, também aumentou; um dos setores mais afetados foi o do saneamento básico. Em muitas cidades as estruturas existentes não são adequadas e suficientes para atender tal demanda, causando muitos impactos no meio ambiente (LIMA, LIMA e OKANO, 2016; VIANA, RODRIGUES e RIBEIRO, 2014).

Em decorrência do crescimento das cidades e da maior exigência por qualidade de vida, a demanda por água potável tem aumentado nas últimas décadas. Até 2030, o planeta enfrentará um déficit de água de 40%. Essa é a conclusão inevitável do Relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos – Água para um mundo sustentável, lançado em 2015.

Sadoff *et al.* (2015), alegam que a água é essencial para o desenvolvimento socioeconômico sustentável e, por sua vez, o desenvolvimento fornece os recursos necessários para investir na qualidade, infra-estrutura da água e instituições responsáveis por seu tratamento. Assim, as noções sobre a sua importância no desenvolvimento não são mais intuitivas.

A disputa pela água exige atenção cada vez maior. Em 40 anos, a demanda deve crescer mais de 50%. Enquanto isso, os recursos hídricos do planeta estão sendo contaminados. É o que lembra o Relatório Mundial da ONU de 2015, sobre a gestão da água. Estabelece também que a crescente busca por água potável implica no acréscimo de quantidade de resíduos nas Estações de Tratamento de Água (ETA).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2018), em termos globais, o Brasil possui uma boa quantidade de água. Estima-se que o país possua cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta. Em termos de distribuição natural, a região Norte, concentra aproximadamente 80% da quantidade de água disponível, mas representa apenas 5% da população brasileira.

O Ministério do Meio Ambiente (2018), afirma que para a manutenção sustentável do recurso água, é necessário a criação de instrumentos gerenciais de proteção, planejamento e utilização do sistema hídrico. As bacias que contêm mananciais de

abastecimento devem receber tratamento diferenciado, pois a qualidade da água bruta depende da forma pela qual os demais trechos da bacia são manejados.

Como qualquer processo industrial, a produção de água para uso humano gera grandes quantidades de subprodutos, sendo o principal deles um material vulgarmente designado por lama ou lodo de ETA. É praticamente inevitável a produção desse subproduto no processo de tratamento de água para abastecimento público (SAMPAIO, 2017).

Segundo NBR 10.004 (ABNT, 2004) o lodo de ETA é classificado como “resíduo sólido”, logo deve ser tratado e disposto em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 (BRASIL, 2010), onde empresas de saneamento busquem soluções ambientalmente corretas, para o destino dos resíduos gerados nos processos de tratamento de água.

Katayama (2014) expõe que grande parte do lodo gerado ainda é disposto em rios e poucas estações vem se preocupando com o tratamento e a disposição do resíduo. Afirma ainda que por consequência, é gerado um ciclo vicioso e contraditório onde: os rios são os provedores de água para as estações de tratamento e também, são receptores dos resíduos gerados pela própria ETA.

De acordo com Masi *et al.* (2013) o volume de lodo gerado por ETAs no mundo anualmente é de 10.000 t/dia, portanto os estudos sobre avaliação de aproveitamento do lodo e suas potencialidades são de fundamental importância. Já no Brasil, segundo Agostini *et al.* (2014), a maior parte de lodo de ETA é disposta em cursos d'água. De, aproximadamente, 7.500 ETAs no país, 70% destas lançam lodo nos rios.

Os resíduos de ETAs possuem características diversas, dependendo da tecnologia de tratamento adotada e da gestão destes resíduos, no que concerne as formas de remoção, tempo de acúmulo e operação de limpeza das unidades. O lodo de ETA normalmente possui 1 a 4% de sólidos totais, que pode causar sérios impactos negativos quando disposto de forma inadequada (ACHON e CORDEIRO, 2013).

Apesar de ser prática comum no Brasil, a descarga de resíduos de ETAs em cursos d'água é uma situação que pode causar problemas ambientais, além de ir de encontro as leis em vigor no país. Como é um assunto que vem sendo estudado apenas nos últimos anos, poucas são as estações brasileiras que possuem algum tipo de gerenciamento adequado para esse problema (MATTOS e GIRARD, 2013).

Historicamente, os resíduos gerados em ETAs têm sido lançados diretamente nos corpos de água, geralmente no mesmo manancial que a ETA utiliza para o processamento da água. Porém sabe-se que o lançamento de qualquer resíduo líquido ou sólido, altera significativamente a qualidade do corpo receptor (SILVEIRA, 2015).

Contrário ao exposto acima, Drumond (2013) avaliando a aplicação do resíduo de ETA no sistema de esgotamento sanitário, verificou que não provocou interferência significativa ou inibidor para os organismos aeróbios inoculados, mantendo satisfatória a biodegradabilidade do conjunto de lodo de ETA e de esgoto sanitário. Concluindo que esse consórcio se configura em vantagens no gerenciamento dos resíduos sólidos da ETA e ETE num mesmo local, até mesmo como forma de minimizar impactos e custos operacionais.

Apesar de diversos estudos estarem em andamento na busca pela melhor forma de dispor o lodo, minimizando ao máximo os impactos ambientais causados devido às diversas características apresentadas por este resíduo, ainda existe muitas lacunas quanto a maneira mais benéfica de dispor o lodo (ANDRADE *et al.*, 2014).

Uma das alternativas encontradas para o aproveitamento dos resíduos sólidos é a sua incorporação em materiais destinados à construção civil, tendo como parâmetro alguns exemplos nacionais e internacionais de experiências bem sucedidas (RAMIREZ *et al.*, 2015).

Takada *et al.* (2013) elencaram como os usos de maior potencial de utilização do lodo de ETA no Estado do Tocantins: disposição em estação de tratamento de esgoto (ETE); aterros sanitários; disposição controlada em certos tipos de solos; co-disposição com bio-sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos; incineração dos resíduos; recuperação de áreas degradadas; bem como aplicações industriais diversas tais como fabricação de tijolos ou outros materiais de construção.

Ramirez *et al.* (2015) destaca que a utilização benéfica do lodo de ETA na indústria da construção civil pode ser considerada uma oportunidade para aumentar a receita das empresas de saneamento, mas, principalmente, reduzir custos e impactos ambientais associados ao resíduo.

Desta forma, mediante a disposição irregular do resíduo, o presente trabalho tem como finalidade estudar a influência da adição do resíduo lodo de ETA nas propriedades da argamassa, avaliando sua caracterização química, física, mineralógica, térmica e mecânica como proposta de substituição parcial ao cimento Portland, neste sentido, a

utilização do lodo para este fim pode ser uma das alternativas para a correta destinação e reaproveitamento do resíduo, sendo este o objeto principal deste estudo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o potencial de utilização do resíduo do lodo da ETA Bolonha, como substituição parcial do cimento Portland em argamassas.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Efetuar a caracterização química, térmica, mineralógica e microestrutural do lodo proveniente da ETA Bolonha;
- Investigar a potencialidade da atividade pozolânica do resíduo do lodo da ETA;
- Avaliar as propriedades mecânicas, resistência à compressão aos 7 e 28 dias e módulo de elasticidade aos 28 dias, das argamassas de cimento Portland com adição mineral do resíduo do lodo da ETA;
- Estudo da utilização do resíduo do lodo da ETA como fíler caso a investigação da atividade pozolânica seja inexecuível.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 ÁGUA DE QUALIDADE

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), em nosso planeta há apenas 2,5% de água doce disponível (cerca de 35 milhões de km<sup>3</sup>). Sendo que desses 35 milhões, aproximadamente 70% está sob forma de gelo, quase 30% sob o solo e 0,3% em rios e lagos. Dos 2,5% de água doce disponível no mundo, o Brasil possui 12% dessa reserva, sendo 70% localizada na região Amazônica, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2015).

Estima-se que por volta de 2050 a disponibilidade de água está projetada para crescer de 10% a 40% nas altas latitudes, e decrescer de 10% a 30% nas regiões secas (médias latitudes) onde já existem áreas estressadas (DIAS, 2014).

Estimou-se ainda que, em 2050, um quinto da população mundial viverá em ambientes expostos a um alto risco da qualidade da água, devido ao excesso de demanda bioquímica por oxigênio (DBO), e que, no mesmo período, o número de pessoas enfrentando riscos pelo excesso de nitrogênio e fósforo aumentará para um terço da população mundial (Veolia e IFPRI, 2015). Tais projeções de porcentagens dos riscos à qualidade da água variam nos âmbitos de país e de bacia, como mostra a Figura 2.1.

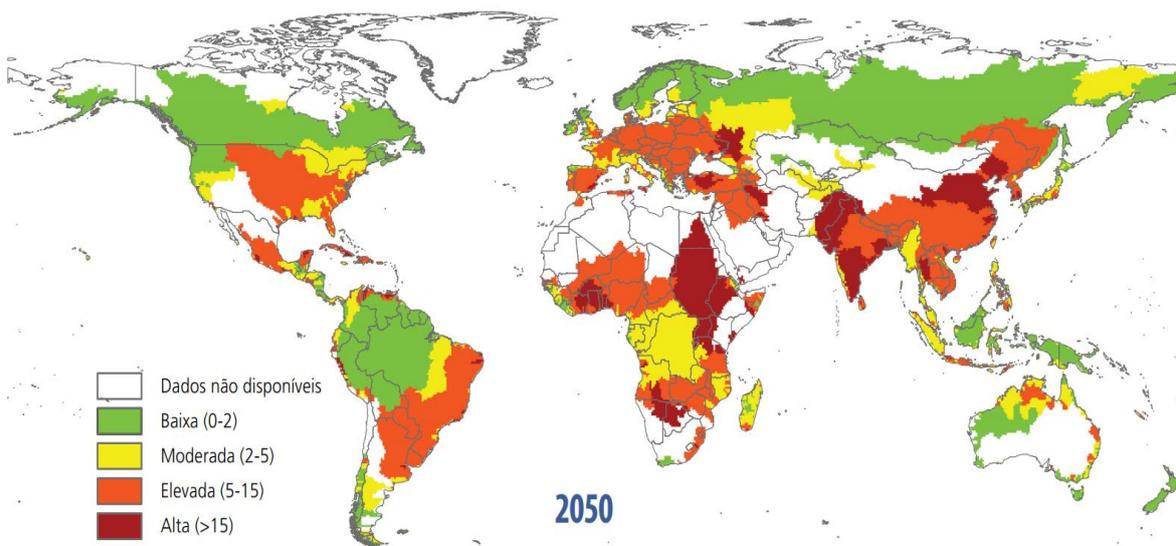


Figura 2.1 – Índice de riscos da qualidade da água estimados para 2050  
Fonte: Adaptado de Veolia e IFPRI (2015)

## 2.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Um sistema de abastecimento de água é definido como o conjunto de obras, equipamentos e serviços destinados a fornecer o abastecimento de água potável para fins de consumo doméstico, serviços públicos, consumo industrial e outros usos. Tem como finalidade tratar e melhorar a qualidade deste recurso referente aos aspectos higiênico, estético e econômico. Objetivando proporcionar o acesso à água adequada em qualidade, quantidade e pressão suficiente (AZEVEDO NETTO *et al.*, 1998; GARCEZ, 1976; TSUTIYA, 2006).

Pode ser observado na Figura 2.2 o fluxograma de uma ETA convencional<sup>1</sup> onde são observados os pontos de geração de resíduos, que são essencialmente os lodos dos decantadores e as águas de lavagem dos filtros. A água bruta que chega às estações de tratamento de água (ETA) passa por diversos processos antes da sua forma final de abastecimento ou disposição final no meio.

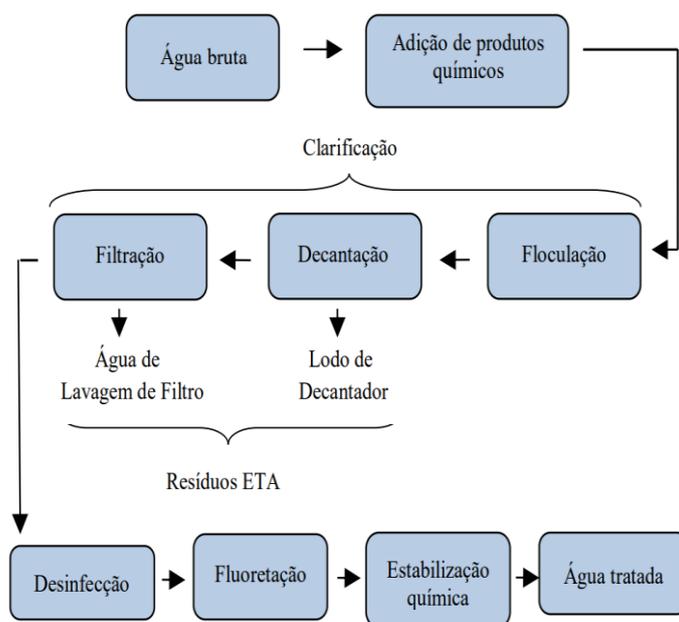


Figura 2.2 - Fluxograma de uma Estação de Tratamento de Água Convencional  
Fonte: Adaptado de PÁDUA (2006)

O tratamento da água é realizado através da aplicação de sais de ferro ou alumínio, que provocam a desestabilização das partículas coloidais em solução e em suspensão da água bruta, formando flocos que são sedimentados em decantadores e posteriormente

<sup>1</sup> Entende-se por tratamento convencional o conjunto dos processos sequenciais de Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração, Desinfecção, Fluoretação e Correção de pH (SANEPAR, 2014).

filtrados para a clarificação final, formando o chamado lodo de estação de tratamento e água – lodo de ETA (KONDAGESKI, CARNEIRO e ANDREOLI, 2013).

A Tabela 2.1 apresenta as etapas básicas com as respectivas descrições de uma ETA convencional.

Tabela 2.1 – Descrição dos processos no tratamento convencional da água

<b>Processo</b>	<b>Definição do Processo na Estação de Tratamento de Água</b>
Coagulação	Processo unitário que consiste na formação de coágulos, promovendo um estado de equilíbrio eletrostaticamente instável das partículas, no seio da massa líquida. Os coagulantes mais usados neste processo são os sais de alumínio ou ferro, como sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico, sulfato ferroso, e policloreto de alumínio, também se utilizam produtos auxiliares conhecidos como polieletrólitos catiônicos, aniônicos ou não iônicos. A coagulação depende de fatores como temperatura, pH, alcalinidade, cor verdadeira, turbidez, sólidos totais dissolvidos, força iônica, tamanho das partículas, etc.
Floculação	Ocorre imediatamente após da coagulação, consiste no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas (coágulos), de modo a formar outras maiores chamadas flocos, suscetíveis de serem removidas por decantação (ou flutuação) e filtração. A floculação se vê favorecida em condições onde tem uma agitação moderada, aumentando o contato entre as partículas formando flocos.
Sedimentação (decantação)	A sedimentação é a separação das partículas suspensas mais pesadas formadas durante a floculação (flocos) no meio líquido, as quais pela ação da gravidade apresentam um movimento descendente, depositando-se no fundo e formando o lodo. A sedimentação das partículas suspensas propiciam a clarificação da água pela separação das fases sólida e líquida ao mesmo tempo em que forma no fundo do decantador uma camada de lodo que precisa ser removido periodicamente seja pelo método manual ou mecanicamente.
Filtração	Consiste na remoção das partículas suspensas e coloidais e dos microrganismos presentes na água que escoam através de um meio filtrante, onde as impurezas ficam retidas. É considerado um processo final de remoção de impurezas na ETA, portanto, é um dos responsáveis pelo cumprimento dos padrões de potabilidade da água.
Desinfecção	A desinfecção é usualmente realizada com a adição de cloro, nas formas de gás e hipoclorito. O cloro pode ser usado como desinfetante para eliminar ou inativar microrganismos patogênicos e como oxidantes de compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água. Porém estudos têm demonstrado que o agente pode trazer alguns inconvenientes como, por exemplo, a formação de trihalometanos, que são substâncias cancerígenas.
Fluoretação	A fluoretação é o processo pelo qual se adicionam compostos de flúor às águas de abastecimento público, a fim de que tenham teor adequado de íon fluoreto. Esse teor varia de um local para o outro, de acordo com a média das temperaturas máximas anuais.

Fonte: Adaptado de AZEVEDO NETTO (1987), DI BERNARDO (2012),

JANUÁRIO (2005) e SANEPAR (2014)

Para ser alcançada a condição de adequação ao consumo (potável) humano, a água bruta é exposta a processos químicos e físicos, como coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção do pH e fluoração (SUGUINO, FREITAS e VASQUE, 2013).

A finalidade primordial das ETAs é tornar determinada água própria para a utilização a que se destina, atendendo aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde. Em seu art. 5º a expressão água potável é definida como “água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido e que não ofereça riscos à saúde”, sendo o padrão de potabilidade: “conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano”.

## 2.3 REJEITO DO LODO DE ETA

### 2.3.1 Localização e Coleta do Resíduo

A ETA destacada neste estudo é a Estação de Tratamento de Água do Bolonha (ETA Bolonha), responsável pelo abastecimento de aproximadamente 70% da água consumida na Região Metropolitana de Belém (RMB), no estado do Pará. Cinco municípios compõem a região metropolitana: a capital Belém, Ananindeua, Benevides, Marituba e Santa Bárbara, concentrando cerca de 1/3 da população estadual (COSANPA, 2013).

De acordo com COSANPA (2013), as captações do sistema produtor integrado Bolonha - Utinga estão localizadas no Lago Bolonha (interligado ao Lago Água Preta, alimentado pelo rio Guamá), que estão dentro dos limites da Área de Proteção Ambiental dos Mananciais de Abastecimento de Água de Belém (APA – Belém). Na Figura 2.3 é apresentada uma imagem de satélite do sistema referente ao tratamento e captação de água da ETA Bolonha que está localizada nas coordenadas geográficas 1°41'68.84" S e 48°43'80.43"O.

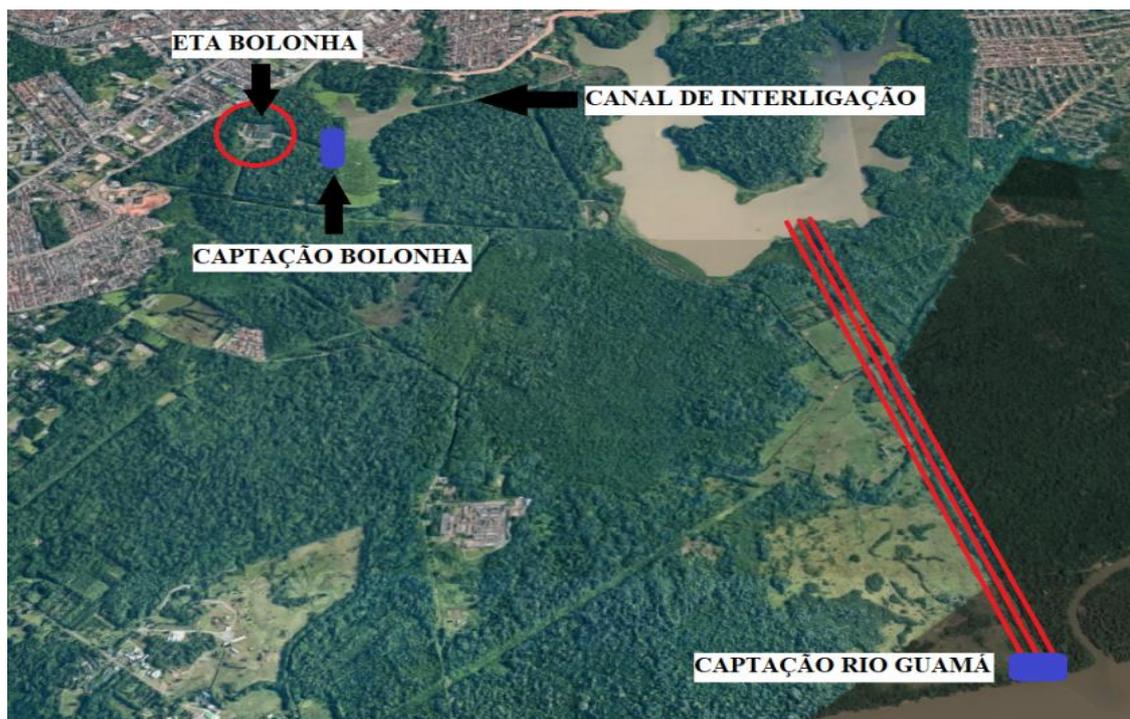


Figura 2.3 – Sistema de tratamento da ETA Bolonha  
Fonte: Autora, 2019

Os principais resíduos gerados nas ETAs, que possuem tecnologia de ciclo completo, são o lodo de decantadores e a água de lavagem de filtros (ALAF). As principais perdas de água, neste tipo de sistema, ocorrem devido à necessidade de limpeza das unidades de tratamento para remoção de resíduos (lavagem de flocladores, decantadores e filtros) e vazamentos nas unidades e/ou tubulações. O lodo é definido como resíduo sólido, e, portanto, deve estar em consonância com os preceitos da Lei 12.305/2010 (artigo 3º, inciso XVI) (BRASIL, 2010) e da série de normas NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004).

Moreira *et al.* (2009), citado por Araújo (2017), relata que em termos de mensuração da produção do RETA e de seu descarte, estimam que, no Brasil, sejam despejadas 2000 m<sup>3</sup>/dia de RETA diretamente nos cursos d'água sem qualquer tratamento, propiciando a ocorrência de odores, o crescimento excessivo de algas e a mortandade de peixes devido à sua toxicidade crônica para os organismos aquáticos, como também à degradação da qualidade da água e dos sedimentos.

Em uma ETA convencional de ciclo completo, os resíduos gerados são provenientes das limpezas ou descargas dos decantadores (ou flotadores) e das lavagens dos filtros. Em termos volumétricos, a maior quantidade de resíduo é proveniente da lavagem dos filtros. No entanto, em termos mássicos, a maior quantidade de resíduo é

gerada no sistema de separação sólido/líquido que, neste tipo de estação, é basicamente efetuada nos decantadores (SANEPAR, 2014).

A Figura 2.4 apresenta uma vista panorâmica da Estação de Tratamento de Água do Bolonha. Essa ETA é administrada pela Companhia de Saneamento do Estado do Pará (COSANPA), apresenta tratamento de ciclo convencional com capacidade de vazão média de  $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$  e abastece cerca de 70% da população de Belém.



Figura 2.4 - Estação de Tratamento de Água Bolonha  
Fonte: <http://ananindeuamais.com.br>

A Figura 2.5 apresenta o fluxograma do beneficiamento da Estação de Tratamento de Água do Bolonha.

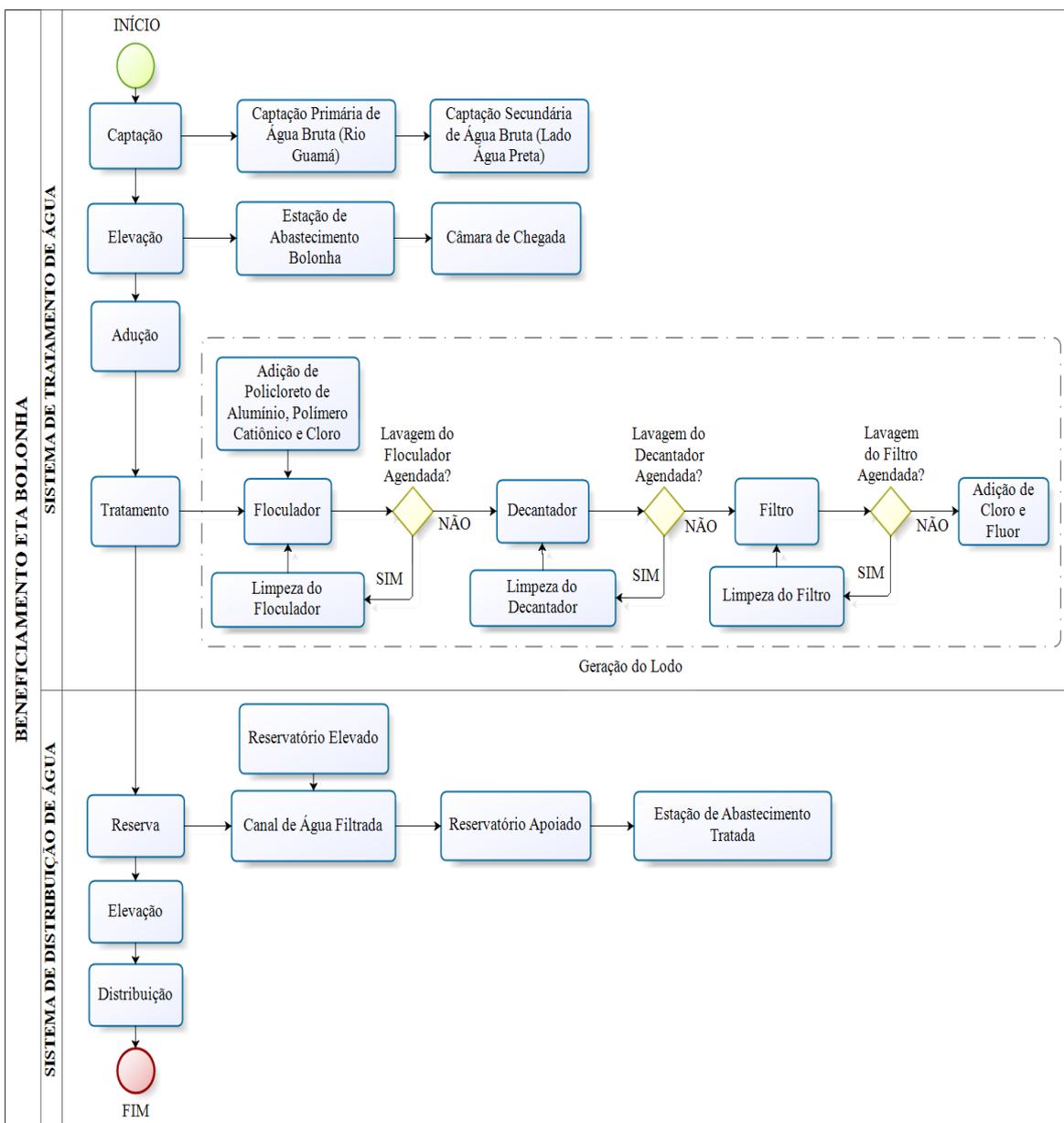


Figura 2.5 – Beneficiamento do lodo da ETA Bolonha

Fonte: Autora, 2019

### 2.3.3 Classificação do Resíduo

De acordo com Mattos e Girard (2013), ao caracterizarem os resíduos provenientes dos decantadores e da água de lavagem dos filtros da ETA Bolonha alegaram obter concentrações de sólidos totais de 3.227 mg/L e 195 mg/L, respectivamente, indicando que o quantitativo de resíduos gerados (massa seca) por mês é de 100 toneladas para uma vazão de 4 m<sup>3</sup>/s que são lançados mensalmente no corpo hídrico sem tratamento e que impactam negativamente o local.

Adicionalmente, apresentaram os produtos químicos utilizados na ETA Bolonha nas fases iniciais de tratamento na ocasião da pesquisa (Tabela 2.2). Atualmente, os produtos químicos utilizados na coagulação/floculação são o policloreto de alumínio e o polímero de poliacrilamida como coagulante auxiliar (MATTOS e GIRARD, 2013).

Tabela 2.2 – Produtos químicos utilizados na ETA Bolonha

<b>Produto Químico</b>	<b>Produto de Aplicação</b>	<b>Dosagem</b>
Sulfato de alumínio líquido	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

Fonte: Mattos e Girard (2013)

A caracterização microbiológica e físico-química do lodo de decantadores de ETAs realizada comprova o potencial poluidor deste resíduo e aponta a necessidade de tratamento a fim de minimizar os danos ao ambiente e proteger a saúde pública. No país, apesar da prática de disposição inadequada destes resíduos não ser um problema recente, o tratamento ainda é visto como novidade e deixado em segundo plano na implantação de estações de tratamento de água (DAS NEVES BURGO *et al.*, 2015).

### 2.3.3 Aplicação do Resíduo de ETA

Na Tabela 2.3 é possível analisar alguns estudos desenvolvidos com diversas aplicações do resíduo de lodo de eta (RETA) no Brasil e no mundo.

Tabela 2.3 – Estudos desenvolvidos com RETA

<b>Autores</b>	<b>Local de Origem</b>	<b>Aplicação do resíduo de ETA</b>	<b>Teores Utilizados</b>
Huang e Wang (2013)	Taiwan	Agregado miúdo	0,5 a 15%
Wolff, Schwabe, e Conceição, (2014)	Minas Gerais, MG	Cerâmica vermelha	50; 55; 65; 75; 85 e 100%
DAHOU <i>et al.</i> , (2017)	Rabat, Marrocos	Síntese de clínquer de cimento Portland	2,8 e 7%
BENLALLA <i>et al.</i> , (2015)	Rabat, Marrocos	Cerâmica estrutural	5; 10; 15; 20; 25 e 30%
Rocha (2016)	Porto Velho, PR	Argamassa	1; 2; 3; 4; e 5%
Silva (2016)	Belém, PA	Agregado sintético	75 e 80%
KIZINIEVIČ <i>et al.</i> (2013)	Vilnius, Lituânia	Cerâmica vermelha	5 a 40%
El-Didamony, Khalil, e Heikal, (2014)	Zagazig, Egito	Materiais de construção civil	----
Sampaio, (2017)	Porto, Portugal	Concreto	5; 10 e 20%
Nowasell e Kevern, (2015)	Kansas, USA	Concreto	----

Fonte: Autora, 2019

Em estudo realizado por Dahhou *et al.* (2017), trataram da incorporação do lodo na farinha crua para a síntese de clínquer de cimento Portland. Para este fim, duas porções cruas são preparadas com diferentes teores de lodo (2,8 e 7%). Os resultados das análises químicas e mineralógicas e da microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelaram conteúdo fino de mineralogia de clínquers de Portland calcinados a 1450 e 1500 °C.

Conforme a Figura 2.6, se tem a imagem obtida das argamassas nomeadas de cimento 1 e cimento 2, que contem 2,8 e 7% de RETA, respectivamente. As argamassas foram preparadas com base em cimento sintetizado a diferentes temperaturas após 28 dias de endurecimento: A (cimento 1) 1300 °C; B (cimento 1) 1400 °C; C (cimento 1) 1450 °C; D (cimento 1) 1500 °C; E (cimento 2) 1300 °C; F (cimento 2) 1400 °C; G (cimento 2) 1450 °C; H (cimento 2) 1500 °C (DAHOU *et al.*, 2017).

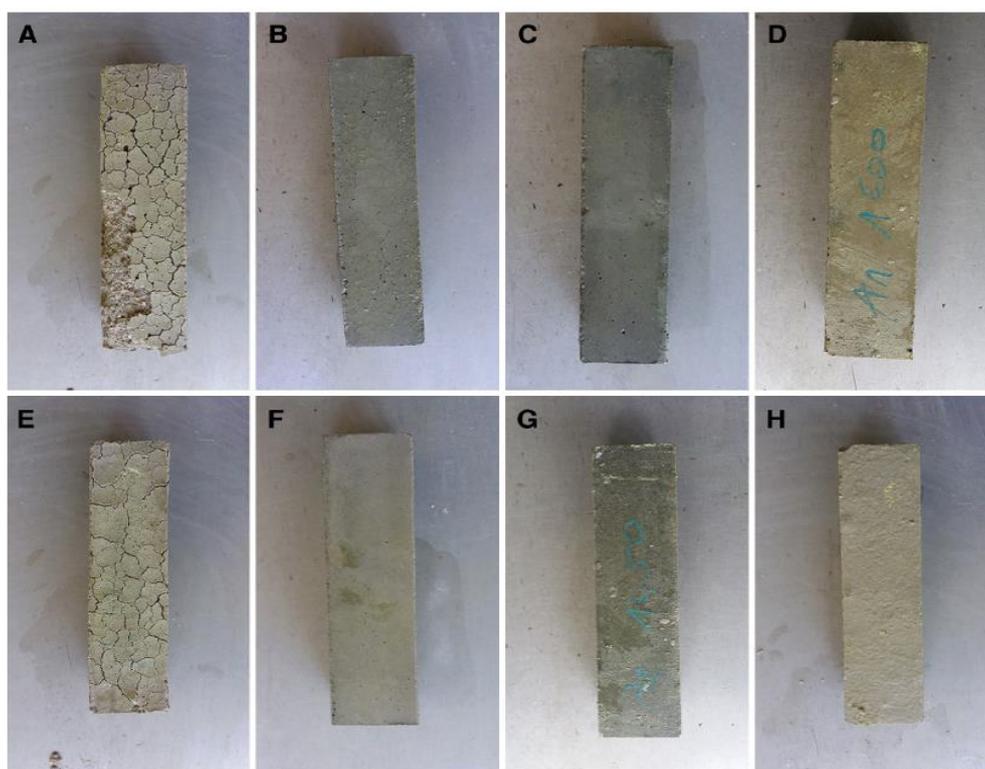


Figura 2.6 - Argamassa preparada após 28 dias de endurecimento  
Fonte: Dahhou *et al.* (2017)

Ainda segundo Dahhou *et al.* (2017), considerando os dados produzidos no estudo, concluiu-se que o RETA é capaz de substituir certas frações de matérias-primas de cimento Portland na preparação de clínquer. A composição de clínquer preparados entre 1450 °C e 1500 °C revelaram-se idênticos aos dos clínquers mineralógicos e do cimento Portland. A resistência à compressão e à resistência à flexão da argamassa preparada a partir de

cimentos sintetizados a 1450 e 1500 °C são relativamente maiores do que o cimento Portland.

No estudo de Huang e Wang (2013), é avaliado o possível uso de RETA para a produção de agregados leves e concentra-se nas propriedades de engenharia do concreto feito a partir desta produção. Os experimentos neste estudo envolvem 10 lamas de dez usinas de tratamento de água em Taiwan. Conforme a Tabela 2.4, as lamas coletadas da planta Hsing-Zu se mostraram satisfatórias para a produção de agregado leve estrutural e não estrutural em grande escala usando forno rotativo comercial.

Tabela 2.4 – Comparação entre os resultados da densidade e força da areia

Mistura	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )		Resistência à compressão (MPa)		Força de tração (MPa)	
	Medição	ASTM C-330 (máximo)	Medição	ASTM C-330 (mínimo)	Medição	ASTM C-330 (mínimo)
-	-	1840	-	27.5	-	2.3
L40	1789	-	43.2	-	4.6	-
-	-	1760	-	20.7	-	2.1
L45	1755	-	39.9	-	4.1	-
L50	1730	-	39.0	-	3.8	-
L55	1714	-	33.8	-	3.3	-
L60	1709	-	29.0	-	2.9	-
L65	1694	-	24.8	-	2.5	-
-	-	1680	-	17.3	-	2.1

Fonte: Huang e Wang (2013)

As agregações resultantes possuíam uma densidade de partículas de 1,35 g/cm<sup>3</sup> ou 0,98 g/cm<sup>3</sup> e uma densidade aparente de 726 kg/m<sup>3</sup> ou 518 kg/m<sup>3</sup> para a utilização estrutural e não estrutural, respectivamente. O agregado leve estrutural cumpriu os requisitos da ASTM C330, com uma densidade aparente inferior a 880 kg/m<sup>3</sup> para agregado leve e grosseiro e foi considerado apropriado para concreto estrutural (HUANG e WANG, 2013).

Em estudo Rocha (2016), com amostra de RETA da região de Ji-Paraná, as dosagens de lodo foram empregadas nas proporções de 1, 2, 3, 4 e 5% de lodo, nos traços 1:8 e 1:7, de cimento e areia, respectivamente. Os resultados indicaram que a utilização de 5% de lodo não é viável, visto que nessa proporção não ocorre o endurecimento do material Cimentício.

A Tabela 2.5 apresenta os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova (CP's) com a incorporação de 0, 1, 2, 3 e 4% de lodo nos traços 1:8 e 1:7, curados durante 28 dias (ROCHA, 2016).

Tabela 2.5 – Resultado dos ensaios de determinação da resistência à compressão

	Traço 1:8					Traço 1:7				
	Quantidade de Lodo Incorporado					Quantidade de Lodo Incorporado				
	0%	1%	2%	3%	4%	0%	1%	2%	3%	4%
Cp 1	1,25	0,85	1,45	1,20	0,85	1,70	1,60	1,50	1,30	0,85
Cp 2	1,65	1,60	1,40	1,30	1,00	1,45	1,60	1,45	1,40	0,60
Cp 3	1,80	1,30	1,90	1,15	0,60	1,55	1,40	1,40	1,45	0,30
Cp 4	1,60	1,65	1,35	1,05	0,80	1,45	1,15	1,35	1,50	0,20
Média (MPa)	1,57	1,35	1,52	1,17	0,81	1,54	1,44	1,42	1,41	0,49
Desvio Padrão (Mpa)	0,23	0,37	0,25	0,10	0,17	0,12	0,21	0,06	0,09	0,30

Fonte: Rocha (2016)

Os ensaios de resistência a compressão indicaram que o traço 1:7, onde a quantidade de lodo utilizada é menor, apresenta resistência a compressão superior ao traço 1:8, apresentando também uma menor absorção de água, sendo que os melhores resultados ocorreram com a incorporação de 1, 2 e 3% de lodo. Diante dos resultados concluiu-se que a incorporação do lodo nessas proporções torna o material aceitável para o uso em material Cimentício (ROCHA, 2016).

Na produção de cerâmica vermelha, em pesquisa desenvolvida por Kizinievič *et al.* (2013), foi analisada a aplicação e influência do lodo de ETA sobre as propriedades físicas e mecânicas, parâmetros estruturais e composição mineralógica dos produtos cerâmicos. A pesquisa foi realizada utilizando o lodo produzido na ETA de Vilnius, na Lituânia. As massas de formação foram preparadas incorporando de 5% a 40% de aditivo RETA e queimado à temperatura de 1000 °C a 1050 °C.

Ainda segundo os autores, a mistura (mistura bruta - MB) da argila e da areia foi utilizada na pesquisa. Esta mistura é a mais utilizada na produção de produtos cerâmicos na Lituânia. O lodo de tratamento de água, obtido durante o processo de remoção de ferro da água potável, foi utilizado como aditivo. Seguindo a tecnologia de remoção de ferro da água potável, a água é gasada filtrando-a através dos filtros abertos com aditivos de areia de quartzo, cuja espessura é de 1 a 2 mm.

Como pode ser notado na Figura 2.7, quando a quantidade de aditivo RETA é aumentada na massa de formação, a quantidade de água, necessária para a formação de amostras, aumenta. Isso pode ser explicado por partículas coloidais das lamelas de tratamento de água seca. Essas partículas absorvem muito a água e preservam sua grande

quantidade. Esta quantidade é maior do que a absorvida por partículas de argila (KIZINIEVIČ *et al.*, 2013).

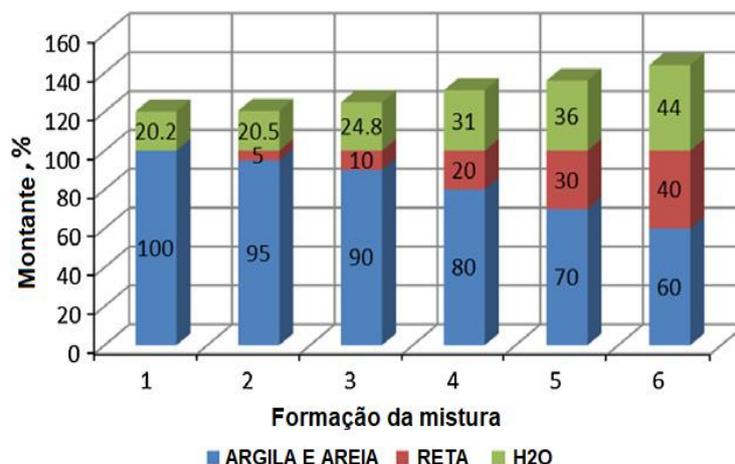


Figura 2.7 - Porcentagem e quantidade de água necessária para as massas de formação.  
Fonte: Kizinievič *et al.* (2013)

A investigação mostrou que as propriedades físicas e mecânicas dos corpos cerâmicos (CC) variam dependendo da quantidade de lodo incorporado: densidade, espessura relativa da parede dos poros e capilares, compressiva diminuição da força, absorção de água e aumento efetivo de porosidade. Verificou-se que o lodo, composto principalmente pelo  $Fe_2O_3$  colorido, pode ser utilizado como um pigmento natural que colore o CC em cor vermelha mais escura e mais intensa (KIZINIEVIČ *et al.*, 2013).

Durante o estudo, foi possível observar que a adição do RETA influencia a cor dos CC, conforme a Figura 2.8. A mudança de cor dos CC analisados demonstra que o lodo participa ativamente e influencia os processos físicos e químicos na cerâmica durante o processo de queima.

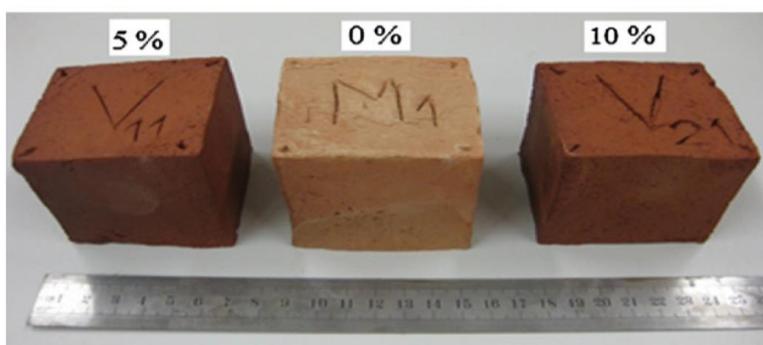


Figura 2.8 - Amostra 1-5% de RETA, amostra 2-sem lodo, amostra 3-10% de RETA  
Fonte: Kizinievič *et al.* (2013)

Em padrões de raios-X, representados na Figura 2.9, foi possível perceber que, quando a maior quantidade de lodo é introduzida na massa de formação e quando o CC é queimado a uma temperatura de 1050 °C, as intensidades de picos de hematita aumentam. Esta tendência notada permitiu concluir que este aditivo de RETA na massa de formação determina a criação da maior quantidade de hematita no CC e muda sua cor desta maneira. Observaram ainda que sílica ( $\text{SiO}_2$ ), anortita ( $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) são minerais típicos criados durante a queima de materiais argilosos (KIZINIEVIČ *et al.*, 2013).

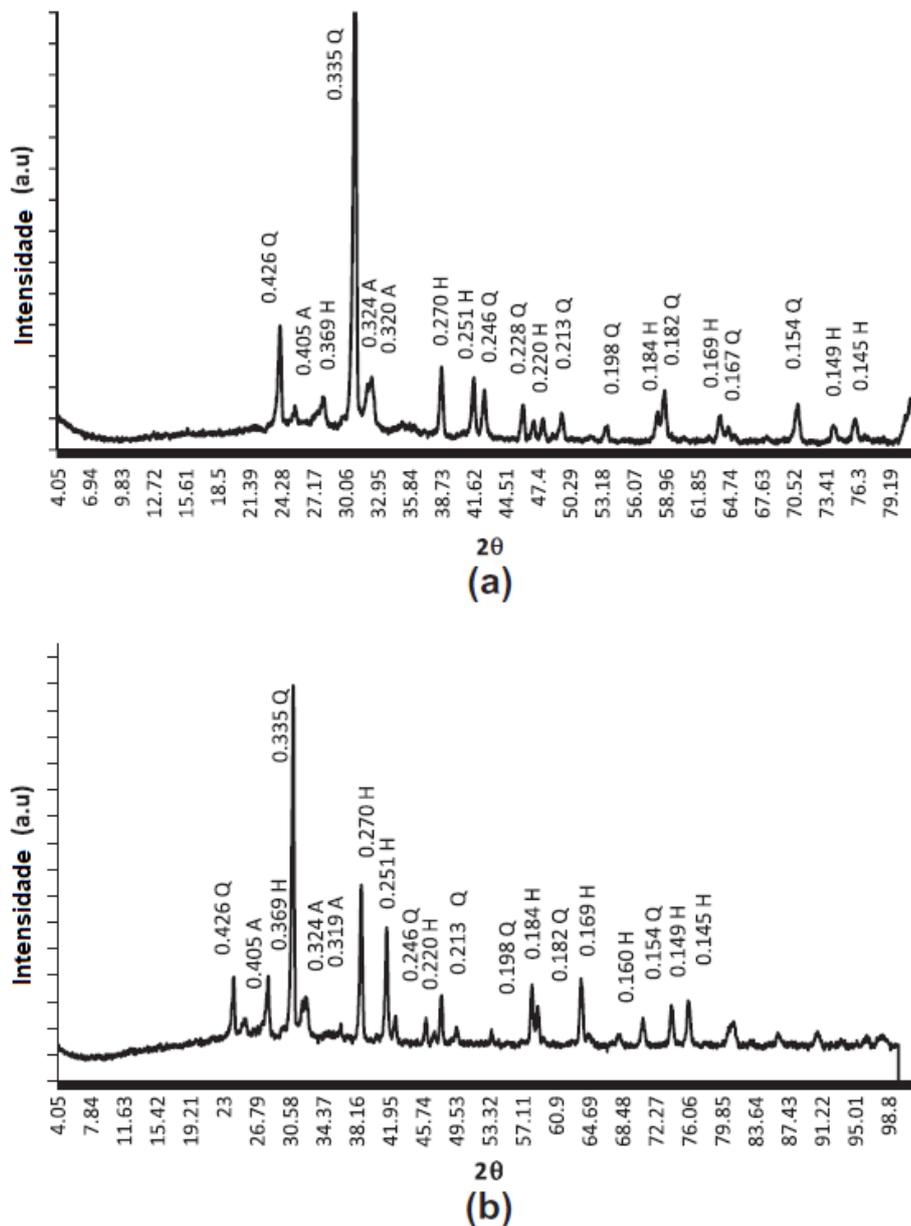


Figura 2.9 - (a) CC com 5% de RETA; (b) CC com 40% de RETA  
 Fonte: Kizinievič *et al.* (2013)

Tabela 2.6 – Composição química dos CC com 5% e 40% de aditivo RETA, % em peso

Corpo cerâmico	Composição química dos corpos cerâmicos (%)								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
Corpo cerâmico com 5% de lodo, queimado a uma temperatura de 1050° C	65.13	12.99	10.26	3.37	1.67	1.33	3.92	1.14	0.2
Corpo cerâmico com 40% de lodo, queimado a uma temperatura de 1050° C	43.17	8.17	35.25	5.29	1.23	1.00	2.35	3.55	–

Fonte: Kizinievič *et al.* (2013)

Segundo Kizinievič *et al.* (2013), a influência de RETA (com grande quantidade de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), nas propriedades de CC, mineralogística, composição química, microestrutura nos permite descrever esta matéria-prima secundária como ambientalmente ecológico, econômico e adequado para ser utilizado na produção de produtos cerâmicos com várias finalidades. Verificou-se que o lodo é aditivo efetivo que influencia propriedades físicas e mecânicas, bem como parâmetros (1 e 2) estruturais do CC:

(1) Após a introdução de 5% do lodo na mistura de argila e a queima de amostras a uma temperatura de 1000 °C ou 1050 °C, cria-se o CC com as seguintes características: densidade seca virtual (bruta) 1807-1995 kg/m<sup>3</sup>, resistência à compressão 48,5-53,8 N/mm<sup>2</sup>, absorção à água 4,6-11,0%, porosidade efetiva 9,1-19,9%. Esta quantidade do lodo aumenta a densidade seca virtual (bruta) do CC de 5% a 14%, a resistência à compressão de 36% a 50%, diminui a absorção de água de 33% a 60%, a porosidade efetiva 19-45%.

(2) Após a introdução de 40% do lodo na mistura de argila e a queima de amostras a uma temperatura de 1000 °C ou 1050 °C, cria-se o CC com as seguintes características: densidade seca virtual (grosseira) 1340-1565 kg/m<sup>3</sup>, resistência à compressão 14-25,9 N/mm<sup>2</sup>, absorção de água 19,8-28,8%, porosidade efetiva 31-39%. Essa quantidade de aditivo diminui a densidade seca virtual (bruta) do CC de 10% a 22%, a resistência à compressão de 43% a 49%, aumenta a absorção de água de 70% para 100%, aumenta a porosidade efetiva em aproximadamente 55%.

As investigações confirmaram que o lodo de tratamento de água com tingimento de óxidos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na sua composição é um aditivo de tingimento intensivo do corpo

cerâmico. Mesmo pequena quantidade de 5% de aditivo de lama corante o CC com uma cor mais vermelha, mais rica e mais escura. A intensidade de cor é amplamente determinada por grande quantidade (aproximadamente 68%) de hematite existente no RETA. Este aditivo de lodo de tratamento de água potável pode ser usado como tingimento volumétrico de produtos cerâmicos, azulejos, tijolos ou blocos (KIZINIEVIČ *et al.*, 2013).

De acordo com BENLALLA *et al.* (2015), que também analisaram a incorporação do RETA na produção de cerâmica vermelha, utilizaram amostras da ETA de Bouregreg, localizada na cidade de Rabat (Marrocos). Nesta indústria, a água é tratada com sulfatos de alumínio e polieletrólitos catiônicos. A proposta do trabalho foi testar as argilas utilizadas na fabricação cerâmica incorporadas com lodo de alumina. As matérias-primas, lodo de alumina e argila, foram misturadas com proporções de 5 a 30%. As amostras destas misturas foram então queimadas a 800, 900 e 1000 °C.

Os resultados obtidos mostraram que as amostras testadas são densas e apresentam alta resistência mecânica, sem deformação ou defeito. As propriedades tecnológicas são compatíveis com as especificadas para tijolos cerâmicos. A proporção de lodo na mistura e a temperatura de queima são os dois fatores principais que afetam a qualidade do tijolo. Na totalidade, a proporção recomendada de lodo no tijolo é de 20%, preparado em misturas revestidas e queimados entre 900 °C e 930 °C para produzir um tijolo de boa qualidade (Benlalla *et al.*, 2015).

Já para Sampaio (2017), que avaliou a viabilidade técnica da utilização de cinza de lodo de ETA para substituição parcial de cimento na produção de argamassa na proporção de 5, 10 e 20%, estudou as características do material produzido através da mistura da cinza com areia, cimento e água, nomeadamente a sua resistência mecânica à compressão axial.

As temperaturas adotadas para na calcinação foram 650, 800 e 1000 °C, para esse efeito, recorreu-se a um forno-mufla mostrado na Figura 2.10a, com capacidade de elevar a temperatura no seu interior até 1200°C. Conforme Figura 2.10b, este processo, embora demorado e dispendioso devido ao seu elevado consumo energético, é de grande relevância para conseguir resultados mais favoráveis na aplicação a ser testada (SAMPAIO, 2017).



(a)

(b)

Figura 2.10 - (a) Forno-mufla utilizado; (b) RETA após o processo de calcinação  
Fonte: Sampaio (2017)

Com os resultados obtidos, o autor concluiu que a cinza de lama de ETA estudada não afeta negativamente a resistência mecânica do betão quando usada como substituto parcial de cimento em pequenas percentagens. No caso estudado da substituição de 5% de cimento por cinza, os resultados mostraram-se até melhores do que no caso da referência (sem cinza). No entanto, parece ocorrer uma diminuição acentuada da resistência do betão quando a substituição é realizada em percentagens superiores a 10% (SAMPAIO, 2017).

## 2.4 ADIÇÃO MINERAL

A indústria do cimento é atualmente considerada uma das maiores poluidoras do meio ambiente, devido seu grande consumo de jazidas de matéria-prima e suas altas taxas de liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Estima-se que para cada tonelada de clínquer a mesma quantidade de CO<sub>2</sub> seja produzida (CAPELLO, 2008).

Segundo o SNIC e a ABCP, citados pela CETESB (2010), em escala mundial, aproximadamente 90% das emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da fabricação do cimento ocorrem durante a produção do clínquer, seja na calcinação ou descarbonatação da matéria-prima, seja na queima de combustíveis no interior dos fornos. A Equação 2.1 mostra como ocorre a descarbonatação do calcário (CaCO<sub>3</sub>), insumo utilizado para a fabricação do cálcio (CaO) necessário à produção do clínquer.



Adições minerais são materiais silicosos finamente divididos, sendo materiais que apresentam atividade pozolânica ou propriedades cimentantes, que podem ser adicionados

às argamassas ou aos concretos visando melhorar suas propriedades (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Sob a perspectiva ambiental, elas atuam reduzindo a produção do cimento e as suas emissões específicas de gases de efeito estufa na atmosfera, como o CO<sub>2</sub>, e o consumo prematuro das jazidas de calcário, além de contribuírem para a reciclagem de rejeitos industriais (BATTAGIN, 2011).

Dal Molin (2011) expõe que as adições minerais atualmente utilizadas são normalmente resíduos provenientes das mais variadas indústrias, que geralmente tem como destino final o meio ambiente, resultando em grandes riscos de poluição. Suas incorporações aos produtos do cimento resultam na produção de materiais cimentícios com melhores características técnicas. Referente 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.

#### 2.4.1 Material Pozolânico

Segundo Lea's (2004), as pozolanas são constituídas essencialmente de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e sozinhas não reagem com a água, mas quando finamente moídas e na presença de água e de hidróxido de cálcio, reagem em temperatura ambiente para formar compostos de silicato de cálcio semelhantes aos que são produzidos na hidratação do cimento Portland.

De acordo com Neville (1997) os cimentos pozolânicos possuem boa resistência a sulfatos e outros ataques químicos destrutivos, isso ocorre devido a reação pozolânica deixar pouco hidróxido de cálcio para lixiviação, também reduz a porosidade da pasta, aumentando a impermeabilidade do compósito.

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define matérias pozolânicos como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Tal norma classifica esses materiais em três classes:

- Classe N - pozolanas naturais e artificiais
- Classe C - cinzas volantes e materiais resultantes da queima do carvão
- Classe E - qualquer pozolana que não pertence às classes anteriores (N e C)

A divisão em classes baseou-se em características físico-químicas previamente determinadas e que definem critérios mínimos para materiais pozolânicos. São apresentadas na Tabela 2.7 as exigências químicas mínimas.

Tabela 2.7 – Exigências químicas mínimas

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

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

Já a Tabela 2.8 apresentam as exigências físicas mínimas presente na NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 2.8 – Exigências físicas mínimas

Propriedades	Classe do material		
	N	C	E
Material retido #325, % máxima	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, % mínima	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	6	6	6
Água requerida, % máxima	115	110	110

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

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. Sua principal reação, que ocorre lentamente, envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), descrita na Equação 2.2 (MEHTA; MONTEIRO, 2008):



Na Figura 2.11 é apresentado um esquema com duas pastas de cimento bem hidratadas, onde: (2.11a) cimento sem adições e (2.11b) com adição de pozolana. Na Figura 2.11a, “A” representa a agregação de partículas de C-S-H pouco cristalinas, “H” representa produtos cristalinos hexagonais na forma de grandes cristais, com largura característica de 1 µm, e “C” representa cavidades capilares e vazios, que variam de 10 nm a 1 µm, ocorrendo normalmente quando os espaços originalmente preenchidos com água não estão totalmente ocupados com os materiais da hidratação do cimento. Na Figura 2.11b, como consequência da reação pozolânica, ocorre a eliminação ou redução de tamanho dos vazios capilares, e os cristais de hidróxido de cálcio foram substituídos por C-S-H aditivo de baixa densidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

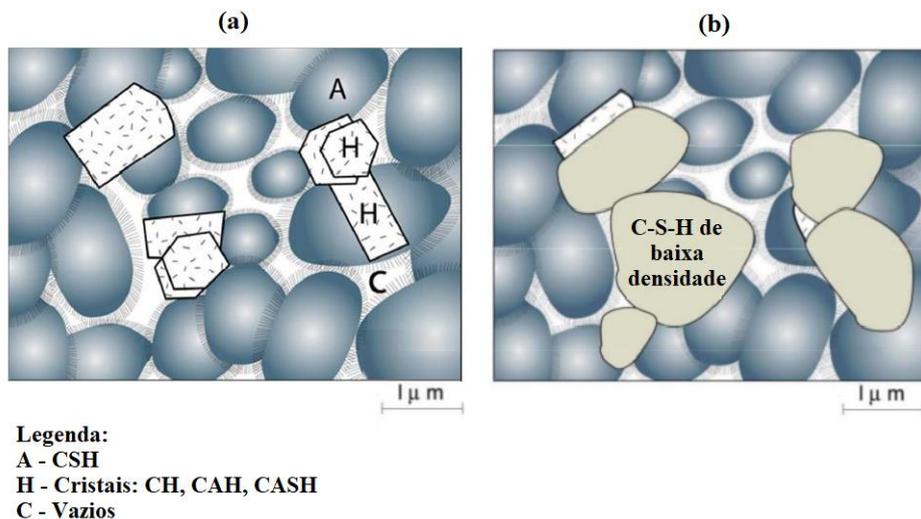


Figura 2.11 - Cimento hidratado (a) sem adições; (b) com adição de pozolana  
 Fonte: Adaptado de MEHTA; MONTEIRO, 2008

Segundo Mehta e Monteiro (2008) as reações pozolânicas apresentam três aspectos relevantes:

- São lentas, liberando calor, o que as torna exotérmicas e desenvolvendo sua resistência de forma lenta, alcançando ao seu valor final aos 91 dias, o que as difere das pastas apenas com cimento, aos 28 dias alcançam 90 a 96% da sua resistência final.
- A sua reação consome o CH ao invés de produzi-lo, o que eleva a durabilidade da pasta.

- Os produtos da reação são eficazes em vedar os poros capilares, como mostrado na Figura 2.11b, melhorando a resistência e impermeabilidade final da pasta, e fortalecendo a zona de transição na interface.

Por outro lado, Netto (2006) expõe que, ainda que possua vantagens, a utilização deste material acarreta também em certas desvantagens. A exigência da utilização de aditivos redutores de água em função do aumento da demanda de água nas misturas e a necessidade de cura adequada para que a reação pozolânica aconteça em sua plenitude, são exemplos de algumas desvantagens da utilização das pozolanas.

#### 2.4.2 Fíler

Dal Molin (2011) conceitua o fíler como um material finamente dividido, com diâmetro médio próximo ao do cimento que, em decorrência da sua ação física, melhora algumas características de concretos e argamassas, quando presente em quantidades inferiores a 15% da massa de cimento. Entre as propriedades melhoradas, cita-se a trabalhabilidade, a massa específica, a permeabilidade e tendência de fissuração.

Melo (2012) explica que geralmente se utiliza calcário finamente moído como fíler a ser adicionado ao cimento, tendo a capacidade de melhorar a distribuição das partículas e preenchendo os vazios entre os grãos do clínquer, melhorando o empacotamento e resistência do sistema, como pode ser visualizado na Figura 2.12.

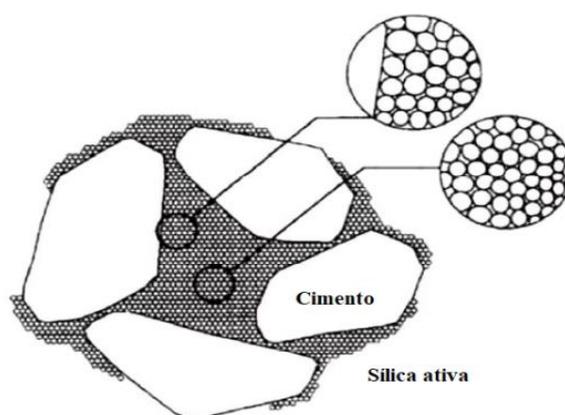


Figura 2.12 - Efeito fíler dos aditivos minerais  
Fonte: (AITICIN 2008, *apud* MELO, 2012)

Ainda que seja tratado normalmente como material inerte, o fíler pode apresentar alguma atividade hidráulica ou participar quimicamente de algumas reações com os compostos do clínquer, como o  $C_3A$ . Atuando também como agentes de nucleação e

acelerar a hidratação do clínquer (SILVA, 2007). Segundo Taylor (1997), aproximadamente 3% do calcário adicionado como fíler reage quimicamente durante a hidratação do cimento, acelerando a hidratação do  $C_3S$ .

A NBR 11578 (1991) limita a quantidade de fíler em 10% para os cimentos Portland compostos, salientando que o material carbonático usado como fíler deve ter no mínimo 85% de  $CaCO_3$ .

## 2.5 AGREGADO

De acordo com Bauer (1992) o agregado é um material particulado, incoesivo e de atividade química praticamente nula, cujas partículas cobrem extensa gama de tamanhos. Segundo o autor, o termo “agregado” é usado na tecnologia do concreto, pois em outros ramos da construção, o mesmo é conhecido, para cada caso, pelo seu nome específico, tal como, fíler, pedra britada, bica-corrída, rachão, etc.

Para Cruz (2002, *apud* PEREIRA, 2015) o agregado é definido como um conjunto de grãos naturais, processados ou manufaturados, que se apresentam em uma sequência de diferentes tamanhos, os quais, interligados por um material aglomerante, formam argamassas ou concretos.

Ribeiro *et al.* (2002) afirmaram que os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados, desempenhando, em consequência, um importante papel do ponto de vista do custo total dos mesmos, já que o agregado é, via de regra, mais barato que o cimento, além de propiciarem uma menor retração das pastas formadas por cimento e água e aumentarem a resistência ao desgaste superficial das argamassas e concretos.

Moravia (2006) enfatizou que um aspecto importante ao se trabalhar com agregados aplicados a construção civil, está fundamentada em sua granulometria e no fator água/cimento pois, exercem influência direta na trabalhabilidade dos concretos, por isso devem ser analisados em conjunto. Pois, quanto menor a granulometria do agregado maior será a quantidade necessária de água para envolvê-los, formando assim uma película d'água com influência direta em uma boa trabalhabilidade.

Segundo La Serna & Rezende (2009), a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) fixa as características exigíveis na recepção e produção de agregados, miúdos e graúdos, de origem natural, encontrados fragmentados ou resultantes da britagem de rochas.

### 2.5.1 Agregado miúdo

De acordo com Ishikawa (2003), o agregado miúdo é a parte inerte ou quase inerte da argamassa e tem a finalidade de reduzir os efeitos de alteração de volume e diminuir o custo de produção. Em argamassas de cal, há uma facilidade referente a penetração do gás carbônico, indispensável para recarbonatação do hidróxido de cálcio.

A norma NBR 7211 (ABNT, 2009) define agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira de 4,75 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm., em ensaio realizado de acordo com a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003) com peneiras definidas pela norma NBR NM ISO c-1 (ABNT, 2010).

A NM 52 (2009) tem por definição de agregado miúdo como a porção que passa na peneira 4,75 mm e fica retida quase totalmente na peneira 0,075 mm.

Com relação à granulometria, a NBR 7211 (ABNT, 2009) diferencia as areias em três zonas de graduação, como apresenta a Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo

Peneira (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores**		Limites superiores***	
	Zona utilizável	Zona ótima*	Zona ótima*	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

\* O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90

\*\* O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20

\*\*\* O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50

Fonte: NBR 7211 (ABNT, 1990)

A NBR 7211 (ABNT, 2009) explica que os agregados devem ser compostos por grãos de minerais duros compactados, estáveis, duráveis e limpos, e não devem conter substâncias de natureza e em quantidade que possam afetar a hidratação e o endurecimento

do cimento, a proteção da armadura contra a corrosão, a durabilidade ou, quando for requerido, o aspecto visual externo.

A fase agregado nas argamassas é a principal responsável pela massa unitária, pelo módulo de elasticidade e pela estabilidade dimensional (METHA; MONTEIRO, 1994).

## 2.6 ARGAMASSA

De acordo com definição estabelecida pela NBR 13281 (2005), argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos ou adições, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

Para Siqueira (2011), as argamassas podem ser classificadas de acordo com o tipo de aglomerante:

- Argamassas simples: contêm apenas um aglomerante, o cimento.
- Argamassas mistas: contêm mais de um aglomerante (cimento e cal);

Para Souza (2013), as argamassas assumem papel importante na conservação do patrimônio edificado, uma vez que preservam a alvenaria contra as ações climáticas, choques mecânicos e atribuem o aspecto de conservação à edificação. Por ter a finalidade de proteger as alvenarias contra as intempéries e agentes nocivos, as argamassas são um dos primeiros elementos construtivos a sofrer degradação.

A NBR 13529 (ABNT, 2013), que trata de termos relativos a revestimentos de paredes e tetos em argamassa, define a composição das mesmas como a mistura de cinco elementos básicos: aglomerante; agregado miúdo, adições, água e aditivos, que por sua vez, tem capacidade de endurecimento e aderência.

Santiago (2007) afirma que a denominação de argamassa como uma mistura de agregado miúdo com aglomerante e água é limitada para descrever a diversidade de materiais que podem ser empregados nesta mistura.

## 2.6.1 Propriedades da argamassa no estado fresco

### 2.6.1.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade é a propriedade que estabelece a facilidade com que as argamassas podem ser misturadas, transportadas e aplicadas, em uma condição homogênea. Está condicionada a combinação de outras propriedades, como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a coesão, a exsudação, a massa específica e a adesão inicial (CARASEK, 2007).

Segundo Baia e Sabbatini (2000) uma argamassa é considerada trabalhável quando:

- Se permite penetrar facilmente a colher de pedreiro, sem ser fluida;
- Mantém-se coesa durante o seu transporte, mas não adere à colher ao ser aplicada;
- Distribui-se facilmente e preenche toda a base;
- Não endurece rapidamente ao ser aplicada.

### 2.6.1.2 Consistência e plasticidade

A consistência da argamassa é a resultante das ações de forças internas, como coesão e ângulo de atrito interno e viscosidade, que regulam a mudança de forma da mistura. Desta maneira, o teor de água, a forma e a textura dos grãos dos agregados e sua granulometria afetam a consistência das argamassas (GOMES, 2008).

Segundo Carasek (2010) a consistência das argamassas pode ser classificada como:

- Argamassa seca: A pasta aglomerante preenche apenas os vazios entre os agregados, deixando-os ainda em contato. Existe atrito entre as partículas o que resulta em uma massa áspera;
- Argamassa plástica: Uma fina camada de pasta envolve a superfície dos agregados, dando boa adesão entre eles;
- Argamassa fluida: As partículas de agregados estão imersas no interior da pasta aglomerante, sem coesão interna e com tendência a se depositar por gravidade (segregação).

A plasticidade pode ser considerada como a propriedade que a argamassa apresenta em reter a deformação, quando diminuído o esforço de deformação imposto sobre ela (CASCUDO; CARASECK e CARVALHO, 2005).

### 2.6.1.3 Retenção de água

A perda da água de amassamento compromete a aderência, a capacidade de absorver deformações e a resistência mecânica (uma vez que a retenção da água permite que as reações de endurecimento da argamassa ocorram gradativamente, promovendo a adequada hidratação do cimento), e, com isso, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

Fiorito (2003) em seus estudos afirma que, para garantir ou melhorar a retenção da água, molhar a superfície de aplicação das argamassas garante que elas não absorvam parte da água de amassamento. Enquanto Carasek (2010) aponta que a presença de cal, na forma de argamassas mistas, e aditivos conseguem melhorar essa propriedade, como pode ser visualizado na Figura 2.13.

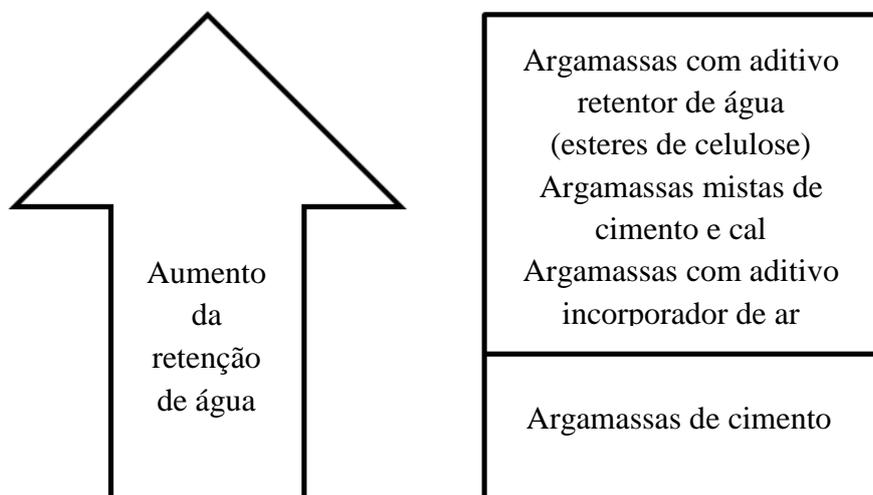


Figura 2.13 - Variação da retenção de água em função da composição das argamassas  
Fonte: CARASEK, 2010

### 2.6.1.4 Densidade de massa e Teor de ar incorporado

A densidade de massa ou a massa específica corresponde à relação entre a massa do material e o seu volume, podendo ser absoluta (desconsiderando-se os vazios existentes) ou relativa. Ela possui fundamental importância para a dosagem das argamassas, uma vez que quanto mais leve mais trabalhável ela será, reduzindo o esforço do operário e contribuindo para o aumento da sua produção.

Carasek (2010) explica que, em relação à densidade de massa no estado fresco, as argamassas são classificadas como:

- Leves: densidade menor que 1,40 g/cm<sup>3</sup>

- Normais: densidade entre 1,40 g/cm<sup>3</sup> e 2,30 g/cm<sup>3</sup>
- Pesadas: densidade maior que 2,30 g/cm<sup>3</sup>

De forma natural, as argamassas apresentam vazios que na maior parte das vezes são criados pelo ar aprisionado durante o processo de mistura, ou provenientes da evaporação da água de amassamento. Quanto maior o teor de ar incorporado, menor a massa específica e maior a trabalhabilidade das argamassas, porém, o excesso de ar incorporado, devido à reduzida ligação entre pasta/agregado pode vir a reduzir a resistência de aderência dos revestimentos.

### 2.6.1.5 Retração por secagem

As retrações por secagem ocorrem por duas maneiras distintas: fissuras prejudiciais ou não (microfissuras). Tais fissuras permitem a percolação da água pelo revestimento quando estiver endurecido e prejudicando a sua função de estanqueidade. A evaporação acelerada da água de amassamento da argamassa e também as reações de hidratação do cimento podem ocasionar as fissuras (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

Santos (2008) elenca alguns fatores que afetam a retração por secagem:

- O respeito ao tempo de sarrafeamento e desempenho.
- A espessura e o intervalo de aplicação das camadas;
- As características e as proporções dos materiais constituintes da argamassa;

As argamassas fracas, que possuem um baixo teor de cimento, estão menos sujeitas às tensões geradoras do surgimento de fissuras prejudiciais no decorrer da secagem, além de trincas e possíveis descolamentos da argamassa já no estado endurecido (BAÍÁ; SABBATINI, 2000).

## 2.6.2 Propriedades da argamassa no estado endurecido

### 2.6.2.1 Densidade da massa

Como exposto por Narciso (2006), a densidade de massa é caracterizada pela relação entre o volume e a massa do CP's, está intimamente relacionado com o material empregado e a quantidade de vazios na estrutura; a densidade da argamassa é diretamente proporcional a densidade dos materiais empregados ou quanto melhor for o arranjo do empacotamento do sistema.

A densidade de massa no estado endurecido é menor do que no estado fresco, motivado pela saída de parte da água. Nessa conjuntura, de maneira geral, é analisada uma relação entre a diminuição da densidade da argamassa no estado endurecido e o seu teor de água (CARASEK, 2010).

### 2.6.2.2 Permeabilidade

Selmo (1989) cita que a permeabilidade é a propriedade que identifica a possibilidade de passagem de água em um material e a qual ocorre das seguintes formas:

- Por difusão de vapor de água através dos condutos capilares.
- Por infiltração sob pressão;
- Por capilaridade, onde apenas pelo contato ocorre a absorção;

Carasek (2010) afirma que argamassa por ser um material poroso, possibilita a percolação de água no estado líquido e no estado de vapor. A permeabilidade é, de maneira geral, a propriedade relacionada à passagem de água pela argamassa no estado endurecido. Controlar a permeabilidade é importante em argamassas, especialmente quando se trabalha em exteriores ou meios úmidos, haja vista que as funções do revestimento é proteger as edificações da infiltração de água. Tal preocupação explica-se pois a umidade infiltrada na parede está relacionada a manifestações patológicas como manchas de bolor e mofo, eflorescências e descolamentos (CARASEK, 2010).

Segundo Baía e Sabbatini (2000), os ciclos de absorção e de evaporação de água ocasionam diferentes dilatações e contrações que podem levar à formação de fissuras e rupturas, isso explicado-se pelos materiais que compõe a edificação, quando apresentam coeficientes de absorção de água diferente. Nesse sentido, o revestimento deve impedir a sua percolação pela água, mas deve ser permeável ao vapor para auxiliar a secagem de umidade de infiltração.

A natureza e a proporção dos materiais que constituem a argamassa, além do tipo de fissuras presentes são alguns fatores que influenciam a permeabilidade (CARASEK, 2010).

### 2.6.2.3 Resistência mecânica

A resistência é a propriedade das argamassas de suportarem ações mecânicas de diferentes tipos. Contrário aos concretos, a resistência à compressão não é tratada como

uma propriedade de fundamental importância para as argamassas, porém sim o controle da sua água para garantir a trabalhabilidade. Entretanto, Roman *et al.* (1999) explicam que as argamassas devem ser resistentes o suficientes para suportar os esforços aos quais a parede será submetida, mesmo que altos valores de resistência não impliquem necessariamente numa parede mais resistente.

Esta propriedade depende do consumo e da natureza de agregados e aglomerantes da argamassa e da técnica de execução, que busca a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento (BAÍÁ; SABBATINI, 2000). Existem ainda outros fatores que interferem na resistência das argamassas, como a energia de amassamento ou o uso de adições (MACIEL *et al.*, 1998).

#### 2.6.2.4 Retração

A retração, segundo Bastos (1997), citada por Santos (2008) é um processo sofrido pelas argamassas principalmente durante suas primeiras idades. Quando no estado endurecido, ela ocorre logo após o endurecimento da argamassa, sendo resultante das reações químicas internas dos aglomerantes (cimento Portland e cal hidratada) e pela perda de água devido à absorção dos produtos da hidratação e no processo de secagem.

Estudos realizados por Fiorito (2003) mostram que, aos sete dias já ocorreu 35% a 45% da retração total, aos vinte e oito dias ocorreu de 50% a 60% e aos cento e vinte dias a ocorrência da retração passa a ser de 80% a 95%.

As argamassas estão sujeitas a três tipos de retrações (GOMES, 2008):

- Retração plástica: ocorre antes da pega da pasta de cimento e é resultante da saída de água por evaporação, onde a sua intensidade depende da umidade relativa, temperatura ambiente, velocidade do ar, localização da argamassa, espessura das camadas e dos materiais constituintes. Neville (1997) afirma que a retirada da água das argamassas, conservadas em ar saturado, causa sua retração por perda de água;
- Retração hidráulica: ocorre após a pega e na fase de endurecimento, sendo afetada pela dosagem, pelo tipo de material empregado, pelas condições de cura assim como pela localização da argamassa;
- Retração autógena ou endógena: ocorre devido às reações químicas dos aglomerantes, sendo a hidratação para o cimento e a carbonatação para a cal

hidratada. Também é consequente da diminuição da água livre nos poros capilares, ocorrendo sem troca de umidade com o meio externo (BARBOSA, 2005).

Quando retrai, a argamassa pode chegar a se desprender da superfície com a qual tenha menor aderência, diminuindo a resistência da parede e afetando a sua estanqueidade. A penetração da água nas fissuras que surgem com a retração propicia o surgimento de microrganismos, como os fungos e bolor, que facilitam o destacamento do revestimento e acabamento (GOMES, 2008).

## 2.7 CIMENTO PORTLAND

Mehta e Monteiro (2008), definem o cimento como um material seco, finamente pulverizado, que por si só não é um aglomerante, mas desenvolve propriedades aglomerantes como resultado da sua hidratação.

Já para Neville (2013), o cimento Portland é o nome dado ao cimento obtido pela mistura íntima de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e materiais que contenham óxido de ferro. Essa mistura é queimada à temperatura de clínquerização, sendo o material resultante dessa queima, o clínquer moído.

Segundo a ASTM C 150 (2012) o cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico obtido com a pulverização do clínquer, o cimento é constituído basicamente de silicatos de cálcio hidráulicos, geralmente com uma ou mais formas de sulfato de cálcio como um produto de adição.

O cimento Portland é um cimento hidráulico, em função de sua dureza que se desenvolve por meio de reações químicas com a água. É empregado principalmente em argamassas e em concreto, para aglutinar, em uma massa contínua, agregados de partículas inertes - areia e/ou brita (CALLISTER, 2014).

O cimento mais utilizado hoje pelo mercado é o do tipo Portland, que consiste essencialmente de silicatos reativos de cálcio, alumina e óxido de ferro. Eles são os responsáveis pela característica adesiva e estabilidade do cimento em meio aquoso, quando hidratado. O calcário e argila são as principais matérias-primas do cimento, sendo as fontes de cálcio e sílica necessárias para a formação de seus compostos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

## 2.7.1 Produção do Cimento

Segundo a ABCP (2018), o cimento Portland é uma das substâncias mais consumidas pelo homem e isso se deve às suas características peculiares, como trabalhabilidade e moldabilidade (estado fresco), e alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo (estado duro).

O processamento do cimento Portland pode ser efetuado de duas maneiras: por via úmida ou seca; sendo mais usada a por via seca, pois é a que possui melhor eficiência energética. As etapas de fabricação do cimento Portland compreendem basicamente a moagem dos insumos, sua mistura nas proporções adequadas, além da queima da sua mistura em um grande forno rotativo até atingir altas temperaturas (1450° C), ocasionando à fusão parcial dos materiais presentes e inúmeras reações químicas resultando num subproduto de estrutura complexa, denominado clínquer (NEVILLE, 1997). Para tal processo é atribuído a denominação de clínquerização.

O clínquer é constituído por nódulos escuros e arredondados de 5 a 25 mm de diâmetro de material sintetizado, com composição química na faixa de 67% de CaO, 22% de SiO<sub>2</sub>, 5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 3% de outros componentes. (BAUER, 2000; TAYLOR, 1990).

As quatro principais fases do clínquer apresentam as seguintes características (TAYLOR, 1990, *apud* COSTA, 2014):

- Alita: representa 50% a 70% do seu volume do clínquer. Quimicamente é composto por silicato tricálcico (Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> ou de forma abreviada C<sub>3</sub>S). Reage rápido na presença de água e é a fase mais importante no desenvolvimento da resistência até os 28 dias;
- Belita: representa 15% a 30% do clínquer e é constituído por silicato dicálcico (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> ou C<sub>2</sub>S). Reage de forma mais lenta que a alita e contribui pouco para resistência até 28 dias. Em idades superiores ocorre uma comparação com fase alita no que diz respeito a resistência;
- Aluminato tricálcico: representa 5% a 10% do clínquer e é constituído por aluminato tricálcico (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ou C<sub>3</sub>A). Reage rápido na presença de água e pode causar uma pega muito rápida se sua reação não for controlada por algum agente externo como sulfato de cálcio;

- Ferroaluminato tetracálcico: representa 5% a 15% do clínquer e é constituído por tetracálcico aluminoferrita ( $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$ ). A taxa de reação com água varia por diferenças na composição, mas geralmente é alta no início da hidratação e lenta em maiores idades.

Após o resfriamento do clínquer, ele é moído até se tornar um pó bem fino, de diâmetro entre 10 e 15  $\mu\text{m}$ , sendo então adicionado um pouco de gesso, resultando no cimento Portland comercial utilizado em todo o mundo.

### 2.7.2 Hidratação do Cimento

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a reação entre a água e os silicatos e aluminatos presentes no cimento anidro sintetizam processo de hidratação. São dois mecanismos de hidratação:

- Mecanismo de dissolução-precipitação: Predomina nos primeiros momentos da hidratação e onde ocorre a dissolução dos compostos anidros e seus constituintes iônicos e a formação de hidratos na solução;
- Mecanismo da hidratação no estado sólido: As reações ocorrem diretamente na superfície dos compostos do cimento anidro sem entrarem em solução.

Rezende (2016), ressalta que o sistema de endurecimento do cimento não é considerado um processo de secagem, e sim de hidratação, e a água está presente efetivamente em uma reação química de agrupamento. O autor afirma ainda que com o início da fase de endurecimento da pasta ocorrem reações no interior da pasta, que geram um material mais coeso e resistente. O endurecimento da pasta segue como produto de uma hidratação adicional, que ocorre de forma lenta, podendo se estender por períodos longos como anos.

A Equação 2.3 e Equação 2.4 demonstram o resultado da reação entre a hidratação do silicato bicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ) e do silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), que geram, respectivamente, silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH):



Ainda que os silicatos  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  produzam os mesmos compostos finais, existe uma enorme diferença na contribuição para a porcentagem de liberação de calor e na

porcentagem de ganho de resistência até os 28 dias. A velocidade de reação é apresentado como uma explicação, uma vez que aos 28 dias, particularmente 70% do  $C_3S$  reage com água, por outro lado, simultaneamente, apenas 30% do  $C_2S$  tem reagido (TAYLOR, 1990).

Para Taylor (1990) os Silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) estão presentes no volume de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratado, representando cerca de 50 a 60% de sólidos, caracterizando-se como o produto mais importante para determinar as propriedades da pasta. Uma das características de sua estrutura é a grande variação em função da relação Ca/Si e do teor de água quimicamente combinada.

O hidróxido de cálcio (CH) também é resultado da hidratação. Representa cerca de 20 a 25% do volume de sólidos de uma pasta completamente hidratada, além de sua estrutura ser bem definida a nível estequiométrico. Possui uma limitação na contribuição para resistência mecânica, visto que possui grande superfície específica, contribuindo ainda de maneira negativa na constância química do composto (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A hidratação do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e do ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) geram experimentalmente os mesmos compostos, uma vez hidratados na presença de sulfatos. O produto cristalino de precipitação pode ser o trissulfoaluminato de cálcio hidratado (AFt ou etringita), este por sua vez está sujeito ao nível da concentração de aluminato e de íons sulfato na solução. Normalmente o primeiro hidrato a cristalizar e colaborar com o endurecimento e desenvolvimento da resistência inicial da pasta é a etringita. Com o consumo do sulfato na solução, a concentração de aluminato aumenta novamente e a etringida se torna instável, sendo transformada de forma gradativa para AFm (TAYLOR,1990).

### 2.7.3 Tipos de Cimento

Segundo Battagin (2011), existem diferentes tipos de cimento Portland comercializados atualmente. O Brasil possui oito tipos básicos normalizados e comercializados com diferentes subtipos, resultando em inúmeras opções e com diversos tipos de utilização. Selecionar o melhor tipo de cimento para determinado serviço demanda perícia e conhecimento das suas peculiaridades. Um resumo dos tipos de cimento comercializados é apresentado na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil

Nome técnico do cimento Portland	Sigla	Classes	Conteúdo dos componentes (%)			
			Clínquer + gesso	Escória	Pozolana	Fíler calcário
Comum	CP I	25, 32, 40	100	-	0	-
Comum com adição	CP I -S	25, 32, 40	99-95	-	1-5	-
Composto com escória	CP II -E	25, 32, 40	94-56	3-34	0	0-10
Composto com pozolana	CP II -Z	25, 32, 40	94-76	0	6-14	0-10
Composto com Fíler	CP II -F	25, 32, 40	94-90	0	0	6-10
Alto-forno	CP III	25, 32, 40	65-25	35-70	0	0-5
Pozolânico	CP I V	25, 32	85-45	0	15-50	0-5
Alta resistência inicial	CP V- ARI	-	100-95	0	0	0-5
Resistente a sulfatos	RS	25, 32, 40	composição depende do tipo original do qual é derivado			
Baixo calor de Hidratação	BC	25, 32, 40				
Branco estrutural	CPB	25, 32, 40	-	-	-	-

Fonte: BATTAGIN, 2011

Os diferentes cimentos mostrados se diferenciam em sua composição química, modificando a quantidade de clínquer, bem como as adições minerais que os constituem. As melhorias e propriedades dos concretos e argamassas, muitas vezes dependem dos tipos e quantidade de adições minerais com os quais são produzidos. 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.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são evidenciados os materiais, bem como os equipamentos utilizados, enfatizando os métodos empregados na caracterização dos materiais e a metodologia para processamento do lodo da Estação de Tratamento de Água Bolonha, localizada em Belém do Pará, com intuito de obter uma destinação comercial ao resíduo, e, por consequência, contribuir para melhoria do meio ambiente.

A pesquisa é caracterizada como experimental, tendo como objeto de estudo o uso e a aplicação do RETA Bolonha. O resíduo, obtido através da coleta do lodo da ETA, é utilizada na composição de argamassas com traços pré-definidos, com intuito de avaliar as propriedades físicas e mecânicas do RETA, enquanto material alternativo.

As variáveis e as formas de controle foram definidas em conformidade com as normas técnicas da ABNT, comparando os resultados das argamassas com diferentes teores de lodo com os da argamassa de referência.

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O estudo para análise da viabilidade técnica do RETA foi dividido em três etapas:

- 1ª ETAPA: Refere-se à caracterização dos materiais utilizados, bem como a caracterização física, química, mineralógica e térmica do RETA, fornecendo dados que servirão de base para a pesquisa, além de serem evidenciadas as investigações adotadas na pesquisa;
- 2ª ETAPA: Diz respeito à produção das argamassas, onde foi definido o traço e as porcentagens de adição do RETA utilizados na pesquisa.
- 3ª ETAPA: São apresentados os ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido, além da análise da microestrutura. A partir da realização dos citados ensaios será possível comparar o desempenho das argamassas padrão e com adição.

A metodologia experimental, esquematizada na Figura 3.1, foi elaborada para facilitar a visualização e compreensão das etapas, ensaios e passos adotados na pesquisa.

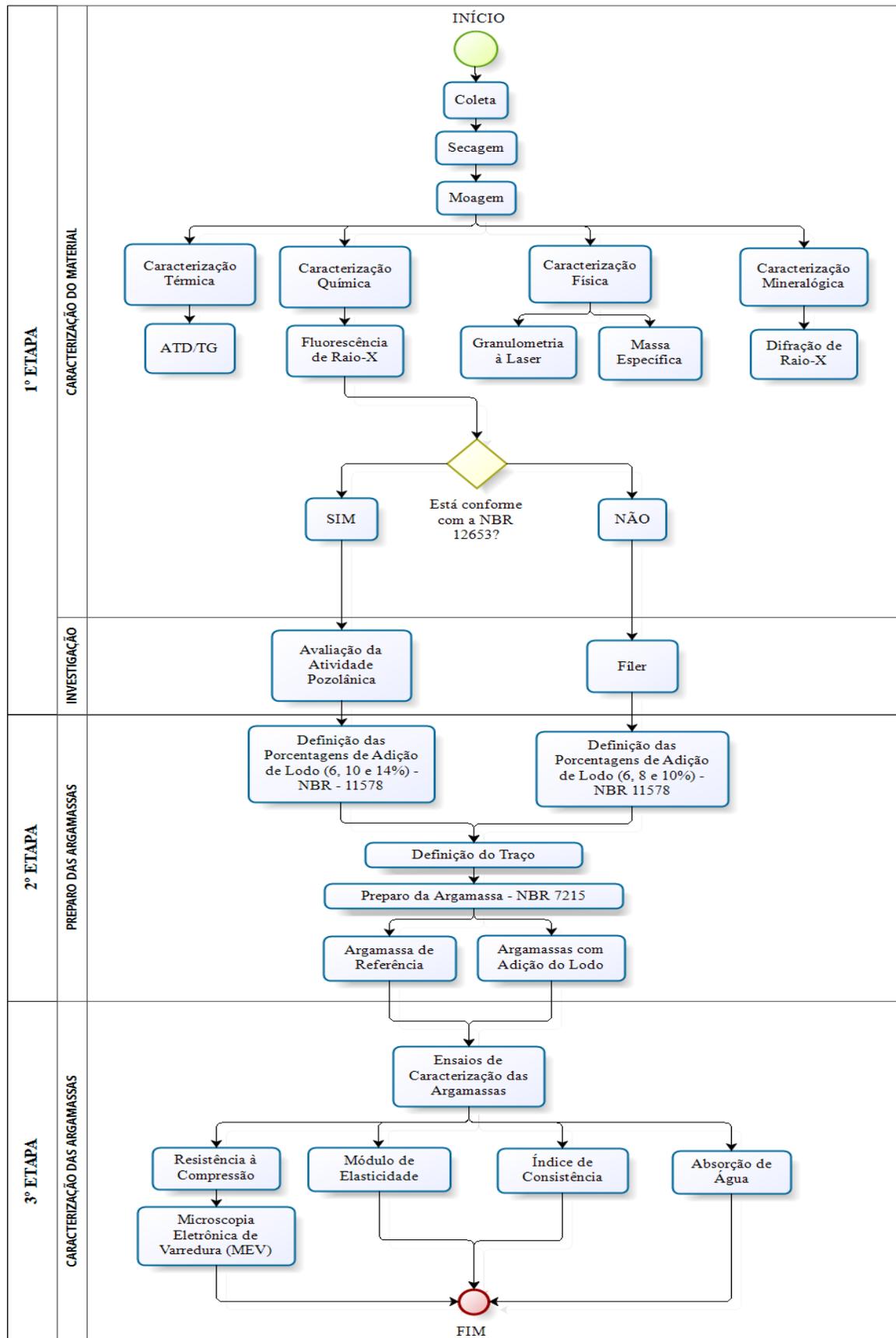


Figura 3.1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa  
 Fonte: Autora, 2019

O lodo da ETA Bolonha foi submetido a diversos ensaios de caracterização, a Tabela 3.1 evidencia o resumo de suas finalidades e normas, quando existentes.

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados, finalidade e referências normativas

<b>Análise Física</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
Granulometria à laser	Estudo da composição granulométrica	-
Massa Específica	Determinação da massa específica	NBR NM 23 (ABNT 2001)
Índice de Consistência	Determinação da trabalhabilidade da argamassa	NBR 13276 (ABNT, 2005)
<b>Análise Química</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
Espectrometria de Fluorescência de Raio X (ED-FRX)	Análise de composição química, quantitativa e qualitativa	NBR 16137 (ABNT, 2016)
<b>Análise Mineralógica</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
Difração por Raio-X (DRX)	Análise mineralógica qualitativa, fases cristalinas da amostra	-
<b>Análise Térmica</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
ATG/DTG	Análise dos eventos térmicos da amostra	-
<b>Análise de Pozolanidade</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
IAP com cal	Potencial reatividade pozolânica	NBR 5751 (ABNT, 2012)
IAP com cimento	Potencial reatividade pozolânica	NBR 5752 (ABNT, 2014)
<b>Análise de Durabilidade</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
Absorção de água por capilaridade	Análise da durabilidade das argamassas	NBR 9779 (ABNT 2012)
<b>Análise Mecânica</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
Resistência à compressão	Análise da resistência mecânica das argamassas	NBR 7215 (ABNT, 1997)
Módulo de elasticidade	Análise da resistência mecânica das argamassas	NBR 8522 (ABNT, 2008)
<b>Análise Microestrutural</b>		
<b>Ensaio</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Norma/ Métodos</b>
Microscopia eletrônica de varredura	Identificar e analisar os poros dentro da pasta e a interação da mesma com o agregado.	-

Fonte: Autora, 2019

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Cimento Portland

Para investigação da atividade pozolânica com cimento aos 28 dias foi utilizado o cimento Portland (CP II-F-32), devidamente especificado pela norma NBR 11578 (ABNT, 1991).

Na Tabela 3.2 são apresentadas as exigências químicas para o cimento Portland Composto.

Tabela 3.2 – Exigências químicas do CP II

Determinações químicas	Limites (% da massa)		
	CP II-E	CP II-Z	CP II-F
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 2,5	≤ 16,0	≤ 2,5
Perda ao fogo (PF)		≤ 6,5	
Óxido de magnésio (MgO)		≤ 6,5	
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )		≤ 4,0	
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )		≤ 5,0	

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991)

Na Tabela 3.3 são apresentadas as exigências físicas para o cimento Portland Comum.

Tabela 3.3 - Exigências físicas do CP II

Características e propriedades	Unidade	Limites de classe		
		25	32	40
Finura - Resíduo na peneira 75µm	%	≤12,0	≤12,0	≤12,0
Finura - Área específica	m <sup>2</sup> /kg	≥ 240	≥260	≥ 280
Tempo de início de pega	h	≥ 1	≥ 1	≥ 1
Expansibilidade a quente	mm	≤5	≤5	≤5

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991)

Na Tabela 3.4 são apresentadas as exigências mecânicas para o cimento Portland Comum.

Tabela 3.4 - Exigência mecânica do CP II

Resistência à compressão	Unidade	Limites de classe		
		25	32	40
3 dias de idade	MPa	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0
7 dias de idade	MPa	≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0
28 dias de idade(A)	MPa	≥ 25,0	≥ 32,0	≥ 40,0

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991)

Para investigação do aproveitamento do lodo da ETA Bolonha como fíler ao cimento Portland foi utilizado o cimento Portland Comum (CP I), devidamente especificado pela norma NBR 5732 (ABNT, 1991), uma vez que tal cimento não possui adições minerais além do gesso, objetivando desta forma não interferir nos resultados desta pesquisa.

Na Tabela 3.5 são apresentadas as exigências química para o cimento Portland Comum.

Tabela 3.5 – Exigências químicas do CP I

Determinações químicas	Limites (% da massa)	
	CP I	CP I-S
Resíduo insolúvel (RI)	≤ 1,0	≤ 5,0
Perda ao fogo (PF)	≤ 2,0	≤ 4,5
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,5	≤ 6,5
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	≤ 4,0	≤ 4,0
Anidrido carbônico (CO <sub>2</sub> )	≤ 1,0	≤ 3,0

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991)

Na Tabela 3.6 são apresentadas as exigências físicas para o cimento Portland Comum.

Tabela 3.6 - Exigências físicas do CP I

Características e propriedades	Unidade	Limites de classe		
		25	32	40
Finura - Resíduo na peneira 75µm	%	≤12,0	≤12,0	≤12,0
Finura - Área específica	m <sup>2</sup> /kg	≥ 240	≥260	≥ 280
Tempo de início de pega	h	≥ 1	≥ 1	≥ 1
Expansibilidade a quente	mm	≤5	≤5	≤5

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991)

Na Tabela 3.7 são apresentadas as exigências mecânicas para o cimento Portland Comum.

Tabela 3.7 - Exigência mecânica do CP I

Resistência à compressão	Unidade	Limites de classe		
3 dias de idade	MPa	≥ 8,0	≥ 10,0	≥ 15,0
7 dias de idade	MPa	≥ 15,0	≥ 20,0	≥ 25,0
28 dias de idade(A)	MPa	≥ 25,0	≥ 32,0	≥ 40,0

Fonte: NBR 5732 (ABNT, 1991)

Para efeito de caracterização foi realizado o ensaio de massa específica conforme a norma NBR NM 23 (ABNT 2001), conforme descritos na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Massa específicas dos cimentos utilizados na pesquisa.

Tipo de Cimento	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
CPI - 25	3,12
CP II -F-32	3,08

Fonte: Autora, 2019

A Figura 3.2 evidencia as curvas granulométricas do cimento Portland CP V, com base nesta análise, será possível inferir se o RETA tem potencialidade para ser utilizado como fíler.

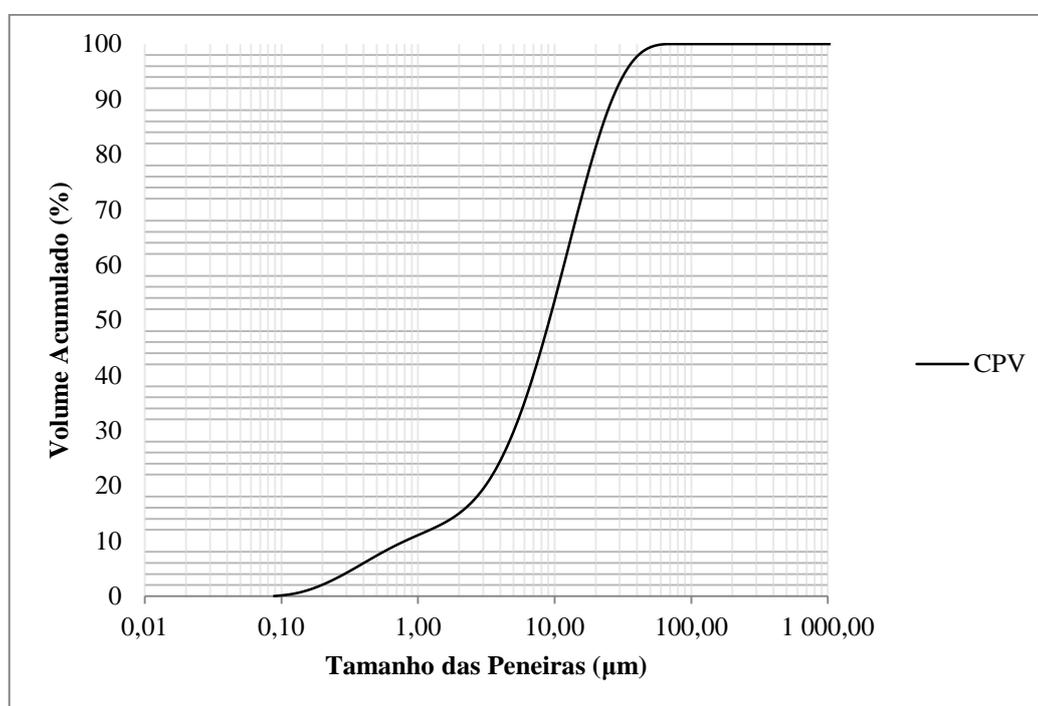


Figura 3.2 – Granulometria à laser do cimento Portlande CP V

Fonte: Viveiros, 2017

Através da análise identificou-se que a amostra do RETA se aproxima com a granulometria do cimento que é de 12,72 µm.

### 3.2.2 Agregado Miúdo

A areia natural do tipo quartzosa utilizada nesta pesquisa é proveniente de leitos de rios próximos a região metropolitana de Belém, tal material é comercializado na referida cidade. A produção de areia normal obedece à norma NBR 7214 (ABNT, 2015).

Serão utilizadas as areias classificadas em quatro frações granulométricas referentes ao material retido entre peneiras de abertura nominal: grossa - 2,4 mm e 1,2 mm; média grossa - 1,2 mm e 0,6 mm; média fina - 0,6 mm e 0,3 mm e fina - 0,3 mm e 0,15 mm. A caracterização da areia utilizada consiste na determinação da massa específica segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009), do módulo de finura e da dimensão máxima segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009). As características físicas do agregado miúdo são apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Caracterização do agregado miúdo natural

Agregado Miúdo				
Peneiras (mm)	Amostra Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma
4,75	0,31	0,03	0,03	
2,36	10,39	1,04	1,07	
1,18	57,06	5,71	6,78	
0,6	120,04	12,00	18,78	
0,3	510,25	51,03	69,81	ABNT NBR NM 248 (2003)
0,15	198,18	19,82	89,62	
Fundo	65,33	6,53	96,16	
	961,56	96,16		
Massa Específica		2,69 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR NM 52 (2009)
Módulo de Finura		1,88 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		1,18 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)

Fonte: Autora, 2019

A curva granulométrica com os respectivos limites superiores e inferiores utilizáveis e limites superiores e inferiores ótimos do agregado miúdo estão apresentados na Figura 3.3.

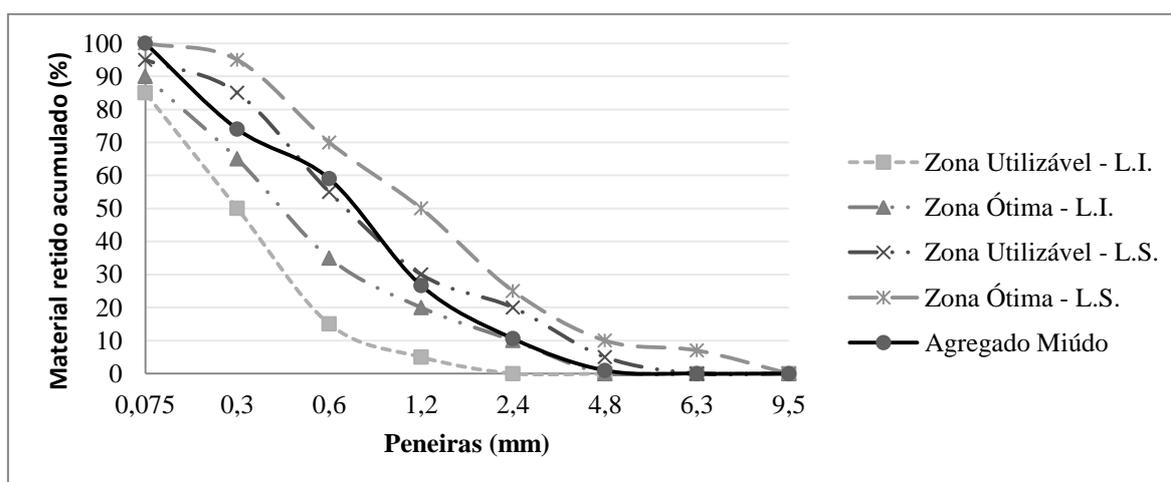


Figura 3.3 – Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211 (ABNT, 2009)

Fonte: Autora, 2019

### 3.2.3 Água

A água utilizada para moldagem dos CP's para a produção de argamassas e cura dos mesmos no presente estudo, é proveniente do sistema de bastecimento próprio da Cidade Universitária Professor José da Silveira Netto - Campus Belém.

### 3.2.4 Lodo de ETA

Aproximadamente 200 litros de lodo foram retirados do tanque de decantação da ETA Bolonha, com permissão do diretor da COSANPA. As coletas foram realizadas nos dias programados para ocorrerem a limpeza dos decantadores e filtros, vale ressaltar que os tanques eram previamente esvaziados, restando apenas o resíduo em seu interior. Posteriormente os resíduos foram encaminhados ao Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA), onde foram armazenados em recipientes plásticos, para serem utilizados neste estudo.

Previamente à produção das argamassas, o lodo passou por um processo de secagem em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 72 horas para obtenção de constância da massa, e, posteriormente, submetidos a um moinho de bolas horizontal, no LEMAC do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA, do qual foi retirado com aspecto de pó. Foi empregado a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg de lodo, sendo 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, segundo a metodologia empregada por Pouey (2006).

## 3.3 MÉTODOS UTILIZADOS

### 3.3.1 Caracterização Física

#### 3.3.1.1 Composição Granulométrica à Laser

A caracterização da composição granulométrica, que tem por objetivo determinar a curva granulométrica e definir o diâmetro médio das partículas do lodo estudado, foi executada através do ensaio de Granulometria à Laser, realizado no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações (LAMIGA) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

A granulometria da amostra foi realizada por difração à laser com auxílio do Granulometro Fritsch, modelo Analysette 22 (MicroTec plus), que possui duas unidades de

dispersão, uma trabalha a seco (Dry Dispersion Unit) e a outra trabalha com dispersão em água (Wet Dispersion Unit), a qual será utilizada.

Inicialmente foi colocado 5 gramas da amostra em um pote de polietileno, em seguida adicionado água destilada para auxiliar na desfloculação e levadas a análise, optou-se em não usar 0,9 g/L do dispersante (pirofosfato de sódio), uma vez que o mesmo é recomendado para argila e não se sabe exatamente o que ele pode causar na amostra em questão.

A aquisição e análise dos dados da distribuição granulométrica das amostra do resíduo do lodo, com moagem de 8 horas no moínho de bolas foi feita com o programa MaScontrol, Fritsch GmbH, versão 0.6.0.77.

### 3.3.1.2 Massa Específica

A massa específica do material caracteriza-se pela razão entre a massa do sólido e o volume ocupado pelo mesmo. A determinação da massa específica do cimento é realizada com base na norma NBR NM 23 – Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará.

As Equação 3.1 será utilizada para encontrar o volume de grãos do cimento e outros materiais em pó.

$$V_g = V_f - V_o \quad (3.1)$$

Onde:

$V_g$  - Volume dos Grãos

$V_f$  - Volume Final

$V_o$  - Volume Inicial

Em posse dos dados referente ao volume de grãos, calcula-se a massa específica do material através da Equação 3.2.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

Onde:

$\rho$  = massa específica do material ensaiado (g/cm<sup>3</sup>);

m = massa do material ensaiado (g);

V = volume deslocado pela massa do material ensaiado (cm<sup>3</sup>).

### 3.3.2 Caracterização Química

#### 3.3.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raio-X (ED-FRX)

Quimicamente, foi verificado a concentração dos elementos químicos pela análise da espectrometria de fluorescência de raio-x. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), na Universidade Federal do Paraná (UFPR), através do envio de uma amostra do lodo da ETA Bolonha previamente seca em estufa a (105 ± 5) °C, moída e passada na peneira de abertura 0,075 mm.

Segundo procedimentos do LAMIR, a composição química do lodo foi determinada em espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Axios Max, da marca PANalytical, o programa utilizado para a interpretação dos dados foi a versão de modelo SuperQ5I.

Caso os índices de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> atendam as exigências químicas presentes na norma NBR 12653, e com os resultados positivos referente ao ensaio para verificação da pozolanicidade, o material poderá ser considerado potencialmente pozolânico. O método utilizado para determinação semi-quantitativa foi de parâmetros fundamentais (FP). O procedimento de preparação da amostra foi o de pastilha prensada, amostra e cera orgânica, ensaio de perda ao fogo a 1000 °C e varredura química.

### 3.3.3 Caracterização Mineralógica

#### 3.3.3.1 Difração por Raio-X (DRX)

A caracterização mineralógica foi ensaiada no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará, por meio de difração de raios X (DRX), com o objetivo de identificar a composição do lodo, principalmente quanto à forma com que se apresentam, seja ela amorfa ou cristalina. Para a análise de DRX o material foi quarteado e parte do pó analisado, os argilominerais foram identificados por comparação das distâncias interplanares.

As análises foram realizadas em difratômetro modelo D8 Advance da Bruker com geometria Bragg-Brentano e detector LynxEye, com tubo de raios-x de Cu com radiação Cu (K $\alpha$ 1=1,540598 Å), voltagem e corrente do tubo de, respectivamente, 40 kV e 40 mA.

A coleta dos difratogramas foi realizada com faixa angular ( $2\theta$ ) = 5-75°. Voltagem do tubo = 40 kV. Fenda do tipo divergente com 0,6mm, Soller com 2,5° e filtro  $K\beta$  de Ni. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0,2s, com tempo total da coleta de 714,4s. A aquisição dos dados foi feita com o programa DIFFRAC.COMMANDER, versão 2.2b, e o tratamento dos dados com o programa X'PertHighScore Plus versão 2.2b, também da PANalytical.

Esta análise auxilia na identificação da estrutura cristalina do material, indicando sua fase mineralógica a partir de comparações entre os difratogramas obtidos do material com difratogramas de banco de dados internacionais. A análise possibilita avaliar a reatividade química do material, indicando, caso apresente-se amorfo, baixa atividade e caso o material esteja cristalino, maior potencial pozolânico.

### 3.3.4 Caracterização Térmica

A análise termogravimétrica (ATG) e a termogravimetria derivada (DTG) foram realizadas no Laboratório de Óleos da Amazônia (LOA) do Parque de Ciência e Tecnologia Guamá da UFPA.

O ensaio foi operado sob taxa de aquecimento 10 °C/min, no intervalo entre a temperatura ambiente a 1000°C, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min, no equipamento de análise térmica simultânea (STA) marca Shimadzu, modelo TDG – 60H, em cadinho aberto de alumina.

O programa utilizado para o tratamento dos dados foi o TA Acquisition, Status – TA – 60Ch.2.DTG – 60H. Para o ensaio utilizou-se a massa inicial de aproximadamente 5 mg de lodo previamente seco e pulverizado, acondicionado em material *ependorf*.

### 3.3.5 Investigação da Atividade Pozolânica (IAP)

Foram utilizadas as normas NBR 5751 (ABNT, 2012) – Materiais pozolânicos, determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias, além da NBR 5752 (ABNT, 2014) – Materiais pozolânicos, determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, e a NBR 5753 (ABNT, 2010) - Cimento Portland, ensaio de pozolanicidade para cimento Portland pozolânico.

Na realização do estudo da investigação da atividade pozolânica tanto com cal aos 7 dias, quanto com cimento Portland aos 28 dias, o preparo das argamassas foi executado com auxílio de um misturador mecânico (argamassadeira) de duas velocidades e

movimento planetário, com capacidade para 5 litros, prescrito pela NBR 7215 (1996). Os procedimentos de mistura adotados foram realizados de acordo com a NBR 13276 (2005), que recomenda para a preparação de argamassas frescas, usar para cada mistura com água, 2,5 Kg de material seco.

### 3.3.5.1 Investigação da atividade pozolânica com cal

Para se avaliar o índice de atividade pozolânica (IAP) com a cal, foram feitas três argamassas, denominadas de IAP<sub>CAL</sub> com a adição de hidróxido de cálcio e do lodo da ETA Bolonha. Para a argamassa foram moldados três CP's cilíndricos com dimensão 50 x 100 mm.

O proporcionamento dos materiais é dado pela NBR 5751 (ABNT, 2012), que especifica as quantidades em massa de cal e de areia normal, e sugere que a quantidade de material pozolânico seja o dobro do volume de cal, levando-se em consideração as densidades de ambos os materiais, conforme Equação 3.3. Os valores das massas específicas do material pozolânico e da cal hidratada, determinados de acordo com a NM 23 (ABNT, 2001), são, respectivamente,  $\delta_{poz}$  e  $\delta_{cal}$ .

$$m = 2 \times \frac{\delta_{poz}}{\delta_{cal}} \times 104 \quad (3.3)$$

Onde:

$m$  – quantidade de pozolana em massa;

$\delta_{poz}$  – massa específica do material pozolânico;

$\delta_{cal}$  – massa específica do hidróxido de cálcio (pode ser fornecido pelo fabricante).

A argamassa foi preparada em um misturador mecânico, sendo inicialmente adicionada uma quantidade mínima de água à mistura anidra de adição mineral e cal, para a homogeneização. Em seguida, o índice de consistência foi verificado através da mesa de espalhamento e esse procedimento foi repetido com adição gradativa da água. A quantidade de água usada para cada mistura foi correspondente a um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm.

A Tabela 3.10 demonstra o resumo dos materiais em massa utilizados para a argamassa devidamente estabelecida pela norma NBR 5751 (ABNT 2012).

Tabela 3.10 – Resumo dos materiais utilizados

<b>Amostra</b>	<b>Material</b>	<b>Quantidade (g)</b>
IAP <sub>CAL</sub>	Hidróxido de Cálcio (Cal)	104,0
	Areia Normalizada	234,0
	Lodo	188,4
	Água 0,05	245,0

Fonte: Autora, 2019

Segundo a NBR 5751 (ABNT, 2012) o procedimento para a cura dos CP`s deve acontecer em duas etapas: nas 24 horas iniciais, os moldes permaneceram em ambiente à temperatura de  $23 \pm 2$  °C. Durante os 6 dias seguintes, foram acondicionados em estufa à temperatura de  $55 \pm 2$  °C. Totalizando os 7 dias os CP`s foram capeados e destinados ao ensaiados de compressão.

A NBR 5751 (ABNT, 2015) estabelece que o índice de atividade pozolânica com cal é o valor da resistência à compressão simples em CP`s com dimensão de 50 x 100 mm, devendo ser maior que 6 MPa para que o material seja caracterizado como pozolana segundo NBR 12653 (ABNT, 2014).

### 3.3.5.2 Investigação da atividade pozolânica com cimento Portland

Na investigação do índice de desempenho com cimento Portland foi utilizado o cimento do tipo CP II-F-32. O ensaio da NBR 5753 (ABNT, 2010) tem o intuito de avaliar se determinado cimento pode ou não ser considerado pozolânico, porém não é ensaio exigido pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

Desta maneira, foram produzidas a argamassa A (IAP<sub>REF</sub>) constituída de cimento CP II-F-32, areia e água, e a argamassa B (IAP<sub>25L</sub>) com a substituição de 25% em massa do cimento pelo resíduo, além de areia e água. Ambas as argamassas seguiram os procedimentos para a moldagem e cura estabelecidos na NBR 7215 (ABNT, 1997).

A Tabela 3.11 demonstra o resumo dos materiais em massa utilizados para cada argamassa devidamente estabelecida pela norma NBR 5752 (ABNT 2014).

Tabela 3.11 – Resumo dos materiais utilizados

<b>Argamassa</b>	<b>Material</b>	<b>Quantidade (g)</b>
IAP <sub>REF</sub>	CP II-F-32	624,0
	Areia Normalizada	1872,0
	Lodo	0,0
IAP <sub>25L</sub>	CP II-F-32	624,0
	Areia Normalizada	1872,0
	Lodo	156,0

Fonte: Autora, 2019

Para o ensaio de resistência à compressão simples, obedecendo a NBR 7215 (ABNT 1996) foram moldados 4 CP`s para a argamassa IAP<sub>REF</sub> e outros 4 CP`s para a argamassa IAP<sub>25L</sub>, sendo ambas ensaiadas nas idades de 28 dias.

Calculou-se o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, utilizando a Equação 3.4, estabelecida na NBR 5752 (ABNT 2014).

$$I_C = \frac{f_{CB}}{f_{CA}} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

$I_C$  – índice de desempenho com cimento aos 28 dias;

$f_{CB}$  – resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com 25% de substituição do cimento Portland por material pozolânico;

$f_{CA}$  – resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento Portland.

### 3.3.6 Produção das Argamassas

#### 3.3.6.1 Definição do Traço da Argamassa

Para melhor analisar os efeitos da substituição parcial do cimento por RETA nas propriedades de argamassas, o traço adotado para o estudo foi 1:3. Vale lembrar que as argamassas produzidas com este traço são devidamente indicadas para serem usadas em alvenaria de bloco de concreto autoportante, alvenaria de pedras irregulares, alvenaria de elementos vazados de concreto, chapisco, assentamento de soleiras e peitoris e base reguladora para pisos.

#### 3.3.6.2 Preparo das Argamassas

Alguns ensaios são necessários para a avaliação da substituição parcial do cimento por RETA, com o objetivo de avaliar as propriedades físicas e mecânicas do material alternativo no estado endurecido. Todos os ensaios de argamassa no estado fresco e endurecido serão realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Para o estudo da investigação do resíduo como fíler, as argamassas foram produzidas com uma betoneira mecânica de eixo inclinado com capacidade de 400 litros, rotação da pá de  $140 \pm 5$  Rr/min, e velocidade do movimento planetário de  $62 \pm 5$  Rr/min.

Foram definidos quatro traços: o de referência que será mencionado como A<sub>REF</sub> e os demais com teores de RETA, 6% (A<sub>6L</sub>), 8% (A<sub>8L</sub>) e 10% (A<sub>10L</sub>), em substituição parcial a massa do cimento Portland.

Na Tabela 3.12 é apresentada a formulação das argamassas utilizadas para a investigação do RETA como fíler e os respectivos teores de adição necessários para o prosseguimento da pesquisa. Tais teores foram escolhidos em virtude da norma brasileira estabelecer um percentual de 6 a 10% de teor de fíler em relação à massa do cimento (NBR 11578, 1997).

Tabela 3.12 - Teores das argamassas

Nomenclatura	Teor de adição de lodo (%)	Traço em volume			
		Cimento	Lodo	Areia	A/C
A <sub>REF</sub>	0	1	0	3	0,50
A <sub>6L</sub>	6	0,94	0,06	3	0,55
A <sub>8L</sub>	8	0,92	0,08	3	0,57
A <sub>10L</sub>	10	0,90	0,10	3	0,60

Fonte: Autora, 2019

Os traços com adição de lodo sofreram aumento na relação água/cimento objetivando respeitar o índice de consistência estipulado ( $270 \pm 10$  mm), além da conservação da homogeneização da massa, uma vez que a mistura perdia a trabalhabilidade devido o material absorver água em excesso, tal comportamento pode ser explicado pela quantidade de finos presentes no resíduo.

Antecedendo o preparo das argamassas, foi feito o cálculo para o levantamento dos materiais a serem utilizados nas misturas. O traço em volume foi convertido para traço em massa com o auxílio da Equação 3.5.

$$1: \frac{P_{lodo} \times \delta_{lodo}}{\delta_{cimento}} : \frac{P_{areia} \times \delta_{areia}}{\delta_{cimento}} : V_{\text{água}} \quad (3.5)$$

Onde:

$P_{lodo}$  = proporção em volume do RETA no traço da argamassa;

$\delta_{lodo}$  = massa unitária do RETA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$P_{areia}$  = proporção em volume da areia no traço da argamassa;

$\delta_{areia}$  = massa unitária da areia ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$\delta_{cimento}$  = massa unitária do cimento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V_{\text{água}}$  = proporção de água necessária para respeitar o índice de consistência estipulado (ml).

Após a mistura das argamassas e determinação dos índices de consistência, foram moldados os CP's para a realização dos ensaios de caracterização preestabelecidos. A quantidade de CP's moldados para cada traço, bem como as dimensões dos moldes utilizados por ensaio, estão descritos na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Especificações dos CP's

Traço	Resistência à compressão (50x100mm)		Absorção de água por capilaridade (50x100mm)	Módulo de elasticidade (100x200mm)
	7 dias	28 dias		
A <sub>REF</sub>	4	4	3	3
A <sub>L6</sub>	4	4	3	3
A <sub>L8</sub>	4	4	3	3
A <sub>L10</sub>	4	4	3	3
Total				56

Fonte: Autora, 2019

Por fim todas as misturas foram adicionadas em moldes predefinidos em suas respectivas normas. Os CP's foram desmoldados e deixados à cura imersa em água saturada de hidróxido de cálcio até as idades dos ensaios. A temperatura e a umidade relativa do ambiente de laboratório foram de  $28 \pm 2$  °C e  $94\% \pm 1\%$ , respectivamente, para todos os ensaios.

### 3.3.7 Caracterização das Argamassas

#### 3.3.7.1 Índice de consistência

Para efeito de avaliação das trabalhabilidade das argamassas com diversos teores de RETA, adotou-se o índice de consistência  $270 \pm 10$  mm. O índice de consistência foi determinado através da mesa de consistência padrão, conforme descrito na NBR 13276 (ABNT, 2005).

A execução do ensaio consiste em previamente limpar o tampo da mesa e a parede do tronco-cônico que deve ser colocado de forma centralizada na mesa para receber a argamassa. Com auxílio de um operador para segurar o molde, encher em três camadas sucessivas e de altura aproximadamente iguais, deve-se aplicar a cada uma delas, respectivamente, 15, 10 e 5 golpes para obter um adensamento homogêneo.

Para o rasamento deve ser utilizada uma régua metálica que será passada rente à borda do molde em um movimento de vai-e-vem, eliminando qualquer partícula em volta ao molde com pano ou esponja úmida. Retira o molde para então aplicar 30 quedas da mesa durante 30 segundos.

A medida do diâmetro da base do tronco de cone de argamassa, após o abatimento, é feita com auxílio de uma régua e expressa em milímetros. O índice de consistência da argamassa é a média aritmética das medidas de três diâmetros ortogonais.

### 3.3.7.2 Absorção de Água por Capilaridade

Foram moldados 3 CP`s sem adição de RETA, estes foram utilizados como referência no ensaio. Em seguida foram moldados 3 CP`s de cada teor de adição, ou seja, 5, 8 e 10%.

Logo após a moldagem, os CP`s permaneceram no molde por 24 horas. Após esse período, foram desmoldados e levados para um recipiente com solução saturada de cálcio em temperatura ambiente por um período de 28 dias para a cura da argamassa.

Após o período de 28 dias, os CP`s foram retirados da água saturada com cálcio e foram determinadas suas massas. Em seguida, os CP`s foram levados diretamente para a estufa com temperatura de  $105 \pm 5$  °C até constância de massa, ou seja, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas do mesmo CP`s, entre períodos de 24h de permanência na estufa, não exceder 0,5% do valor obtido. Após isso, os CP`s foram resfriados a uma temperatura de  $23 \pm 2$  °C e foram determinadas suas massas.

Para a realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, logo após a última pesagem dos CP`s estes foram imersos parcialmente em água. Foi colocado um suporte no fundo do recipiente de modo os CP`s ficassem afastados do fundo e o nível de água permanecesse constante a  $5 \pm 1$  mm acima de face inferior do CP`s, evitando a molhagem de outras superfícies. O recipiente foi posicionado em temperatura ambiente.

Durante o ensaio, foi determinada a massa dos CP`s com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir da colocação destes em contato com a água. Os CP`s eram previamente enxugados com pano úmido antes da pesagem. Completada cada etapa, os CP`s retornavam imediatamente ao recipiente de ensaio.

Após a última pesagem, os CP's foram rompidos por compressão diametral, conforme resistência à tração à compressão diametral NBR 7222 (ABNT, 2011), de modo a permitir a anotação da distribuição de água em seu interior. As determinações das massas dos CPs possibilitaram calcular a quantidade de água absorvida por mm<sup>2</sup> de área de CP de acordo com a Equação 3.6.

$$A_c = \frac{m_c - m_s}{A_s} \quad (3.6)$$

Onde:

$A_c$  = Absorção de água por capilaridade (g/mm<sup>2</sup>);

$m_c$  = Massa do corpo de prova que permaneceu em contato com a lâmina d'água (g);

$m_s$  = Massa do corpo de prova seco (g);

$A_s$  = Área de seção transversal (mm<sup>2</sup>).

### 3.3.7.3 Resistência à compressão e Módulo de Elasticidade

O comportamento mecânico das argamassas com adição do lodo da ETA Bolonha foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil – LEC, da Universidade Federal do Pará, foi mensurado por meio dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e 28 dias e módulo de elasticidade aos 28 dias. A máquina de ensaio utilizada foi a modelo DL200 da marca EMIC, a velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s.

Para medir a resistência à compressão os procedimentos adotados seguiram a NBR 7215 (ABNT, 1997). Para cada traço foram moldados 4 CP's cilíndricos com dimensões de 50 mm x 100 mm. Após a cura foram rompidos aos 7 e 28 dias em prensa mecânica sob carregamento contínuo, sem choques, à velocidade constante durante o ensaio. Para realização dos cálculos foi utilizada a Equação 3.7, os resultados apresentados foram constituídos da média dos valores obtidos do CP's rompidos.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3.7)$$

Onde:

$R_c$  = resistência à compressão (MPa);

$F_c$  = carga máxima aplicada (N).

O módulo de elasticidade foi determinado conforme os procedimentos descritos na NBR 8522 (ABNT 2008). Para cada traço foram moldados 4 CP`s cilíndricos de dimensão 100 x 200 mm. Após a cura foram rompidos aos 28 dias em prensa mecânica sob carregamento contínuo, sem choques, à velocidade constante durante o ensaio. Para realização dos cálculos foi utilizada a Equação 3.8, os resultados apresentados foram constituídos da média dos valores obtidos dos CP`s rompidos.

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

Onde:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade longitudinal secante (N/mm<sup>2</sup>);

$\sigma_b$  = é a tensão maior ( $\sigma_b = 0,30 f_c$ );

$\sigma_a$  = é a tensão básica correspondente à deformação específica  $50 \times 10^{-6}$  (MPa);

$\varepsilon_b$  = é a deformação específica média dos corpos de prova sob a tensão maior (mm/mm).

#### 3.3.7.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS) serão realizadas através de amostras retiradas de fragmentos dos CP`s oriundos do ensaio de resistência à compressão e serão realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia UFPA, o ensaio tem como objetivo identificar e analisar os poros dentro da pasta e a interação da pasta com o agregado.

As análises de MEV e a EDS foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI, modelo TM 3000 Tabletop Microscope. A aquisição e o tratamento dos dados foi feita com o programa SWIFT ED 3000, versão 1.7.

A aplicação de técnicas de microscopia eletrônica de varredura torna possível analisar a estrutura superficial de uma dada amostra, assim como a estrutura dos materiais constituintes de argamassas, até uma escala micrométrica auxiliando na explicação do comportamento mecânico e interpretação dos resultados. Já a espectroscopia por energia dispersiva tornará possível uma análise sobre os elementos presentes na amostra uma vez que cada elemento tem uma assinatura de absorção e outra de emissão.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 4.1.1 Granulometria à Laser

A aquisição e análise dos dados da distribuição granulométrica das amostra do resíduo do lodo, com moagem de 8 horas no moínho de bolas foi feita com o programa MaScontrol, Fritsch GmbH, versão 0.6.0.77, como é possível verificar na Figura 4.1.

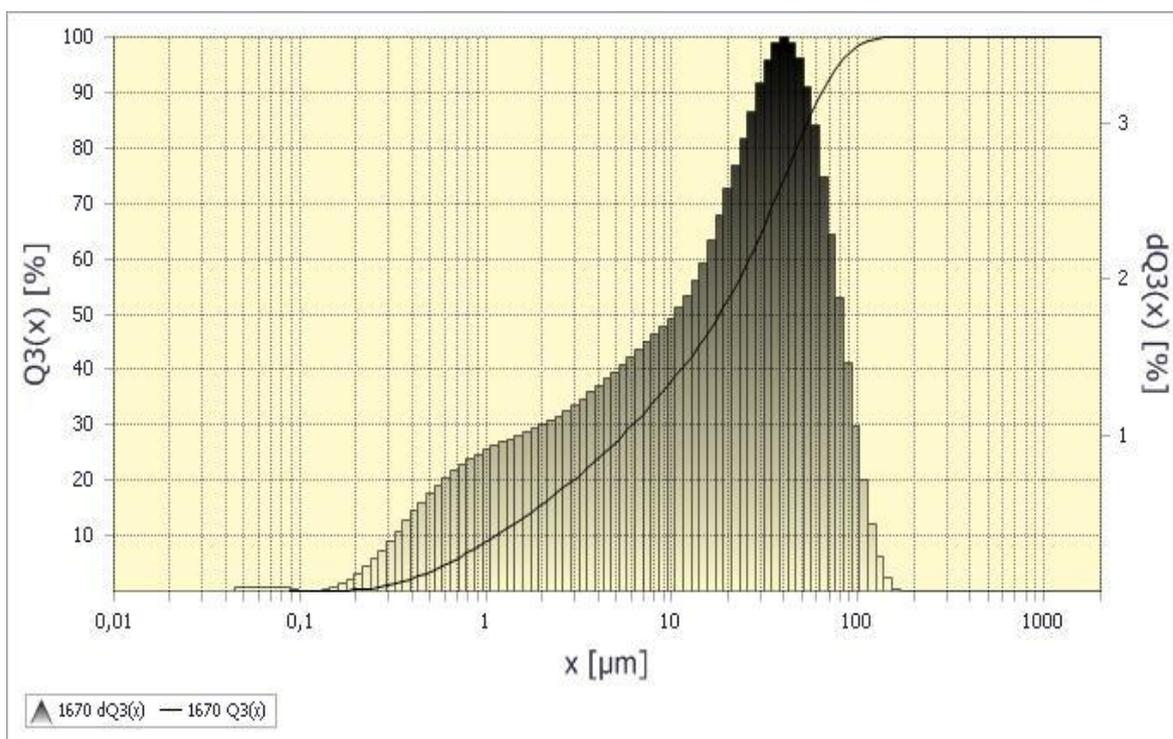


Figura 4.1 - Análise de granulometria à laser das amostras de resíduo de lodo de ETA  
Fonte: Autora, 2019

A curva granulométrica do lodo contendo os diâmetros das suas partículas em função da porcentagem acumulada passante indica que D10 correspondendo a 1,1 $\mu\text{m}$ , D50 de 14,04 $\mu\text{m}$  e D90 de 61,3 $\mu\text{m}$ . Os resultados indicam que o diâmetro do lodo se aproxima ao do cimento, que varia entre 10 e 15 $\mu\text{m}$  (NEVILLE, 1997), indicando a possível característica de filer, proporcionando o preenchimento dos vazios presentes na argamassa e melhorando o empacotamento da matriz cimentícia.

### 4.1.2 Massa Específica

Foram utilizadas amostras para o conhecimento da massa específica do lodo da ETA Bolonha a  $105 \pm 5$  °C. Vale salientar que o resíduo passou por um processo de secagem em estufa à temperatura de  $105 \pm 5$  °C por 72 horas para obtenção de constância da massa. Os ensaios utilizando picnômetro a gás, o resultado da massa específica do lodo está apresentada na Tabela 4.1, e indica que apresenta a menor massa específica entre a areia ( $2,69 \text{ g/cm}^3$ ), bem como dos cimentos CP I ( $3,12 \text{ g/cm}^3$ ) e CP II - F ( $3,08 \text{ g/cm}^3$ ).

Tabela 4.1 – Massa específica do lodo.

Medida	m (g)	V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>médio</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
1 <sup>a</sup>	38,58	18,60	0,40	2,119	2,120
2 <sup>a</sup>	38,60	18,40	0,30	2,120	

Fonte: Autora, 2019

A massa específica do lodo se aproximou do resultado encontrado por Muller (2009) que foi de  $2,182 \text{ g/cm}^3$ . Como o lodo tem massa específica menor que a areia, material em maior proporção no traço, espera-se que as argamassas produzidas com o resíduo, apresentem pequenas reduções nas densidades de massa no estado fresco e endurecido, em relação à argamassa padrão.

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

### 4.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raio-X (ED-FRX)

A busca pelo conhecimento da composição química elementar do RETA, através de equipamento de análise de fluorescência de raios-X por Energia Dispersiva (ED-FRX), mediante o método do pó, indicou a constituição química apresentada na Tabela 4.2. Os resultados obtidos nas análises realizadas no lodo da ETA Bolonha são discutidos na sequência.

Tabela 4.2 - Análise química do resíduo do lodo

Resíduo do lodo	
Composição Química	% massa
SiO <sub>2</sub>	27,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,5
K <sub>2</sub> O	0,9
MgO	0,6
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,6
TiO <sub>2</sub>	0,6
SO <sub>3</sub>	0,5
CaO	0,3
MnO	0,1
Na <sub>2</sub> O	0,1
ZnO	0,1
Cl	< 0,1
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 0,1
ZrO <sub>2</sub>	< 0,1
CuO	< 0,1
SiO <sub>2</sub> +	< 0,1
Perda ao Fogo (P.F.)	29,90

Fonte: Autora, 2019

Verificou-se perda ao fogo do lodo da ordem de 29,90% para a amostra. Esta perda ao fogo, deve-se potencialmente, à presença de águas intersticiais, hidroxilas dos argilominerais e dos hidróxidos existentes. Também, podem ter sido originado da volatilização de componentes da matéria orgânica.

A somatória dos óxidos SiO<sub>2</sub> (27,9%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (24,7%) e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13,5%) na matriz correspondeu a cerca de 66,1% dos componentes químicos totais, os 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 SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 não pode ser classificado como adição mineral pozolânica, uma vez que a somatória de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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%, 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.

Os resultados da análise de fluorescência de raios-X, portanto, não significam que o material seja inerte e sua utilização inviável, apenas que sua reatividade não foi suficiente para atender aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma referente a materiais pozolânicos, podendo ainda ser caracterizado como fíler.

## 4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

### 4.3.1 Difração por Raio-X (DRX)

Observa-se na Figura 4.2 o difratograma do RETA, que é um gráfico do ângulo de espalhamento ( $2\theta$ ) versus a intensidade dos picos de incidência.

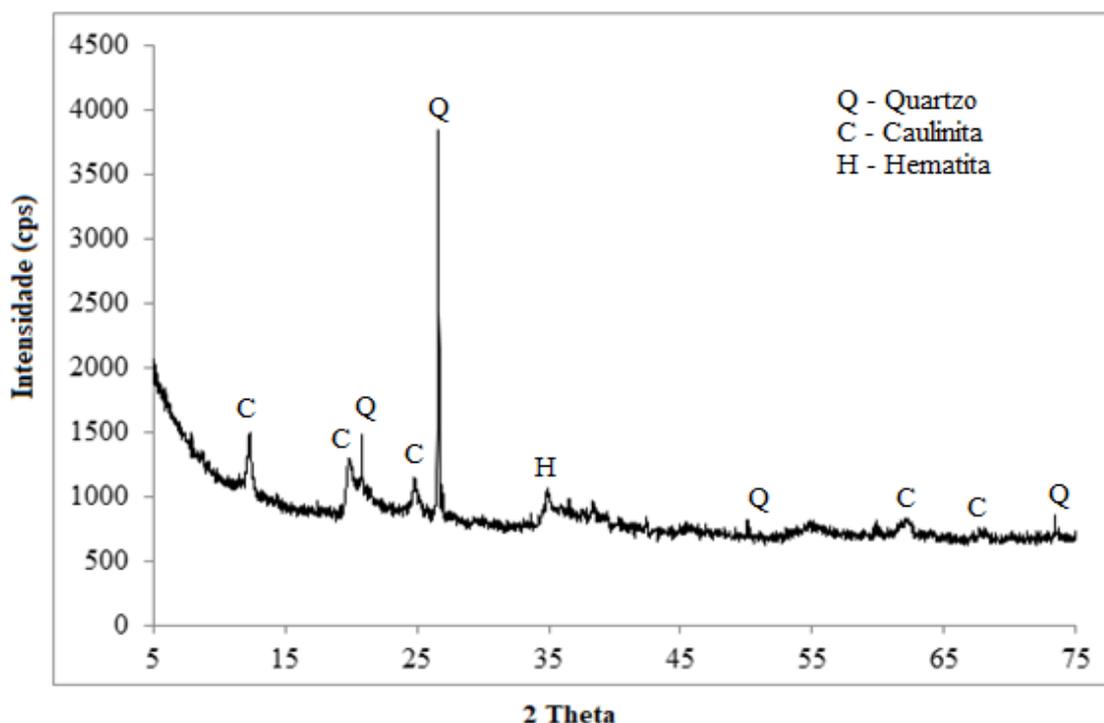


Figura 4.2 - Difratograma de raio X do RETA  
Fonte: Autora, 2019

O gráfico apresenta alguns picos de difração, tais picos indicam, qualitativamente, os principais minerais presentes na amostra, são eles: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), sendo esses resultados similares aos encontrados por Tartari *et al.* (2011), bem como por Araújo (2017).

Pela análise mineralógica pode-se dizer que a lodo da ETA Bolonha é um material predominantemente amorfo, uma vez que a estrutura não têm ordenação espacial a longa

distância. Em seu estudo Muller (2009) também encontrou, em 2 lotes de lodo coletado, predominância de fase amorfa, além da caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) como um dos principais constituintes mineralógicos das amostras.

Pinheiro, Estevão e Souza (2014) também encontraram em sua amostra, principalmente, a presença de picos de difração característicos das seguintes fases cristalinas: caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), principal argilomineral encontrado no lodo de ETA e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

A presença dos elementos evidenciados na amostra pode ser justificada pelo uso do coagulante de sulfato de alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) no tratamento de água e pela própria composição da água, a qual contém materiais em suspensão, como por exemplo a areia e materiais argilosos.

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

A Tabela 4.3 apresenta o comportamento térmico (ATD/TG) do lodo da ETA Bolonha, bem como seus eventos térmicos e seus respectivas parâmetros.

Tabela 4.3 - Análise térmica do lodo.

Parâmetros	Evento			
	Saída de Água Adsorvida	Desidroxilação de hidróxido e decomposição de matéria orgânica	Desidroxilação da caulinita	Formação de espinélios mulita
T (° C)	105,24	363,17	512,44	910
Perda de Massa (%)	6,836	16,907	7,487	-

Fonte: Autora, 2019

Na análise termogravimétrica (TGA) as curvas permitem determinar a temperatura de decomposição e taxa de decomposição em função da temperatura do RETA. As curvas de TGA podem e devem ser derivadas registrando-se a termogravimetria derivada (DTG) que fornece informações da derivada primeira da variação da massa em relação ao tempo ( $dm/dt$ ) ou em função da temperatura ( $dm/dT$ ).

Para a análise da amostra de RETA foi possível evidenciar quatro eventos térmicos, conforme apresentado na Figuras 4.3.

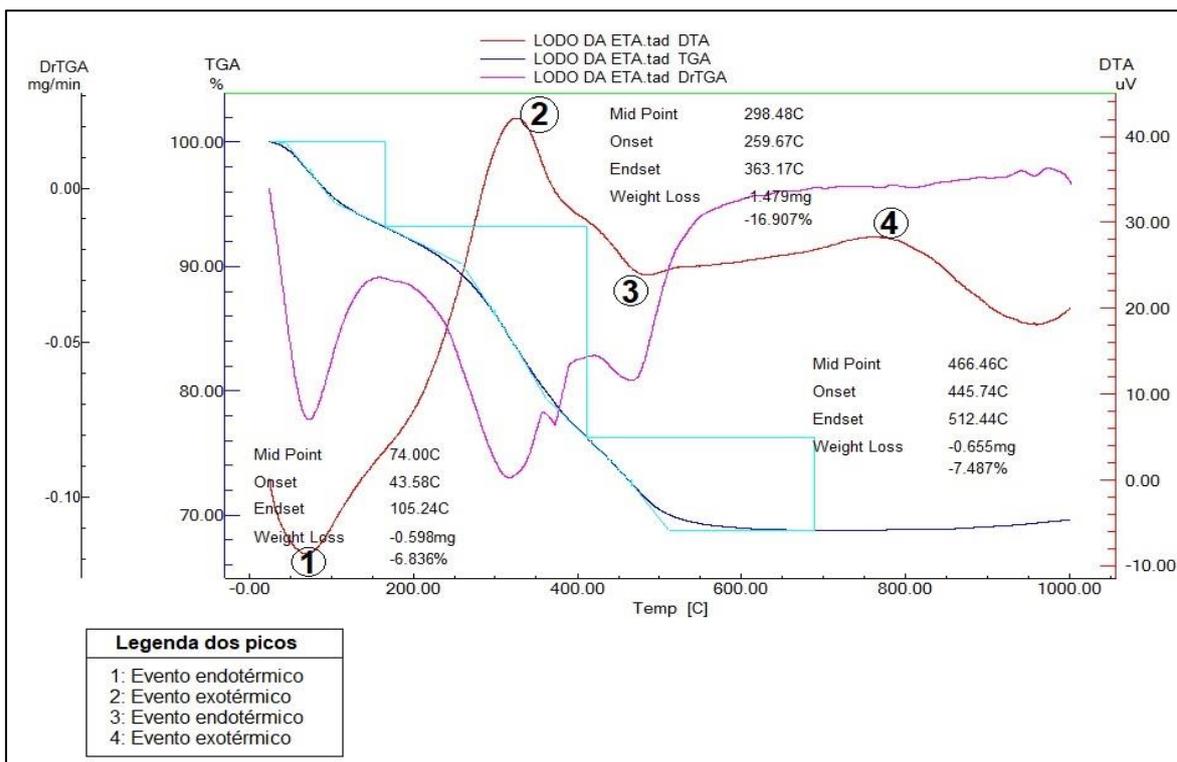


Figura 4.3 – Curva TGA/ DTG do lodo.

Fonte: Autora, 2019

Pode-se observar inicialmente um pico endotérmico, neste primeiro evento a temperatura variou de 43,58 °C a 112,8 °C, com perda de massa 6,836% correspondente a 0,598 mg. Tal perda está normalmente associada à saída de água adsorvida.

No segundo evento ocorreu com temperatura entre 298,48 °C e 363,17 °C relativo a picos exotérmicos. A perda significativa de massa foi de 16,907% o que corresponde a 1,479 mg. Esta perda está potencialmente relacionada a decomposição de matéria orgânica e/ou a desidroxilação da hidróxila, que corresponde a um grupo funcional presente nas bases dos hidróxidos, representado pelo radical OH-.

No terceiro evento ocorreu, com picos endotérmicos, em temperaturas variando de 466,46 °C a 512,44 °C. A amostra de RETA sofreu uma perda de massa foi de 7,63% equivalente a 0,655 mg. Esta perda provavelmente está relacionada à perda de hidroxilas, característico da desidroxilação da caulinita.

O quarto e último pico observado foi exotérmico, a uma temperatura variando de 909° a 925°C. A perda de massa foi constante e próxima a zero para a amostra de RETA em questão. Este pico pode ser devido a quebra da estrutura da metacaulinita para a

formação de novas fases cristalinas tais como  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e/ou mulita primária (SANTOS, 1989).

A perda de massa total da amostra referente ao lodo da ETA Bolonha foi de 31,23%. Silva e Fungaro (2011) para o lodo de ETA de Terra Presta em São Paulo, obtiveram perda em torno de 32% à temperatura de 906 °C. Esta perda foi relacionada devido à eliminação de água adsorvida, hidroxilas, decomposição de alguns materiais constituintes e matéria orgânica (SANTOS, 1997).

## 4.5 INVESTIGAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA (IAP)

### 4.5.1 Investigação da Atividade Pozolânica com cal

Segue abaixo os resultados obtidos para o IAP com cal, a Tabela 4.4 apresenta a resistência à compressão individual e média dos corpos de prova ensaiados.

Tabela 4.4 – Resultado IAP com cal

Argamassa	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Individual (MPa)	Resistência à Compressão Média (MPa)
IAPcal	IAPcal-1	1,08	1,08
	IAPcal-2	0,94	
	IAPcal-3	1,13	

Fonte: Autora, 2019

A Figura 4.4 evidencia a resistência mínima de 6 MPa prevista na NBR 12653 (ABNT, 2014) em relação a resistência média encontrada das argamassas com cal.

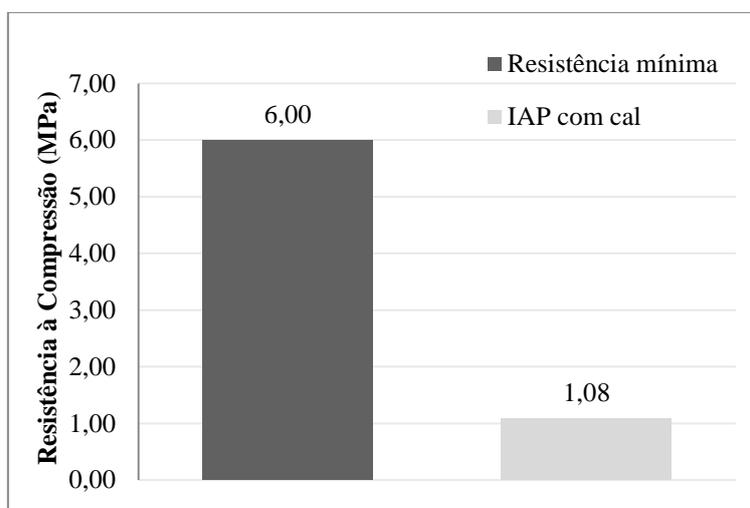


Figura 4.4 – IAP com cal

Fonte: Autora, 2019

## 4.5.2 Investigação da Atividade Pozolânica com cimento Portland

Os resultados obtidos para IAP com cimento Portland aos 28 dias, estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultado IAP com cimento

Argamassa	Corpo de Prova	Resistência à Compressão Individual (MPa)	Desvio Relativo Máximo	Resistência à Compressão Média (MPa)
IAP <sub>REF</sub>	IAP <sub>REF</sub> -1	18,58	3,71%	17,92
	IAP <sub>REF</sub> -2	17,85	-0,36%	
	IAP <sub>REF</sub> -3	16,86	<b>-5,89%</b>	
	IAP <sub>REF</sub> -4	17,98	0,36%	
IAP <sub>25%L</sub>	IAP <sub>25%L</sub> -1	0,98	-2,49%	1,01
	IAP <sub>25%L</sub> -2	1,04	3,48%	
	IAP <sub>25%L</sub> -3	1,03	2,49%	
	IAP <sub>25%L</sub> -4	0,96	<b>-4,48%</b>	

Fonte: Autora, 2019

A Figura 4.5a apresenta a resistência à compressão dos CP's referente ao IAP com cimento e material pozolânico, bem como a Figura 4.5b apresenta o percentual do IAP mínimo previsto pela NBR 12653 (ABNT, 2014).

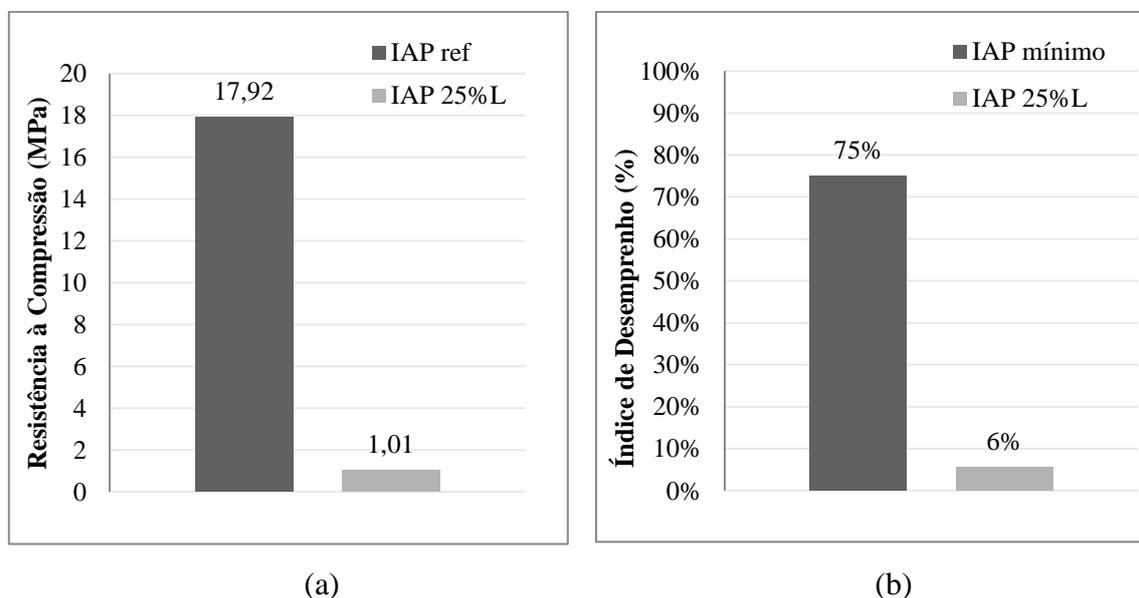


Figura 4.5 – (a) Resistência à compressão; (b) Índice de desempenho com cimento Portland

Fonte: Autora, 2019

O Índice de Atividade Pozolânica para a resistência obtida do lodo da ETA Bolonha foi de 6%, tal valor está muito abaixo do preconizado na norma. Sabe-se que a NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece que a argamassa apresente um IAP  $\geq 75\%$  para que

o material possa ser classificado como pozolânico. Portanto, o valor encontrado não atende a norma supracitada, sendo considerado um resultado insatisfatório.

Os resultados tanto da IAP com cal quanto da IAP com cimento Portland aos 28 dias, reforçam os obtidos na análise química, confirmando a hipótese inicial de que o lodo da ETA Bolonha não se classifica como material pozolânico.

## 4.6 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

### 4.6.1 Índice de Consistência

Os traços com adição de lodo sofreram aumento na relação água/cimento objetivando respeitar o índice de consistência estipulado ( $270 \pm 10$  mm), além da conservação da homogeneização da massa. Para tal não foi necessário o uso de aditivo superplastificante, pois a partir da determinação do índice de consistência normal, todas as argamassas produzidas apresentaram o valor estabelecido.

Tabela 4.6 – Resultado do índice de consistência das argamassas

<b>Argamassa</b>	<b>Medida 1 (mm)</b>	<b>Medida 2 (mm)</b>	<b>Medida 3 (mm)</b>	<b>Consistência (mm)</b>
A <sub>REF</sub>	275	275	270	271
A <sub>6L</sub>	270	265	265	266
A <sub>8L</sub>	265	270	270	268
A <sub>10L</sub>	280	275	280	278

Fonte: Autora, 2019

### 4.6.2 Absorção de Água por Capilaridade

Os resultados referentes a absorção de água por capilaridades estão apresentados pelos valores médios encontrados no ensaio. Na Tabela 4.7 são apresentados os resumos dos ensaios de absorção de água.

Tabela 4.7 – Ensaio de absorção de água por capilaridade dos CP's

<b>Argamassa</b>	<b>Tempo (h)</b>					
	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>24</b>	<b>48</b>	<b>72</b>	
kg/m <sup>2</sup>	A <sub>REF</sub>	0,39	0,41	0,44	0,46	0,64
	A <sub>6L</sub>	0,40	0,42	0,44	0,46	0,59
	A <sub>8L</sub>	0,35	0,37	0,40	0,40	0,55
	A <sub>10L</sub>	0,48	0,51	0,53	0,56	0,67

Fonte: Autora, 2019

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados referentes a absorção de água em kg/m<sup>2</sup> dos CP's de referência e com adição do RETA.

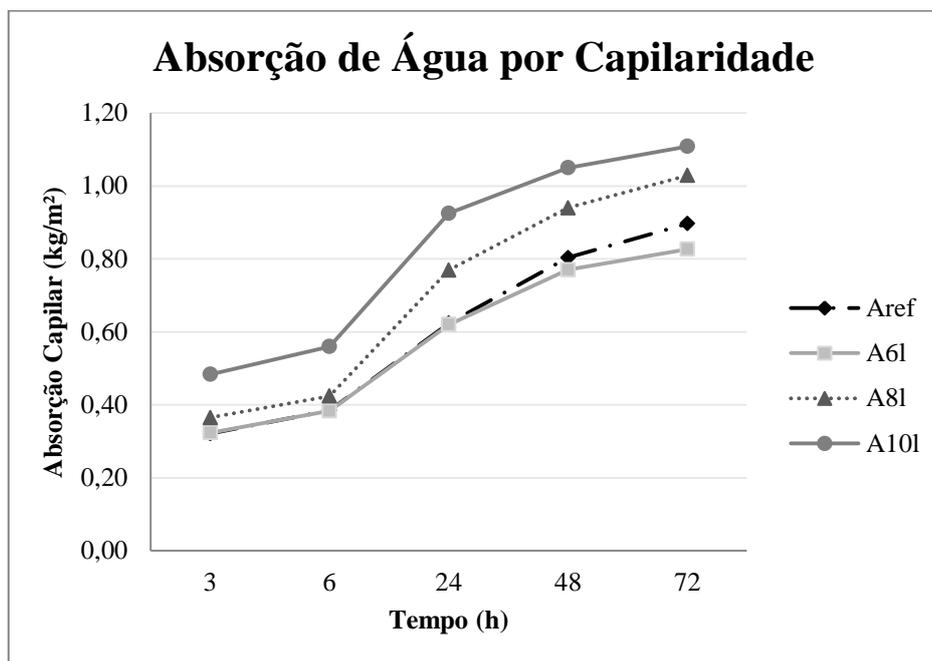


Figura 4.6 – Absorção de água por capilaridade dos CP's  
Fonte: Autora, 2019

Considerando as análises de absorção de água por capilaridade nos CP's cilíndricos, constata-se que as argamassa A<sub>6L</sub> apresentaram melhor eficiência na redução de absorção de água, quando comparadas com a argamassa de referência. Contudo, a argamassa A<sub>8L</sub> e A<sub>10L</sub> mostraram um aumento na absorção em comparação com a de referência.

A Tabela 4.8 expõe, em porcentagem, a redução na absorção de água em relação à argamassa A<sub>REF</sub>.

Tabela 4.8 – Redução na absorção de água em porcentagem dos CP's

	Argamassa	Tempo (h)				
		3	6	24	48	72
Redução da absorção em relação a A <sub>REF</sub> (%)	A <sub>6L</sub>	-0,65	0,35	0,53	4,15	7,81
	A <sub>8L</sub>	-13,60	-10,25	-23,41	-16,98	-14,71
	A <sub>10L</sub>	-50,53	-45,45	-48,41	-30,66	-23,58

Fonte: Autora, 2019

Tomando a medição de 72h como base, a argamassa A<sub>6L</sub> absorveu 7,81% a menos que a de referência, já a A<sub>8L</sub> absorveu 14,71% a mais. A argamassa A<sub>10L</sub> demonstrou ter a

pior eficiência na redução de absorção de água, pois absorveu 23,58% a mais de água em relação à argamassa de referência.

Com isso, fica claro que a argamassa com 6% de adição de RETA obteve melhor desempenho nesse ensaio ao longo de todas as medições, já que, ao final das 72h, absorveu 7,81% a menos que a argamassa de referência. Contudo, esse valor ainda não atende a NBR 16072 (ABNT, 2012) que define uma porcentagem mínima de redução de 50% para que uma argamassa seja considerada impermeável.

A Figura 4.7 apresenta a redução na absorção de água dos CP's com adição de RETA em porcentagem, em relação à referência  $A_{REF}$ .

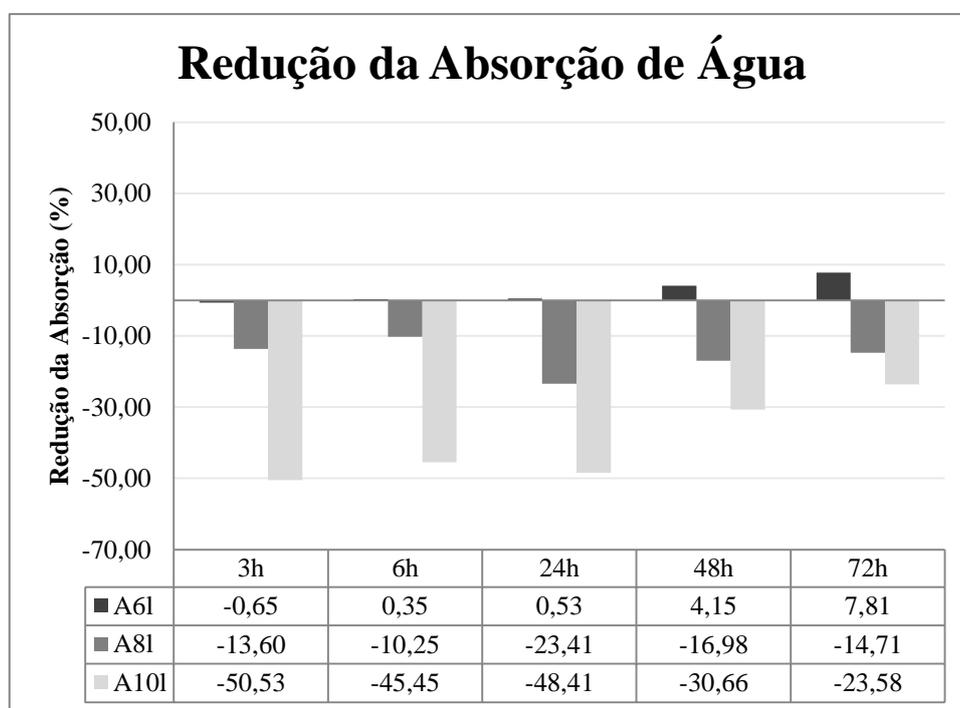


Figura 4.7 – Redução da absorção de água dos CP's  
Fonte: Autora, 2019

Os resultados de Rocha (2016) indicam que a absorção média de água nos corpos de prova foi maior quando utilizado o traço 1:8, onde a quantidade de areia e lodo utilizada foi maior, do que no traço 1:7, ambos com 0, 1 e 2% de incorporação de lodo. A autora concluiu analisando os resultados da absorção média que é possível verificar que o aumento da incorporação de lodo em substituição a areia aumenta a absorção de água da amostra, sendo que a absorção de água reduz o poder de pega do cimento.

Há uma relação entre a absorção de água com a resistência à compressão dos CP's. Com isso, na medida em que aumenta a quantidade absorvida de água pelos CP's, há

ocorrência da diminuição da resistência a compressão. Quanto às respostas da absorção de água por capilaridade, alguns fatores poderiam contribuir para esse resultado. A propriedade física da absorção capilar em concretos e argamassas está intimamente relacionada com a distribuição e tamanho dos poros presentes nesses materiais (POSSER, 2004; SMYL; GHASEMZADEH; POUR-GHAZ, 2016).

#### 4.6.3 Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

Os resultados referentes à resistência à compressão aos 7 e 28 dias estão apresentados na Figura 4.8. Neste ensaio, os resultados são expressos pelo cálculo da média de 4 CP's e apontam que para ambas as idades à adição de RETA no teor de 6% ( $A_{6L}$ ) acarreta aumento da resistência à compressão. O menor valor apresentado para a argamassa com adição foi a de 10% ( $A_{10L}$ ), a argamassa com adição de 8% ( $A_{8L}$ ) teve um aumento na resistência aos 7 dias, porém não manteve o desempenho aos 28 dias. Em relação a argamassa de referência ( $A_{REF}$ ) e a ( $A_{6L}$ ) houve um crescimento de 8,93% aos 7 dias e 3,24% aos 28 dias de idade.

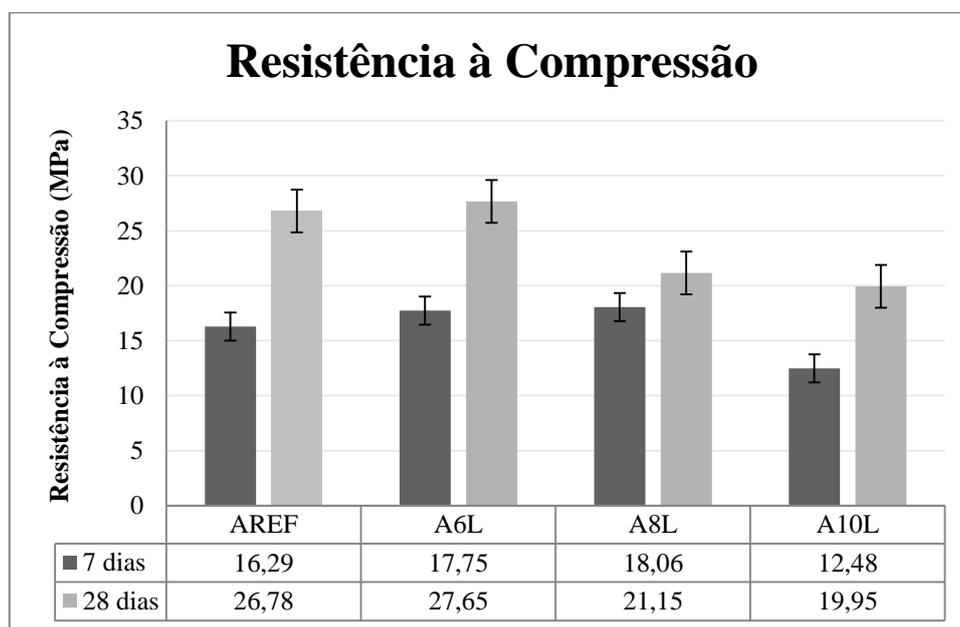


Figura 4.8 – Resistência à compressão das argamassas. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão

Fonte: Autora, 2019

Uma possível explicação para o aumento da resistência à compressão quando se acrescenta o lodo de ETA, é o fato de que por ser muito fino pode ter parte incorporada matriz cimentícia, enrijecendo a mistura modificando a ductibilidade da argamassa.

Em seu estudo Rocha (2016) avaliou a resistência à compressão das argamassas contendo 1, 2 e 3% de lodo de ETA como substuto ao cimento Portland. Os resultados dos ensaios tecnológicos indicaram que o traço 1:7 apresentou os melhores resultados, podendo ser utilizado na proporção de até 3% de incorporação, sem prejuízos ao processamento e a qualidade final do produto.

Alexandre (2018) ao utilizar o RETA nas proporções de 0%, 10% e 20% na substituição parcial do cimento Portland tipo V de alta resistência inicial (CPV-ARI), percebeu com os resultados obtidos, que com a adição do resíduo a resistência mecânica diminuiu. Na substituição do CPV por 10% de lodo de ETA os resultados obtidos foram de 25,4 e 37,33 MPa para as idades de 7 e 28 dias. Na substituição do CPV por 20% de lodo de ETA os resultados obtidos foram de 28,4 e 34,42 MPa para as idades de 7 e 28 dias.

Os resultados referentes ao módulo de elasticidade aos 28 dias estão apresentados na Figura 4.9. Neste ensaio, os resultados são expressos pelo cálculo da média de 3 CP's.

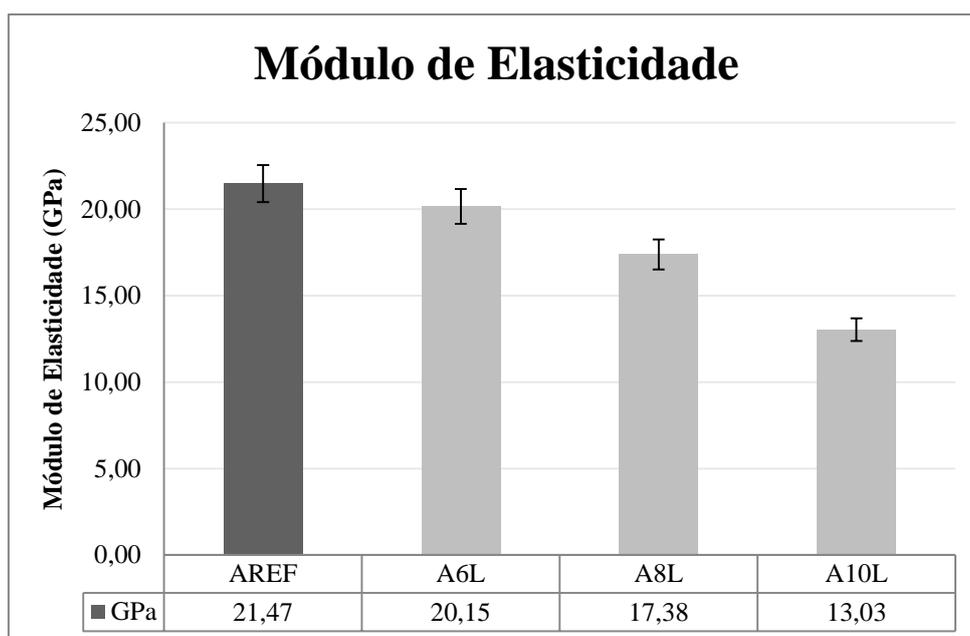


Figura 4.9 – Módulo de elasticidade das argamassas. Valores expressados em médias  $\pm$  desvio padrão

Fonte: Autora, 2019

A Figura 4.9 apresenta os resultados entre as argamassas sem RETA e as argamassas com adição de lodo. Observou-se estatisticamente que houve uma tendência onde o módulo de elasticidade foi diminuindo conforme foi-se aumentando a porcentagem de lodo incorporado, a argamassa A<sub>6L</sub> apresentou uma redução de 6,17% em relação a argamassa sem adição de lodo, houve variação significativa nos resultados do módulo de

elasticidade das argamassas  $A_{8L}$  e  $A_{10L}$  de, respectivamente, 19,07% e 39,32%, quando comparados com a argamassa  $A_{REF}$ .

Delgado (2016) estudou o comportamento do lodo proveniente da ETA Guandu quando misturado em diferentes materiais da construção civil, na análise do comportamento mecânico da mistura dos materiais com diferentes porcentagens de lodo (5, 10 e 15%) por meio dos ensaios de compactação e triaxial de cargas repetidas. Cada material foi testado adicionando, um a um, os teores de lodo até verificar se havia piora de seu comportamento resiliente. A autora concluiu que o resíduo apresentou comportamento satisfatório quando incorporado ao pó de pedra na porcentagem de 5% sem adição de nenhum agente estabilizador. Esta melhoria foi atribuída à estabilização granulométrica do pó de pedra com este lodo *in natura*, já que esta porcentagem representa uma quantidade adequada para o rearranjo e uma boa interação entre partículas.

No estudo realizado por Ribeiro (2012, *apud* SILVEIRA e ARAUJO, 2017), que visou o estudo de dosagem de lodo de ETA da cidade de Campo Mourão-PR em argamassa. Na avaliação do comportamento mecânico das argamassas, o autor observou que no ensaio de resistência a compressão o corpo de prova sem adição de lodo teve uma resistência de 2,55 MPa e módulo de elasticidade de 5 GPa. Já o corpo de prova com adição de 5 % do lodo apresentou uma resistência de 2,39 MPa e com redução do módulo de elasticidade para 4 GPa. Com a adição de 10% de lodo houve um acréscimo de resistência na qual foi obtido o valor de 2,98 MPa e o módulo de elasticidade em 5 GPa. E a adição de 15% de lodo conferiu à mistura uma significativa redução à resistência a compressão, com média de 1,84 MPa e redução do modulo de elasticidade de aproximadamente 3,33 GPa. Sendo assim a porcentagem de 15% impossibilitou sua utilização, e a mistura de 10% obteve os melhores resultados podendo ser indicada para uso.

#### 4.6.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)

Com o objetivo de avaliar e caracterizar as superfícies das amostras obtidas em relação as suas propriedades e composição, foi necessário utilizar as técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Torna-se importante reforçar que a captura de imagens por meio do microscópio eletrônico de varredura consiste em uma prática puramente qualitativa, com isso pode não fornecer base para conclusões definitivas a respeito da atuação do RETA no interior das argamassas, no entanto sua análise permite a constatação de sua morfologia acompanhada de algumas considerações (MORAES, 2018).

A Figura 4.10 mostra as imagens do lodo *in natura*, aumentado 200x (a), 1.000x (b), 2.500x (c) e 5.000x (d) com as respectivas escalas.

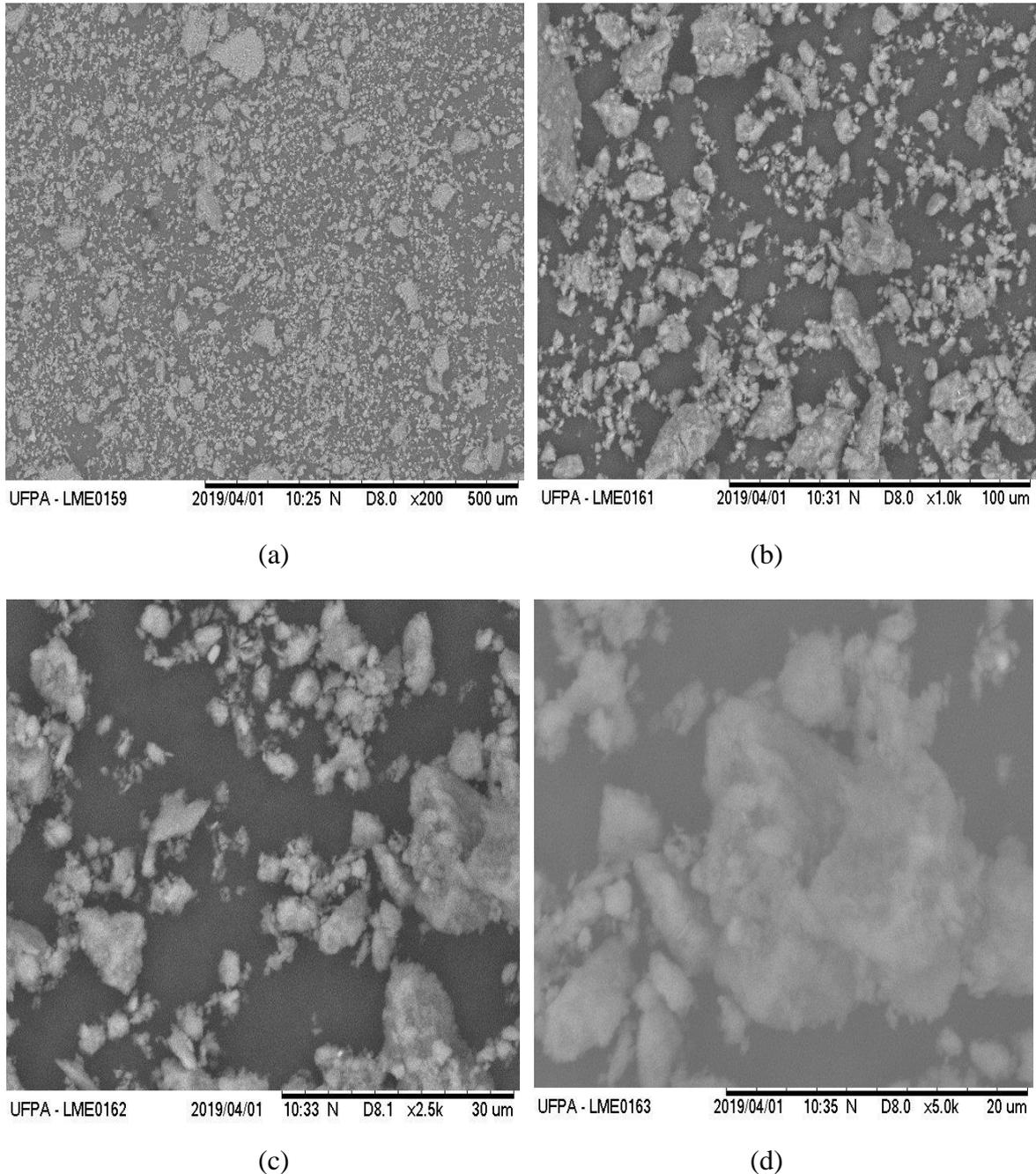


Figura 4.10 – Lodo *in natura* aumentado (a) x200 ; (b) x1.000; (c) x2.500; (d) x5.000  
Fonte: Autora, 2019

Nas micrografias apresentadas observam-se as morfologias típicas dos grãos do lodo de ETA com estrutura formada por conglomerados de partículas de diferentes tamanhos aparentemente porosas, com partículas com distintos tamanhos sem dimensão, formato e perfil padronizado. A micrografia da Figura 4.10a apresenta o aspecto geral da amostra permitindo visão geral das partículas que compõem o RETA.

Para Tartari *et al.* (2011), ao analisar o lodo *in natura* nas mesmas aproximações destacou a existência de matéria orgânica aderida às faces das partículas, observou também a conglomeração de partículas lamelares nas microrregiões de distintos tamanhos, sem dimensão e formato padronizado.

A Figura 4.11 mostra a morfologia do lodo da ETA com aproximação de x1.800 e os elementos químicos constituintes. Pode-se observar que as formas das partículas são irregulares, com textura superficial áspera e com os EDS foi possível identificar a presença dos elementos químicos C, K, O, Fe, Al, Si, bem como suas quantidades de picos.

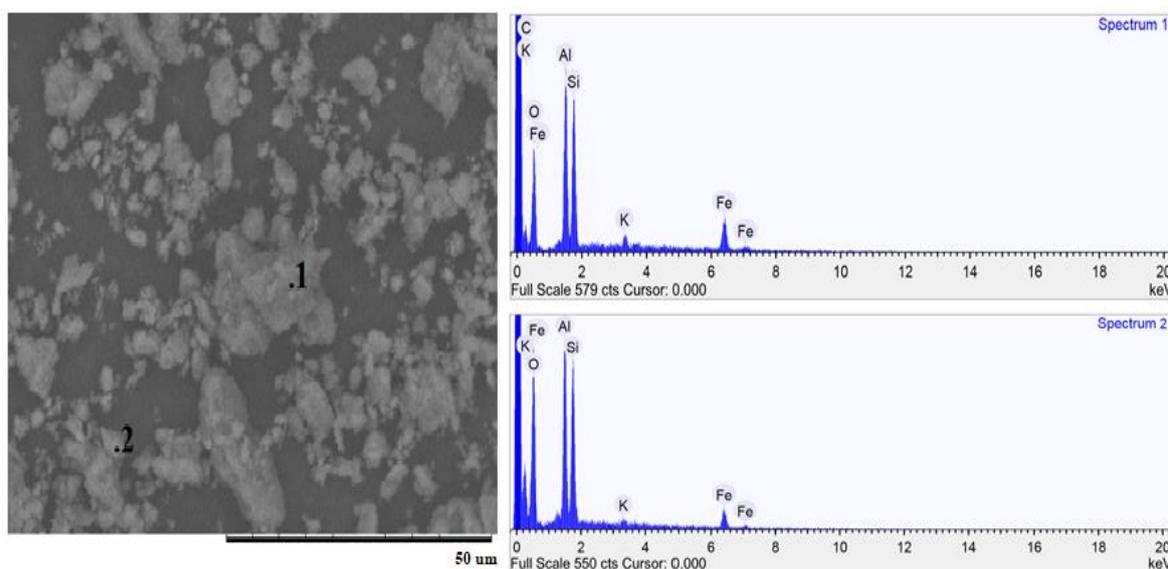


Figura 4.11 – Lodo *in natura* e EDS dos pontos marcados  
Fonte: Autora, 2019

O alumínio e o ferro são provenientes dos produtos adicionados durante a etapa de coagulação/floculação no processo de tratamento da água bruta, de acordo com Yang *et al.* (2010) compostos a base de alumínio, como o sulfato de alumínio e o policloreto de alumínio, são amplamente utilizados no tratamento da água, sendo que o Al é facilmente difundido em águas naturais podendo tornar tóxico.

De acordo com Li *et al.* (2013) as características químicas encontradas no lodo de tratamento de água variam de acordo com a qualidade da água bruta e do tipo e quantidade

de coagulante utilizado no tratamento. Nair e Ahammed (2013) encontraram em seu trabalho a presença dos metais Al, Fe, Ca, Mg e Si no lodo proveniente do tratamento de água.

A Figura 4.12 corresponde à microestrutura da  $A_{REF}$  e os EDS dos elementos majoritários nos pontos identificados na imagem. No spectrum 1, que tem aparência de um aglomerado de grãos apresenta traços de diversos elementos que não aparecem no EDS do spectrum seguinte, tais quais o K (potássio), Zn (zinco), Zr (zircônio), Al (alumínio), Mg (magnésio), e no spectrum 2, pode ser visualizado um conglomerado de cristais hexagonais, caracterizado como hidróxido de cálcio, produto da hidratação do cimento Portland.

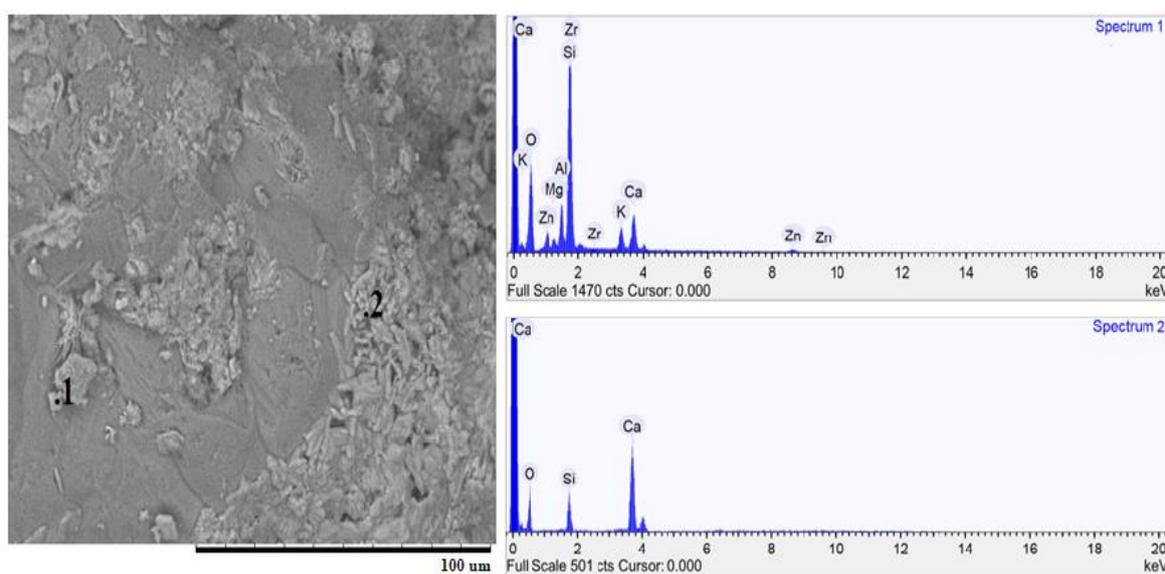
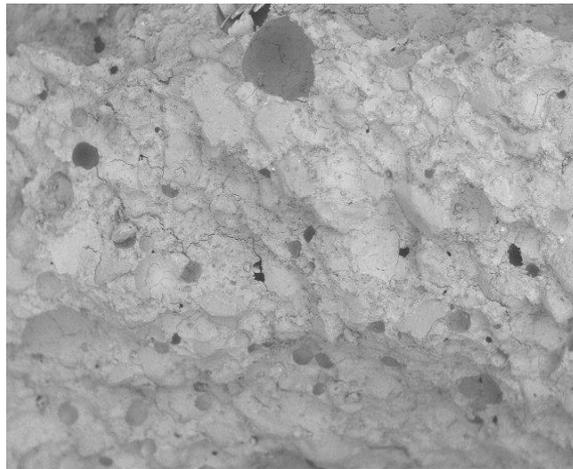


Figura 4.12 – Superfície da amostra  $A_{REF}$  e EDS dos pontos marcados  
Fonte: Autora, 2019

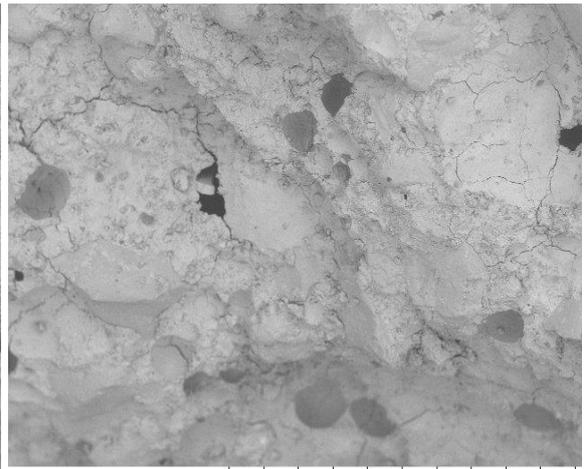
Foram feitas análises comparativas entre amostras com menor e maior percentual de lodo de ETA. Primeiramente realizou-se uma aproximação de magnitude de observação de x40 buscando visualizar a imagem como um todo. Em seguida, a varredura ocorreu através do aumento do grau de magnitude para x100.

Além da comparação entre amostras, o estudo da morfologia em questão teve como objetivo analisar as fissuras e a porosidade das argamassas, os CP's rompidos no ensaio de compressão foram preparados para serem utilizados como amostras a serem visualizadas no microscópio eletrônico de varredura. A Figura 4.13 mostra as imagens para o traço de argamassa denominado como  $A_{6L}$ ,  $A_{8L}$  e  $A_{10L}$ , respectivamente, ampliado em x40 e x100 com as respectivas escalas para todas as amostras com adição de RETA.



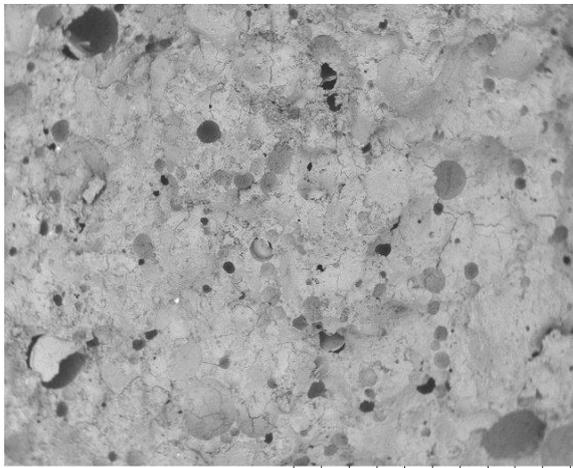
UFPA - LME0167 2019/04/01 12:05 F D5.1 x40 2 mm

(a)



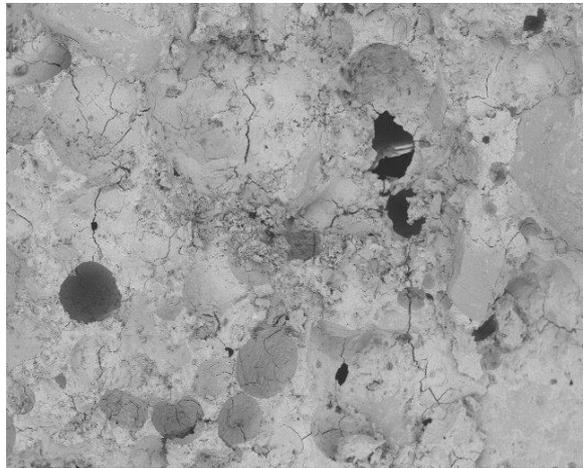
UFPA - LME0168 2019/04/01 12:07 F D5.0 x100 1 mm

(b)



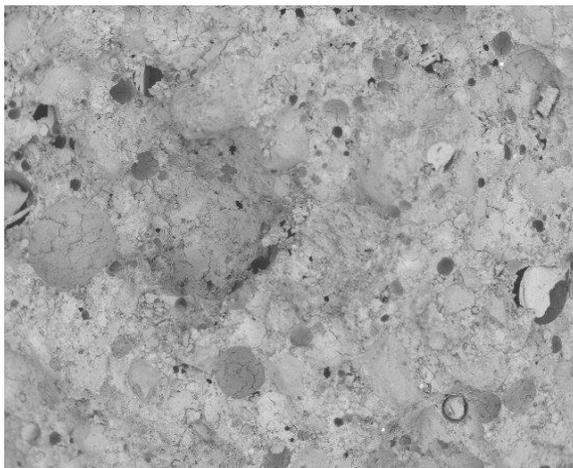
UFPA - LME0175 2019/04/01 12:27 F D4.1 x40 2 mm

(c)



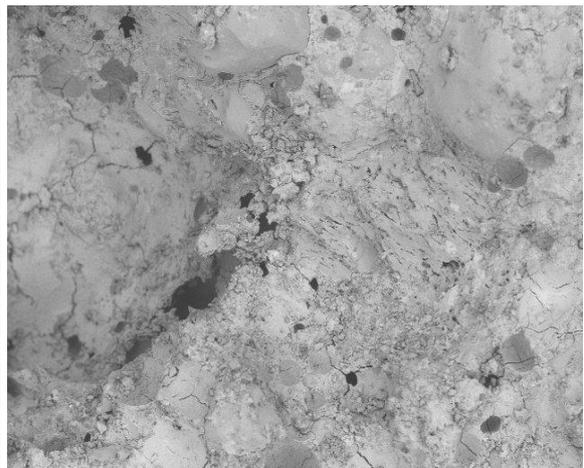
UFPA - LME0176 2019/04/01 12:29 F D4.1 x100 1 mm

(d)



UFPA - LME0179 2019/04/01 12:46 F D5.0 x40 2 mm

(e)



UFPA - LME0180 2019/04/01 12:47 F D4.5 x100 1 mm

(f)

Figura 4.13 – MEV ampliado x40 (a, c, e) e MEV ampliado x100 (b, d, f)  
Fonte: Autora, 2019

Verificam-se, nas imagens obtidas com ampliação de x100 e x40, diferentes estruturas formadas nas amostras de argamassa produzidas com 6, 8 e 10% de lodo. Pode-se notar que a estrutura da massa argamassa apresentou maior quantidade e diversidade de poros e microfissuras à medida que se acrescentou o resíduo em sua composição.

Vale salientar que quanto maior a quantidade de poros, menor será a resistência à compressão e maior será o índice de absorção de água, a quantidade de poros está intimamente associada à resistência à compressão e ao índice de absorção de água. De certa forma, esses resultados foram comprovados pelas análises de resistência à compressão e de absorção de água (TAVARES, 2015).

Gomes *et al.* (2019) realizaram uma revisão na literatura referente ao progresso de fabricação e propriedades de materiais de construção incorporado com o RETA de diversos países. De modo geral, a utilização parcial do RETA tem se mostrado potencialmente viável. No entanto, devido à falta de testes de durabilidade da microestrutura e de longo prazo e à presença de algumas substâncias no lodo, complementaram que mais estudos devem ser realizados para avaliar os potenciais impactos negativos dos componentes químicos no desempenho a longo prazo dos materiais de cimento com adição do lodo, em termos de integridade estrutural e propriedades mecânicas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Essas informações se referem exclusivamente aos ensaios realizados nessa pesquisa. Os resultados dos experimentos com a incorporação de lodo da ETA Bolonha em argamassa permitiu concluir que:

- Pode-se concluir que as argamassas produzidas com o lodo da ETA Bolonha em teores de 6% obtiveram resultados tecnicamente satisfatórios, sugerindo seu uso como substituição parcial do cimento Portland em argamassas;
- O estudo demonstrou que o lodo da ETA Bolonha se mostrou um material essencialmente fino, com diâmetro médio de 14,04 $\mu$ m e composto, em sua maioria, por matéria orgânica;
- A composição química majoritária das matérias-primas são formadas por SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entretanto em percentuais diferenciados, com 27,9%, 24,7% e 13,5%, respectivamente.
- A análise térmica sugere que calcinar o lodo a uma temperatura 500, 600, 700 e 800 °C deverá eliminar a matéria orgânica presente na amostra e, também, para deixar o material mais reativo, transformando a caulinita em metacaulinita que é um material essencialmente pozolânico, essa medida economizaria cimento na argamassa que atualmente é produzido de 1350 a 1400 °C;
- Os resultados tanto da IAP com cal quanto da IAP com cimento Portland aos 28 dias, reforçam os obtidos na análise química, confirmando a hipótese inicial de que o lodo da ETA Bolonha não se classifica como material pozolânico;
- Na investigação da utilização do lodo como fíler, na resistência à compressão de argamassas, o teor de 6% de substituição do cimento por RETA produziu um acréscimo de resistência de 8,93% aos 7 dias e 3,24% aos 28 dias de idade, em relação à argamassa de referência, além de absorver 7,81% de água a menos que a argamassa convencional;

- A incorporação de lodo com concentração de 8 e 10% restringe a sua aplicação, principalmente por não ter suportado uma ação suficiente a compressão mecânica, sendo inferior a 25 MPa aos 28 dias;
- Os módulos de elasticidade das argamassas com 6, 8 e 10% de RETA apresentaram valores proporcionalmente mais baixos que a argamassa de referência que foi de 21,47 GPa;
- Pelas análises de superfície utilizando a MEV foram notadas uma quantidade e uma variedade maiores de poros nas argamassas confeccionadas à medida que tais amostras foram fabricados com uma quantidade maior de lodo incorporado;
- Ainda que o aproveitamento do lodo ocorra em pequenas quantidades a sua utilização é viável uma vez que sua incorporação diminuirá o consumo da matéria-prima requerida para a produção de argamassa, além de evitar o impacto ambiental causado pela disposição final do lodo que, até o momento, está sendo feita de maneira inadequada.

## 5.2 SUGESTÕES

Considerando a enorme quantidade de resíduos provenientes do tratamento de águas residuais na região metropolitana de Belém e o excedente despejado no meio ambiente, é importante a continuação e disseminação do conhecimento sobre a utilização do lodo gerado por esse processo produtivo, cujo objetivo é buscar alternativas de aplicabilidade e interação deste resíduo na indústria da construção civil. O resíduo se mostra com alternativa para melhoria do comportamento mecânico em argamassas. Desta forma, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos que visem a continuidade no estudo desse material:

- Efetuar a análise microbiológica do lodo da ETA Bolonha, para evitar possíveis patologias causadas por microrganismos desconhecidos;
- Estudar o efeito da inclusão de uma etapa de calcinação prévia do lodo da ETA;
- Estudar o aproveitamento do lodo da ETA como agregado miúdo na confecção de concretos em teores de 10%, 20% e 30% e analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade;

- Avaliar o desempenho das argamassas com a utilização de aditivos plastificantes;
- Analisar a viabilidade técnico-econômica do resíduo, determinando a relação custo x benefício para utilização do lodo da ETA como substituição ao cimento Portland para a indústria de construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento Portland**. Disponível em: <http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/aplicacoes/aplicacoes/>. Acesso em 14/03/2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10004: **Resíduos sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 13749: **Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificações**. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR ISO 3310: **Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação**. Rio de Janeiro, 2010.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11578: **Cimento Portland Composto**. Rio de Janeiro, 1991.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **Materiais Pozolânicos – Especificações**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13529: **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregado para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: **Areia normal para ensaio de cimento – Especificação**. Rio de Janeiro, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR NM 67. Rio de Janeiro. 1998.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estrutura de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005: **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10006: **Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16072: **Argamassa impermeável**. Rio de Janeiro, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C618: **Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete**. Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C125: **Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregate**. Philadelphia, 1994.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C150: **Standard Specification for Portland Cement**. Conshohocken, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C330: **Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete**. Conshohocken, 2014.

ACHON, C. L.; CORDEIRO, J. S. **Riscos da destinação de lodos de ETAs-Leis 9.605/1998 e 12.305/2010**. XVII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 43º Assembléia nacional do ASSEMAE, de, v. 19, 2013.

Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>> Acesso em 14/02/2018.

AGOSTINI, M.; KULAKOWSKI, M. P.; BREHM, F. A. **A influência da pluviometria na adição de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha**. In: Anais do Fórum Nacional de Resíduos Sólidos, 5., São Leopoldo - RS, 2014. Disponível em: <[http://www.5firs.institutoventuri.org.br/arquivo/download?ID\\_ARQUIVO=81](http://www.5firs.institutoventuri.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=81)>. Acesso em 17/02/2018.

ALEXANDRE, Elisandro et al. **Substituição parcial do cimento CPV-ARI por do lodo de estação de tratamento de água (ETA)**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil**. Caderno de Recursos Hídricos, Brasília, SPR. 2006.

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.

ARAÚJO, Flavio de Carvalho. **Avaliação técnica dos resíduos gerados em eta como substituto parcial de agregados em componentes cimentícios – pavers**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiás, 2017.

NETTO, Azevedo; Y FERNÁNDEZ, Miguel Fernández. **Manual de hidráulica**. Editora Blucher, 1998.

BAIA, L. L. M.; SABATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimentos de argamassa**. 4. Ed. São Paulo: Editora O nome da rosa, 2000.

BARBOSA, K. C. **Avaliação experimental do fenômeno de retração em alvenaria de blocos de concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

BASTOS, P. K. X.; FRANCINETE JR, P. F. ; JOHN, V. M. ; CINCOTTO, M. A. **Estudo da retração e do desenvolvimento de propriedades mecânicas em argamassas mistas para revestimento**. In: II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 1997, Salvador. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Salvador: ANTAC, 1997. p. 120-132.

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

BAUER L. A. F., **Materiais de Construção**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. V1. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

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

BRASIL. DECRETO Nº 8.211, de 21 de março de 2014. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/CCIVIL\\_03/\\_Ato2011-14/2014/Decreto/D8211.htm](http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2011-14/2014/Decreto/D8211.htm)>. Acesso em 14/02/2018.

BRASIL, Leis et al. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, 2010. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/civil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/civil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em 14/02/2018.

BRASIL, Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>. Acesso em 15/02/2018.

BRASIL, M. M. A. Ministério do Meio Ambiente. Programa Nacional de Áreas Protegidas, 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/aguas-urbanas/mananciais>> Acesso em 14/02/2018.

BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 9.605 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF. Disponível em: <[http://fld.com.br/catadores/pdf/politica\\_residuos\\_solidos.pdf](http://fld.com.br/catadores/pdf/politica_residuos_solidos.pdf)> Acesso em 15/02/2018.

BRASIL. Saneamento Básico. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes sobre saneamento básico e dá outras providências. Brasília, DF, 2007.

CALLISTER, W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada.**/ William D. Callister, Jr.; Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CAPELLO, G. **Cimento ecológico: produto tem nível de CO2 reduzido em sua fórmula, causando menos impactos no meio ambiente.** Arquitetura & Construção, São

Paulo, fev. 2008. Disponível em: <[http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/casa/conteudo\\_270173.shtml](http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/casa/conteudo_270173.shtml)>. Acesso em: 07/03/2018.

CARASEK, H. **Argamassas - capítulo revisado e ampliado**. In: ISAIA, G. C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010. V2, p.893 – 944.

CARASEK, H. **Argamassas**. In: ISAIA, G. C. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2007. V.1, p 833 - 904.

CASCUDO, O.; CARASEK, H.; CARVALHO, A. **Controle de argamassas industrializadas em obra por meio do método de penetração do cone**. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, VI. Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 83-94.

CETESB-COMPANHIA, DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO. AMBIENTAL. São Paulo. **Proposta para derivação de critérios para contaminantes ambientais da agricultura**. São Paulo: Cetesb, 2010.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CASCUDO, H. C. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. Boletim técnico 68 IPT. São Paulo, 1995.

CORDEIRO, L. de N.P. **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto**. Porto Alegre, 2013. 114p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

COSANPA – Companhia de Saneamento do Estado do Pará. **Relatório de Informações Gerenciais 2013**. Belém, 2013.

CRUZ, A. A. F., **Estudo sobre a Utilização do Resíduo da Queima da Biomassa em Argamassas**. Dissertação de M. Sc., UDESC, Joinville, SC, Brasil, 2002.

DAHOU, Mohammed et al. **Synthesis and characterization of drinking water treatment plant sludge-incorporated Portland cement**. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, p. 1-11, 2017.

- DAL MOLIN, D. C. C. **Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: IBRACON, 2011. 2v. 1946 p. Cap 8.
- DAS NEVES BURGOS, Tatiane et al. **Caracterização microbiológica e físico-química do lodo de decantadores das estações de tratamento de água após desaguamento em leito de drenagem com manta geotêxtil**. Revista de Ciências da Saúde, v. 17, n. 1, p. 17-24, 2015.
- DELGADO, Jessica Vannesa Colmenares. **Avaliação da aplicação do lodo da ETA Guandu na pavimentação como disposição final ambientalmente adequada**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- DI BERNARDO, L. **Métodos e Técnicas de Tratamento e Disposição dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. Luiz Di Bernardo, Angela Di Bernardo Dantas, Paulo Eduardo Nogueira Voltan. São Carlos, LDiBe, 2012.
- DIAS, Genebaldo Freire. **Mudança climática e você: cenários, desafios, governança, oportunidades, cinismos e maluquices**. São Paulo: Gaia, 2014.
- DRUMOND, A. A. **Estudo em bancada da interferência na aplicação de resíduo de ETA no sistema de tratamento de esgoto**. 2013. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- EL-DIDAMONY, H.; KHALIL, Kh A.; HEIKAL, Mohamed. **Physico-chemical and surface characteristics of some granulated slag-fired drinking water sludge composite cement pastes**. HBRC Journal, v. 10, n. 1, p. 73-81, 2014.
- FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: PINI, 2003, 223 p.
- GARCEZ, L.N. **Elementos de Engenharia Hidráulica e Sanitária**/ Lucas Nogueira Garcez - 2.ed. – São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- GOMES, A. O. **Propriedades das argamassas de revestimento de fachadas**. Comunidade da Construção. UFBA. Salvador, 2008.

GOMES, Samuel De Carvalho et al. **Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review**. Resources, Conservation and Recycling, v. 145, p. 148-159, 2019.

GUPTA, R., S. **Principals of structural design: wood, steel and concrete**. 2ª Edição. Boca Raton: CRC Press, 2014.

HASSOUN, M., N.; AL-MANASEER, A. **Structural concrete: theory and design**. 6ª edição. New Jersey: John Wiley & Sons. 2015

HUANG, Chung-Ho; WANG, Shun-Yuan. **Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate**. Construction and Building Materials, v. 43, p. 174-183, 2013.

ISHIKAWA, P. H. **Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

JANUÁRIO, G. F. **Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos de estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo**. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estação de tratamento de ciclo completo: Uma análise crítica**. 144 p., São Paulo: USP, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-19072013-161144/pt-br.php>>. Acesso em: 07/03/2018.

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

KONDAGESKI, J. H. CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. **Pesquisas Interdisciplinares e a Estruturação dos Estudos da rede Interinstitucional de Pesquisa em Lodo de Água**. In: CARNEIRO, C. ANDREOLI, C. V. (Coord.). Lodo de Estação de Tratamento de Água – Gestão e Perspectivas Tecnológicas. Curitiba, Sanepar, 2013. p. 47-66.

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados Para a Construção Civil**. Brasília: DNPM, 2009. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/5460157/agregados-para-construcao-civil>. Acesso em: 01/06/2018.

LEA'S **Chemistry of cement and concrete** 4ed. London: Elsevier Science & Tecnology, 2004.

LI, Z., JIANG, N., WU, F., ZHOU, Z. 2013. **Experimental investigation of phosphorus adsorption capacity of the waterworks sludges from five cities in China**. *Ecological engineering*, 53, 165– 172.

LIMA, R.S.R.; LIMA, R.; OKANO, N.H. **Saneamento ambiental**. Curitiba: CREAPR, 2016. Disponível em: <http://177.92.30.55/ws/wpcontent/uploads/2016/12/saneamentoambiental.pdf>>. Acesso em 14/02/2018.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B; SABBATINI; F. H. **Recomendações para Execução de Revestimentos de Argamassa para paredes de vedação interna e externa e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998.

MASI, S.; CANIANI, D.; MANCINI, I. M.; TRULLI, E. **Innovative reuse of drinking water sludge in geo-environmental applications**. *Waste Management*, v. 33, p. 1461-1468. Mar. 2013. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13000779>>. Acesso em 17/02/2018.

MATTOS, MRU; GIRARD, L. **Caracterização físico-química e ensaios de adensamento em coluna do lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Água de grande porte**. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 28, 2013.

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.

MELO, M. C. S. **Estudo de argamassas adicionadas de cinza de algarroba geradas no arranjo produtivo local de confecções do agreste pernambucano**. Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2012.

- MORAVIA, W. G.; OLIVEIRA, C.A.S.; GUMIERI, A.G.; VASCONCELOS, W.L.; **Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto leve.** Cerâmica, Vol. 52, pp. 193-199, 2006.
- MORAES, Katherine Kaneda. **Avaliação das propriedades mecânicas de compósitos de matriz cimentícia com microcelulose cristalina.** Revista Matéria, v. 23, n. 3, 2018.
- MOREIRA, R. C. A.; GUIMARÃES, E. M.; BOAVENTURA, G. R.; MOMESSO, A. L.; LIMA, G. L.; **Estudos Geoquímico da Disposição de Logo de Estação de Tratamento de Água em Área Degradada.** Quim. Nova, Vol. 32, No. 8, 2085-2093, 2009.
- NARCISO, G. S. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- NBR 16097: **Solo — Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.
- NETTO, R. M. **Materiais Pozolânicos.** Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 2ª ed., São Paulo, PINI, 1997.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** trad. Salvador E. Giannusso. 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.
- NOWASELL, Qiwei Cao; KEVERN, John T. **Using drinking water treatment waste as a low-cost internal curing agent for concrete.** ACI Materials Journal, v. 112, n. 1, p. 5, 2015.
- NOWASELL, Qiwei Cao; KEVERN, John T. **Using drinking water treatment waste as a low-cost internal curing agent for concrete.** ACI Materials Journal, v. 112, n. 1, p. 5, 2015.

ONU, Organização das Nações Unidas. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos – Água para um mundo sustentável -2015.**

Disponível em: <[http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015ExecutiveSummary\\_POR\\_web.pdf](http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR2015ExecutiveSummary_POR_web.pdf)>. Acesso em 12/02/2018.

PÁDUA, V. L. **Introdução ao tratamento de água.** In: HELLER, L.; PÁDUA, V. L. Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006, Cap 12, p. 519 - 570.

Paulo, 1990 a 2008. **1º Relatório de Referência.** São Paulo, out. 2010.

PEREIRA, L. F. S.; **Reciclagem de Cinza Volante Para Produção de Agregado Sintético Utilizando Reator de Leito Fixo,** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará, Belém, PA. 2015.

PINHEIRO, BCA; 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.

POSSER, Natália D. **Proporcionamento de Argamassa para Reboco de Recuperação.** 2004. 182 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

RAMIREZ, Kleber Gomes et al. **Viabilidade do aproveitamento de resíduo de estação de tratamento de água (ETA) na confecção de concretos.** 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

REZENDE, Mariana Felicetti. **Uso de cinza de bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland como mecanismo de desenvolvimento limpo.** Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2016.

- RIBEIRO, C. C.; PINTO, J. D. S.; STARLING, T. **Materiais de construção civil**. 2 Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2002. 101 p. il.
- ROCHA, Maria Angelica Froes da et al. **Uso do resíduo da estação de tratamento de água de Ji-Paraná/RO como material cimentício**. 2016.
- ROMAN, H. R.; MUTTI, C. N.; ARAÚJO, H. N. **Construindo em alvenaria estrutural**. Florianópolis: UFSC, 1999. 83 p.
- SADOFF, Claudia W. et al. **Securing water, sustaining growth**. University of Oxford, 2015.
- SAMPAIO, Diogo João Roque. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização de Lama de ETA para Substituição Parcial de Cimento na Produção de Betão**. 2017.
- SANEPAR. **Sistema Corporativo de Controle Industrial**. Foz do Iguaçu, PR. 2014.
- SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007.
- SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.
- SANTOS, P. S.; **Ciência e Tecnologias de Argilas**, 2a ed., PINI Ltda.: São Paulo, 1997, vol. 1.
- SANTOS, P.S., **Ciência e Tecnologia de Argilas**, v. 1, 2 ed., São Paulo, EdigardBlucher Ltda, 1989.
- SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassa de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios** –Dissertação de mestrado . Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1989.
- SILVA, Elzelis Muller da. **Estudo da reciclagem de lodo de eta na fabricação de agregado sintético em mistura com cinza volante de carvão mineral**. 2016.
- SILVA, M. V.; FUNGARO, Denise Alves. **Caracterização de lodo de estação de tratamento de água e cinzas de carvão visando sua utilização na manufatura de tijolo**. In: 3rd International Workshop Advances In Cleaner Production. São Paulo. 2011.

SILVA, M. G. **Cimentos Portland com Adições Minerais**. In: ISAIA, G. C. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2007. v.1, p.761- 793.

SILVEIRA, Cristiane et al. **Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 20, n. 2, p. 297-306, 2015.

SILVEIRA, Leonardo Ramos da; ARAÚJO, Rodrigo Nobre de. **Reaproveitamento de resíduos de ETA e ETE em obras de engenharia**. Revista CTS IFG Luziânia, v. 1, n. 2, 2017.

SIQUEIRA, Jacilene Siqueira de. **Reciclagem de Resíduo a partir de Cinzas de carvão Mineral: Produção de Argamassas**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

SMYL, D., GHASEMZADEH, F., POUR-GHAZ, M. **Modeling water absorption in concete and mortar with distributed damage**, Construction and Bulding Materials 125, pp. 438-449, 2016.

SNIS. **Tabelas completas de informações e indicadores dos prestadores de serviços regionais 2013**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=105>>. Acesso em 14/02/2018.

SOUZA, Juliana Santa Cruz. **Estudo de argamassa à base de cal e metacaulim para intervenções em revestimento das edificações históricas**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2013.

SOUZA, P. A. B. F. (2007) **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 230 p.

SUGUINO. Eduardo; FREITAS, Anielly de P. F.; VASQUE, Henrique. **Potencial de uso do lodo de estações de tratamento de água e esgoto**. Pesquisa & Tecnologia, vol. 10, n. 2, Jul-Dez, 2013.

TARTARI, R.; DIAZ-MORA, N.; MODENES, A. N.; PIANARO, S. A.. **Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha**: Parte I: caracterização do lodo e de argilas do terceiro planalto paranaense. *Cerâmica*, São Paulo , v. 57, n. 343, Sept. 2011.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132011000300006>.

TAKADA, C. R. S.; SERRA, J. C. V.; MAFRA, W. A.; BORBA, K. C. A. **Aproveitamento e disposição final de lodos de Estações de Tratamento de Água no município de Palmas – TO**. *Engenharia Ambiental*, v.10, n. 2, p. 157-165, 2013.

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

TAVARES, Célia Regina Granhen et al. **Caracterização de blocos cerâmicos acústicos produzidos com incorporação de lodo de lavanderia têxtil**. 2015.

TSUTIYA, M.T. **Abastecimento de água**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 3ª ed. São Paulo, 2006, 643 p.

Veolia Water North America and International Food Policy Research Institute (IFPRI), 2013. **Finding the blue path for a sustainable economy**. USA; Washington. Disponível em: <<http://www.veoliawaterna.com/north-americanwater/ressources/documents/1/19979,IFPRI-White-Paper.pdf>> Acesso em:13/02/2018.

VIANA, C.C.; RODRIGUES, F.N.; RIBEIRO, K.D. **Caracterização físicoquímica e biológica do lodo gerado em Estação de Tratamento de Água (ETA)**. In: 4º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Anais. Bento Gonçalves: UCS, 2014. Disponível em: <[https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=388&ano=\\_quarto](https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=388&ano=_quarto)>. Acesso em 14/02/2018.

VIVEIROS, Danielle de Cássia Santos de et al. **Rejeito do minério de manganês como material de construção civil**. 2017.

WOLFF, Eliane; SCHWABE, Wilfrid Keller; CONCEIÇÃO, Samuel Vieira. **Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics**. *Journal of Cleaner Production*, v. 96, p. 282-289, 2015.

**YANG, Z., GAO, B., YUE, Q. 2010. Coagulation performance and residual aluminum speciation of  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  and polyaluminum chloride (PAC) in Yellow River water treatment. Chemical Engineering Journal. 165, 122–132.**