

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

**YASMIN RIBEIRO FREITAS**

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS E  
GEOPOLIMÉRICAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ETA

Joinville

2018

**YASMIN RIBEIRO FREITAS**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS E  
GEOPOLIMÉRICAS COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE ETA**

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia de Infraestrutura do  
Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Daniel Hastenpflug

Coorientador: Dr. Luciano Senff

Joinville

2018

Dedico esse trabalho de conclusão de curso a minha  
família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço principalmente aos meus pais pelo amor, por todos os ensinamentos, pelo apoio que sempre deram, e por terem dado a mim e meus irmãos a melhor educação que podiam.

Aos meus irmãos que por toda a vida estiveram ao meu lado.

Agradeço imensamente ao meu namorado, que foi um presente na minha vida e que me ajudou muito.

Agradeço ao meu orientador professor Daniel Hastenpflug, por ter me dado suporte e orientação nessa pesquisa. E ao meu coorientador professor Luciano Senff, o qual sou grata por ter me acolhido como aluna de pesquisa e por ter me ensinado muito sobre o mundo dos materiais da construção civil.

A todos os meus excelentes professores que a cada semestre transmitiam um pouco de tudo o que conheciam. E em especial à professora Valéria Bennack e à professora Simone Malutta por, também, terem me ajudado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Também, sou muito grata à professora Andréa Holz Pfitzenreuter que me ajudou a abrir algumas portas e me amparou muito durante a faculdade.

Aos colegas do laboratório de materiais de construção que me auxiliaram durante as atividades de pesquisa.

## RESUMO

O resíduo sólido (lodo) gerado nas Estações de Tratamento de Água (ETA) torna-se um problema ambiental quando descartado em corpos d'água, pois originam assoreamento e contaminação por agentes químicos. Por outro lado, o destino desses resíduos aos aterros sanitários é de alto custo às ETAs, e levam ao incremento do custo do tratamento da água. Por esses motivos, encontrar alternativas que possam fazer uso deste resíduo, se torna uma solução sustentável e econômica. Assim, esta pesquisa buscou avaliar a viabilidade de uso do lodo de ETA em argamassas cimentícias e geopoliméricas. A aplicação do lodo em argamassas cimentícias visa reduzir o uso do cimento, por este causar grandes impactos no meio ambiente através da geração de gases poluentes durante o seu processo de produção. Já, a incorporação de lodo nas argamassas geopoliméricas deve-se a sua composição rica em aluminossilicatos, compostos que são matérias-primas para o desenvolvimento de geopolímeros. O resíduo foi adicionado à argamassa cimentícia na forma de substituição ao cimento nas porcentagens de 10%,15%,20%,25% e 30%, e na forma de adição nas porcentagens de 10%, 15% e 20%. Nas argamassas geopoliméricas, o lodo substituiu parcialmente o metacaulim na porcentagem de 25%, e foi adicionado em relação ao metacaulim na porcentagem de 15%. Foram analisadas a composição química e mineralógica do lodo, o índice de consistência, as características físicas (densidade aparente, absorção de água e porosidade aberta), e mecânica (resistência à compressão). Os resultados mostraram que o lodo de ETA é composto, principalmente, por sílica e alumina nas proporções 25,61% e 25,44%. Os ensaios no estado fresco mostraram que a incorporação do lodo reduziu a trabalhabilidade para ambos os tipos de argamassas. Nos ensaios de propriedades físicas, todas as amostras de argamassa cimentícia apresentaram aumento das porcentagens de porosidade aberta e absorção de água, e redução na densidade aparente. Nas argamassas geopoliméricas, a porcentagem de porosidade aberta e densidade aparente foram menores, mas, ainda assim, a absorção de água aumentou. Para os resultados de resistência à compressão, a presença do lodo nas argamassas cimentícias reduziu significativamente a resistência das amostras, sendo que os traços com substituição apresentaram menor resistência que os de adição do resíduo. O traço com 10% de adição (CA10) foi o que apresentou melhor resistência, atingindo 1,65 MPa. Nas argamassas geopoliméricas, também ocorreu perda de resistência para todos os traços, porém, apresentaram melhor resistência que as argamassas de cimento. O traço com maior resistência entre os geopolímeros foi o com 15% de adição (GA15), suportando 30,36 MPa. Desta forma, conclui-se que a utilização do lodo em argamassas de cimento depende da finalidade de uso destinado devido à baixa resistência atingida. Para as argamassas geopoliméricas, constata-se a viabilidade de uso do lodo tanto na forma de adição quanto de substituição parcial ao metacaulim.

**Palavras-chave:** Resíduo sólido de ETA. Argamassa de cimento. Argamassa geopolimérica.

## ABSTRACT

The water treatment sludge is an environmental issue when disposed at landfills, due to silting problems and contamination by chemical agents. On the other hand, the sludge disposal on landfills is expensive for the water companies, and increases the costs of water treatments. Therefore, finding ways to reuse this residue becomes a sustainable and economic solution. That way, this research seeks to analyze the performance of the water treatment sludge based on cementitious mortars and geopolymer mortars. The use of sludge on cement mortars seeks to reduce the cement usage, due its negative impact on environment caused by polluting gases created during the cement's manufacturing. Now, the sludge application on geopolymer mortars is because the sludge chemical composition which is rich in silicon dioxide and aluminium oxide, that are raw materials for geopolymers. The residue was added on cement mortars as a cement substitute at the percentages of 10 %, 15%, 20%, 25% and 30%, and as an addition to cement on percentages 10%, 15% and 20%. On geopolymer mortars it was partially added on metacauline at the percentage of 15%, and as a substitute on percentage of 25%. The chemical and mineralogical sludge composition was studied, as the mortars' consistence, physical properties (water absorption, porosity and density), and the mechanical strength. The results showed that the sludge composition is basically composed of silicon dioxide 25,61% and aluminium oxide 25,44%. The flow table test showed that the sludge incorporation caused a reduce on mortars' consistency. On the physical properties test, all the cement mortars' samples had increased the percentages of porosity and water absorption, and a reduce on the density. The results for geopolymer mortars showed that the porosity and density had declined, but the water absorption still increased. The mechanical strength had decreased significantly. The samples of cement mortars with sludge substitution had lower compressive strength than the samples with sludge addition. The sample with 10% of sludge addition (CA10) showed a better compressive resistance than the others, reaching 1,65 MPa of resistance. For the geopolymer mortars, the compressive resistance was bigger than the cement mortars. The samples with 15% sludge addition reached the biggest resistance, 30,36 MPa. This way, it comes to conclusion that the usage of sludge on cement mortars depends on its application field due the low compressive resistance. The sludge use on geopolymer mortars looks promising for both ways of application, addition and substitution.

Keywords: WT Sludge, Cement mortars, Geopolymer mortars.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Etapas do tratamento de água. ....	16
Figura 2 - Representação esquemática dos compostos hidratados do cimento. ....	22
Figura 3 - Etapas de reações do processo de geopolimerização. ....	24
Figura 4 - Modelo estrutural das cadeias de polímeros inorgânicos. ....	25
Figura 5 - a) Metacaulim; b) cimento Portland II; c) Resíduo sólido de ETA; d) Areia média, e) Solução hidróxido de sódio, f) Silicato de sódio. ....	29
Figura 6 - a) Moino de bolas; b) Jarro 300 ml; c) Estufa. ....	31
Figura 7 - Composição química do resíduo sólido da ETA Joinville. ....	32
Figura 8 - Curva granulométrica do Resíduo Sólido de ETA. ....	32
Figura 9- a) Distribuição do tamanho de partículas do metacaulim; b) ensaio de difração de raios-X no metacaulim. ....	34
Figura 10 - a) Composição granulométrica da areia; b) Peneirador vibratório e peneiras. ....	34
Figura 11 - Sequência de atividades para os ensaios. ....	36
Figura 12 - a) Misturador mecânico, b) Mesa de consistência (folw table). ....	37
Figura 13 - Procedimento para preparação das misturas de geopolímero. ....	38
Figura 14 - Máquina de ensaios mecânicos. ....	39
Figura 15- Relação de água adicionada nas argamassas de cimento. <b>Erro! Indicador não definido.</b>	
Figura 16 - Valores de porosidade aberta em argamassas de cimento. ....	42
Figura 17 - Resultados de absorção de água para as argamassas cimentícias. ....	43
Figura 18 - Valores de densidade aparente das argamassas de cimento. ....	43
Figura 19 - Valores de resistência à compressão para argamassas de cimento com lodo na mistura. ....	44
Figura 20 - a) valores de espalhamento das argamassas geopoliméricas; b) valores de espalhamento alcançados por Rossetto (2017). ....	46
Figura 21 – a) resultados de porosidade aberta; b) resultados de absorção de água; c) resultados de densidade aparente para argamassas geopoliméricas. ....	47
Figura 22 - a) resultados do ensaio de resistência à compressão nas amostras de argamassas geopoliméricas; b) resultados de resistência à compressão alcançados por Rossetto (2017)..	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do metacaulim.....	33
Tabela 2- Características Técnicas do Hidróxido de Sódio .....	35
Tabela 3- Composição química do Silicato de Sódio .....	35
Tabela 4 - Razões ideais para relação molar dos geopolímeros. ....	37
Tabela 5 - Abertura das argamassas de cimento na mesa de espalhamento. ....	40
Tabela 6 - Abertura das argamassas geopoliméricas na mesa de espalhamento. ....	46



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$  – Micrometro

$\text{Al}_2\text{O}_3$  – Óxido de Alumínio (Alumina)

$\text{CaO}$  - Óxido de Cálcio

CERMAT – Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos.

cm – Centímetros

ETA – Estação de Tratamento de Água

ETL – Estação de Tratamento de Lodo

$\text{FeO}_3$  – Óxido de Ferro

g – Grama

$\text{g/cm}^3$  - Gramas por centímetro cúbico

K – Caulinita

$\text{K}_2\text{O}$  – Óxido de Potássio

L – Mica

LDCM – Laboratório de desenvolvimento e caracterização de materiais

M – Molar

$\text{MgO}$  – Óxido de Magnésio

min – Minuto

ml – mililitro

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

$\text{MnO}$  – Óxido de Manganês

$\text{Na}_2\text{O}$  – Óxido de Sódio

NBR – Norma Brasileira

O – Oxigênio

s - Segundos

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>13</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>15</b>
2.1	RESÍDUO SÓLIDO DE ETA .....	15
2.1.1	<b>Estações de Tratamento de Água .....</b>	<b>15</b>
2.1.2	<b>Características do resíduo sólido de ETA .....</b>	<b>17</b>
2.2	ARGAMASSAS DE CIMENTO .....	18
2.2.1	<b>Propriedades das Argamassas.....</b>	<b>19</b>
2.2.2	<b>Cimento Portland .....</b>	<b>20</b>
2.2.3	<b>Hidratação do cimento .....</b>	<b>21</b>
2.3	ORIGEM, PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS GEOPOLÍMEROS ...	22
2.3.1	<b>Metacaulim.....</b>	<b>25</b>
2.3.2	<b>Solução ativadora dos geopolímeros .....</b>	<b>26</b>
2.4	USO DO LODO EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E DE CIMENTO .....	27
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	29
3.1.1	<b>Resíduo sólido da ETA Cubatão .....</b>	<b>29</b>
3.1.2	<b>Cimento Portland (CPII Pozolânico) .....</b>	<b>32</b>
3.1.3	<b>Metacaulim.....</b>	<b>33</b>
3.1.4	<b>Agregado Miúdo .....</b>	<b>34</b>
3.1.5	<b>Solução Ativadora - Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio .....</b>	<b>35</b>
3.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	35
3.2.1	<b>Definição das formulações .....</b>	<b>36</b>

<b>3.2.2</b>	<b>Mesa de espalhamento .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Resistência à Compressão.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Densidade aparente, absorção de água e porosidade interna .....</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1</b>	<b>ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Ensaio no estado fresco – mesa de espalhamento .....</b>	<b>40</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Ensaio no estado endurecido .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Resistência à compressão.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.1</b>	<b>Ensaio no estado endurecido .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Resistência à compressão.....</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos é um grande problema ambiental, o qual o Brasil ainda não apresenta gestão suficiente para o controle do descarte nem da quantidade de resíduos produzidos no país. Um dos fatores que agravam esse problema é a falta de incentivo pelo governo a estudos e pesquisas que buscam alternativas de uso e de tratamento que minimizem os impactos causados no meio ambiente, e, também, a falta de informações sobre as características dos resíduos gerados nos setores da sociedade (GODECKE et al., 2012).

Os resíduos sólidos gerados nas estações de tratamento de água (ETA), comumente chamados de lodo, são resíduos que apresentam potencial para serem reutilizados em materiais da construção civil, como, por exemplo, em tijolos, coberturas de aterro e em misturas de concreto. O lodo é um aglomerado de substâncias compostas por algas, partículas orgânicas, areia, argila, bactérias, entre outros, que são retidas nos processos de tratamento de água (OLIVEIRA, 2016). De acordo com Achon et al. (2013), os resíduos gerados nos tratamentos de água e esgoto são os que geram maior preocupação entre os municípios, pois, o descarte do lodo é dispendioso devido ao transporte e ao alto custo de operação dos aterros sanitários e demais destinos.

Desde a criação da Lei de Crimes Ambientais – Lei N. 9.605/98 (BRASIL, 1998), que proíbe o lançamento de lodo das ETAs in natura, sem tratamento prévio (SILVEIRA, 2012), e da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei N. 12.305/2010 (BRASIL, 2010), o tratamento e a disposição final desses resíduos passaram a ser controlados por órgãos públicos. Agora, a destinação desses rejeitos necessita de licença ambiental e deve ser feita em áreas ambientalmente adequadas e regulamentadas. Ainda que legalmente aceitável, o uso de aterros sanitários também acarreta danos ambientais, como a contaminação do solo e lençol freático, além de ocupar grandes áreas e ter custo de transporte e despejo elevados (KATAYAMA, 2012).

Tendo foco na problemática ambiental e no alto custo de tratamento e deposição final desse resíduo, buscou-se avaliar uma alternativa de uso do lodo de ETA em argamassas cimentícias e geopoliméricas, a fim de evitar o seu descarte diretamente em aterros sanitários, lixões ou mesmo cursos d'água.

Nas argamassas convencionais (cimentícias), visou-se retirar parte do cimento utilizado nas misturas e substituir pelo lodo a fim de reduzir a quantidade de cimento utilizada. O uso excessivo de cimento pela construção civil também é um problema ambiental, pois, a indústria cimenteira é um dos setores que mais contribui para a poluição atmosférica devido à grande proporção de CO<sub>2</sub> que é liberado no ar durante a produção do cimento (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2009).

Nas argamassas geopoliméricas, o lodo foi usado como fonte de sílica e alumina por apresentar abundância desses minerais em sua composição. O geopolímero é um material polimérico que vem sendo desenvolvido como uma opção ao uso do cimento, por ser menos agressivo ao meio ambiente e ter desempenho comparável ao do cimento (DUXSON et al., 2007). O seu desenvolvimento ocorre por meio de uma ativação alcalina, a qual minerais de sílica, alumina e outros, reagem entre si criando cadeias poliméricas (SILVA et al., 2015).

Frente ao exposto anteriormente, esse trabalho avaliou o emprego do lodo em argamassas cimentícias, substituindo parcialmente o cimento pelo lodo nas porcentagens de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% na massa, e adicionando o lodo em relação ao cimento nas porcentagens de 10%, 15% e 20%. Já, nas argamassas geopoliméricas foi avaliado o uso do lodo como adição na porcentagem de 15% em relação ao metacaulim, e como substituição ao metacaulim na porcentagem de 25%.

Foi realizada a caracterização física e mineralógica do resíduo utilizado. E, também, os ensaios para a avaliação da influência do material no estado fresco e endurecido das argamassas, como forma de verificação de possíveis aplicações na indústria da construção civil.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento do lodo de ETA em argamassas cimentícias e geopoliméricas, adicionando o lodo de maneira parcial ao cimento e ao metacaulim. E avaliar as propriedades dessas argamassas no estado fresco e endurecido.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o resíduo sólido pelo ensaio de composição mineralógica e granulométrica;
- Definir o traço para as argamassas de cimento e para as de geopolímeros;
- Avaliar o comportamento no estado fresco das misturas de argamassas geopoliméricas e de argamassas de cimento;
- Estudar o comportamento mecânico dos materiais aos 28 dias de cura através do ensaio mecânico de resistência à compressão;
- Analisar as propriedades físicas de porosidade aberta, densidade aparente e absorção de água.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

O lodo gerado no tratamento de água é uma combinação de impurezas removidas da água junto com os produtos químicos utilizados no processo. O total de resíduo formado chega a variar de 0,2 a 5% do volume de água tratada (PRIM, 2011). A elevada quantidade de sólidos, o nível de turbidez e a presença de metais pesados são alguns dos fatores que inviabilizam o lançamento de resíduos de ETA em corpos d'água. O incorreto descarte dos resíduos pode resultar na toxicidade da água, assoreamento de rios, alteração da biota aquática, mortalidade de peixes e invertebrados, entre outros problemas ambientais (ACHON et al., 2005).

Este capítulo introduz conceitos sobre o resíduo sólido de ETA, bem como de argamassas de cimento e de geopolímeros.

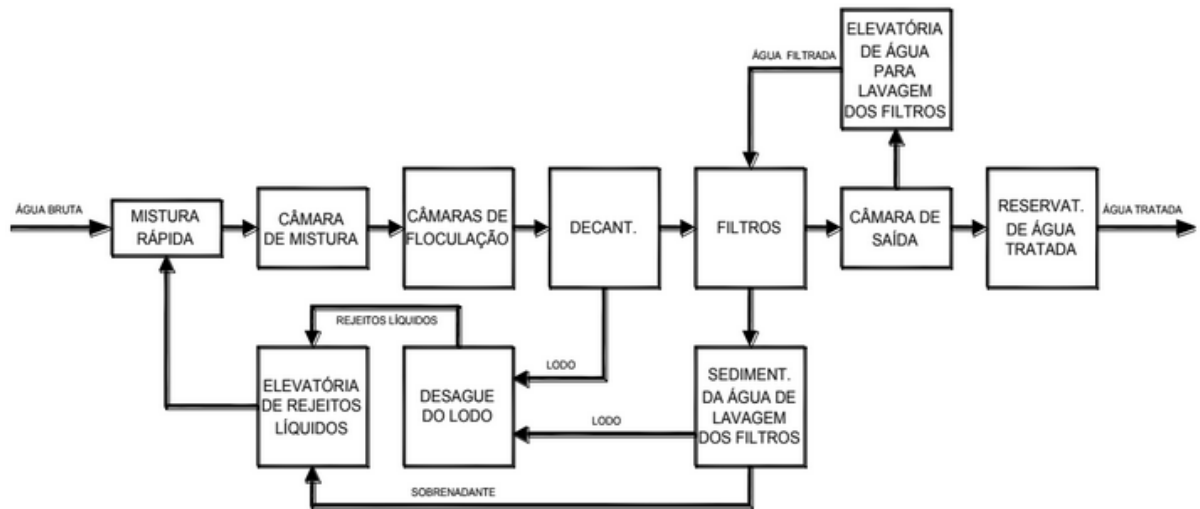
### **2.1 RESÍDUO SÓLIDO DE ETA**

O PNRS divide os resíduos sólidos em duas classes: Classe I - os resíduos considerados perigosos; e a Classe II - os não perigosos, dividida em II-a) não inertes, e II-b) inertes. Ainda, o mesmo plano denomina resíduo sólido como “[...] material resultante de atividades humanas em sociedade cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou cursos d'água [...]”. O lodo se enquadra nessa descrição por ser um material residual resultante da atividade de tratamento de água, cujas características físicas, químicas e biológicas dependem da fonte da água bruta e dos produtos reagentes utilizados no processo de tratamento (PAIVA; PARREIRA, 2012).

#### **2.1.1 Estações de Tratamento de Água**

No Brasil, a maioria das ETAs são projetadas com ciclo completo, o qual consiste nas etapas base de coagulação, floculação, decantação e filtração. Os resíduos presentes no lodo são gerados nas duas últimas etapas, e ficam retidos nos decantadores e nos filtros, sendo este último conhecido como água de lavagem de filtros (ALAF). Na Figura 1, é esquematizado os processos básicos que ocorrem numa ETA, inclusive, indica as etapas onde há geração de resíduos (SANTOS, 2016).

Figura 1 Etapas do tratamento de água.



Fonte: ETA PROAMA apud Santos, 2016.

Após a captação de água, a primeira etapa é a mistura rápida, a qual se faz a adição do agente químico (usualmente sulfato de alumínio) responsável pela formação de flocos, e na câmara de misturas ocorre a dispersão desse agente. Na câmara de floculação é dado o tempo necessário para que ocorra a aglomeração das partículas finas de impurezas que serão removidas por sedimentação ou filtração. Na decantação, os flocos formados, por serem mais densos que a água, depositam-se no fundo dos tanques ocasionando sedimentação. Enquanto isso, a água é retirada por vertedouros localizados na parte superior do decantador. Ainda, nessa etapa ocorre a primeira geração de resíduos sólidos. Por fim, nos filtros a água decantada passa por camadas de materiais porosos com granulometrias diferentes, podendo ser em ordem crescente ou decrescente. Os resíduos que ficam acumulados nos poros são lavados, e resultam na ALAF, que é a segunda geração de resíduos no processo (SANTOS, 2016).

A estação pode decidir qual a frequência que os resíduos serão removidos dos decantadores e levados ao destino final. Achon, Barroso e Cordeiro (2013) afirmam que no Brasil, a remoção do lodo pode ser feita em intervalos de até seis meses, mas este tempo deve ser bem avaliado, pois, a demora resulta numa concentração maior de contaminantes orgânicos e inorgânicos e também dificulta a remoção desse resíduo.

As ETAs dificilmente fazem levantamento do total de resíduos gerados. Geralmente, a quantidade de lodo produzida depende da qualidade da água que chega às estações de



tratamento. Em épocas de chuva, a água dos mananciais tende a ser mais turbida devido à movimentação do solo no fundo dos rios, resultando em maiores concentrações de partículas em suspensão, e conseqüentemente, em proporções maiores de materiais retidos nos processos de tratamento.

### **2.1.2 Características do resíduo sólido de ETA**

Na composição do lodo estão presentes materiais orgânicos e inorgânicos comuns em cursos d'água, tais como: areia, argila, silte, bactérias, colóides e minerais variados (GRANDIN et al., 1993 apud PORTELLA et al., 2003). Também estão presentes alguns aditivos químicos utilizados durante o tratamento de água, como coagulantes e floculantes à base de ferro e alumínio. De acordo com Santos, Manzato e Filho (2016), é comum encontrar argila caulínica na composição mineralógica desses resíduos. Assim, é possível submeter o lodo ao tratamento térmico para que ocorra calcinação da caulinita, gerando um material próximo ao metacaulim, matéria-prima do geopolímero.

Devido à presença natural de alumínio e sílica na composição da água bruta, mais a adição de soluções químicas como o sulfato de alumínio nas etapas do tratamento de água, o resíduo de lodo se torna uma fonte rica de aluminossilicatos que possibilita o desenvolvimento de geopolímeros. Porém, os compostos de sílica e alumina no lodo não são tão reativos quanto são nas matérias-primas comumente usadas nos geopolímeros. Assim, há tendência de compostos de sílica ficarem sem reagir, podendo causar eflorescência (formação de depósitos de sais devido ao excesso de hidróxido de sódio) na argamassa (ROSSETTO, 2017).

Os locais mais utilizados para destino final dos resíduos de ETA são os aterros sanitários, lixões e os corpos hídricos. Entretanto, soluções mitigadoras estão sendo propostas para seguir os princípios de reutilização, reaproveitamento e reciclagem que o PNRS vem buscando (KATAYAMA, 2012).

Alguns países, como o Japão e a Austrália, chegaram a desenvolver alternativas viáveis e eficientes para o emprego do lodo. Como utilizá-lo na recuperação de áreas degradadas, e, também, transformá-lo em adubo para áreas agrícolas. Inclusive, o resíduo foi testado na produção de cimento, alumínio e na fabricação de tijolos e cerâmicas. Nos Estados Unidos, cerca de 55% do lodo produzido é reciclado para o uso agrícola (EPA, 1995).

## 2.2 ARGAMASSAS DE CIMENTO

A argamassa é um material de construção cujas propriedades de aderência e a facilidade de aplicação favorece o uso no assentamento de estruturas, revestimento e vedação. É amplamente utilizada na construção civil, tanto quanto o concreto, e é empregada para diversos fins.

Alguns pesquisadores, como Santiago (2007) e Sobral (2000), definem a argamassa como uma pedra artificial, por ser produzida com fragmentos de rochas menores, aglutinadas por um ligante que confere rigidez, e por apresentarem características parecidas às das rochas quando endurecidas. Uma definição mais adequada para designar a argamassa é fornecida pela NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, p. 2). “Argamassa: mistura homogênea de agregados miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento [...]”.

As argamassas podem ser classificadas de acordo com o uso em dois grupos: as de alvenaria ou assentamento; e as de revestimento.

a) Argamassas de alvenaria ou assentamento: tem a função de fazer a união entre os elementos estruturais e contribuir com a capacidade da estrutura, resistindo às variações térmicas e de umidade, e se acomodando ao movimento das partes rígidas estruturais (FILOMENO, 1993). Devem apresentar boa trabalhabilidade no estado fresco, moldando-se fácil aos espaços vazios e mantendo-se plástica até a cura. Além de ter resistência mecânica suficiente aos esforços de compressão, e também flexão e cisalhamento proveniente dos esforços laterais.

b) Argamassas de revestimento: o reboco é o tipo mais conhecido. É utilizado para prover estanqueidade e regularizar a superfície de acabamento. É composto por camadas, sendo as primeiras responsáveis pela aderência ao suporte, regularização e proteção, e as demais com função de proteção e acabamento. É importante que este tipo de argamassa tenha boa resistência ao fogo e apresente bom isolamento térmico e acústico. Também, durante a aplicação enquanto no estado fresco, deve apresentar adesão inicial para que permaneça unida à base (MARQUES, 2005). A dosagem de água deve ser bem controlada nas misturas, pois, na cura ocorre liberação de vapor d’água que pode deixar a argamassa seca e ocasionar deterioração e fissuras. Se a argamassa ficar úmida pode aumentar a segregação e proliferação de fungos, causando apodrecimento do material e diminuindo a sua vida útil.

Ainda, podem ser inclusas nesse grupo as argamassas de contrapiso, que regularizam a superfície para o acabamento, as colantes, servindo para assentar as peças cerâmicas no substrato, e as de rejuntamento, que veda as juntas entre peças cerâmicas e ajusta os defeitos de alinhamento. Todas essas desempenham as funções de vedação e regularização (MORAES, s.d).

### **2.2.1 Propriedades das Argamassas**

O comportamento das argamassas é analisado no estado fresco e no endurecido. No fresco é verificada a trabalhabilidade da mistura e todos os outros parâmetros relacionados. Também, nesse estado é possível ter uma noção das características do material após seco. No estado endurecido é avaliada a resistência mecânica e as propriedades físicas, tal como porosidade e retenção de água. É essencial fazer essa distinção entre os dois estados, pois há uma mudança abrupta das propriedades do material de um estado para o outro, e o comportamento da mistura ainda fresca influencia nas propriedades depois de endurecida. (TEDESCO, 2016)

No estado fresco, a trabalhabilidade das argamassas pode ser entendida como a facilidade que a mistura tem de tomar forma e de ser manuseada (KRUGER et al., 2013). Estas características são importantes nas etapas de fabricação, transporte e aplicação. Ferreira Pinto, Gomes e Bessa Pinto (2006) apresentam duas características que são evidenciadas na trabalhabilidade; a consistência e a plasticidade. A consistência corresponde à fluidez e sustentação da mistura, ou seja, a resistência às deformações impostas. E a plasticidade é caracterizada pela deformação que o material sustenta, sem romper, após cessar as tensões aplicadas. Essas duas propriedades se complementam e determinam a trabalhabilidade das argamassas.

As propriedades de coesão, retenção de água e exsudação também estão associadas à trabalhabilidade, porém são de difícil mensuração, mas podem ser analisadas pela reologia. Durante a fabricação, a análise desses parâmetros é feita de maneira intuitiva e visual, principalmente da exsudação, onde é perceptível a migração da água para fora da mistura, acumulando-se na superfície e nas beiradas (SILVA, 2005).

As propriedades mecânicas são os principais parâmetros a serem analisados após o endurecimento do material. Conforme Cincotto e Nakakura (2004), a resistência à compressão é mais solicitada para as argamassas de assentamento, já que esta receberá carga proveniente

do peso do sistema de vedação. E as resistências à tração e ao cisalhamento estão mais associadas às argamassas de revestimento, pois, estas recebem os esforços da retração do próprio material e da movimentação da estrutura, que tendem a distender e cisalhar a argamassa de forma que cause fissuras no revestimento.

### 2.2.2 Cimento Portland

Cimento Portland é o nome dado ao cimento convencional amplamente conhecido e utilizado na construção civil. É um produto obtido pela pulverização do clínquer, que é composto, basicamente, por silicatos de cálcio e sulfatos de cálcio, podendo ter adições que modifiquem algumas propriedades. O processamento do cimento foi descoberto pelo químico britânico Joseph Aspdin, quando em 1824 misturou pedra calcária e argila submetendo a mistura a altas temperaturas resultando num pó fino. Esse material apresentava propriedades como cor e durabilidade semelhantes às rochas existentes na ilha britânica de Portland, e, por isso, foi nomeado de Cimento Portland.

Joseph percebeu que esse pó quando misturado com água resultava num material tão duro quanto pedra após seco, e apresentava alta resistência mecânica, além de não se dissolver em água. Assim, descobriu que se tratava de um material com propriedades aglutinantes, que poderia ser usado como aglomerante nas misturas de argamassa e concreto (BATTAGIN, s.d). Logo, o cimento foi caracterizado como um aglomerante hidráulico por ter suas propriedades ativadas quando hidratado pela água, e por permanecer estável depois de endurecido, não se decompondo mesmo sob a ação da água.

Os principais minerais que constituem o cimento são a cal ( $\text{CaO}$ ), a sílica, a alumina e o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ocupam cerca de 95% da composição mineralógica. O restante é composto em maior proporção pela magnésia ( $\text{MgO}$ ), e pelo anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ), que é adicionado para retardar o tempo de pega. Em menor proporção vêm as impurezas, os óxidos de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e óxidos de potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) que constituem os álcalis do cimento (FALCÃO BAUER, 2013). Esses minerais derivam, geralmente, de materiais que podem fornecer cálcio e sílica em maior proporção. Como fonte de cálcio, são utilizados a pedra calcária, o giz, o mármore e conchas do mar. Já, a sílica é extraída da argila e de xistos argilosos. Sendo a argila preferível, pois fornece, também, a alumina, óxidos de ferro e alguns álcalis necessários (AMBROZEWICZ, 2012). Assim, esses materiais se tornam matérias-primas para a

fabricação do cimento. E, dessa forma, as fábricas se instalam ao lado dessas jazidas, a fim de diminuir alguns custos de produção e transporte.

Para formar o cimento, as matérias-primas, depois de mineradas, são misturadas, moídas e submetidas ao forno em altas temperaturas para que ocorram calcinação e modificações estruturais dos elementos. O produto que sai do forno é conhecido como clínquer. Este é um material de natureza granular, com grãos variando de 5 a 25 mm de diâmetro, e que passa por mais um processo de moagem para atingir a finura do cimento, em torno de 1 a 90  $\mu\text{m}$  (COSTA et al., 2009).

Durante o processo de calcinação, são gerados os compostos de silicato tricálcico ( $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $\text{C}_2\text{S}$ ), Aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) e Ferroaluminato tetracálcico ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), que apresentam propriedades hidráulicas que em contato com a água geram os produtos que possibilitam as características de pega e endurecimento. Os compostos de silicato  $\text{C}_3\text{S}$  e  $\text{C}_2\text{S}$  são responsáveis pela resistência inicial e final da pasta endurecida e do aumento de resistência em idades avançadas. Já os compostos aluminatos influenciam na pega, acelerando esse processo, e, também, atuam como fundentes reduzindo a temperatura necessária para a formação do clínquer (ARMANGE, 2005).

### 2.2.3 Hidratação do cimento

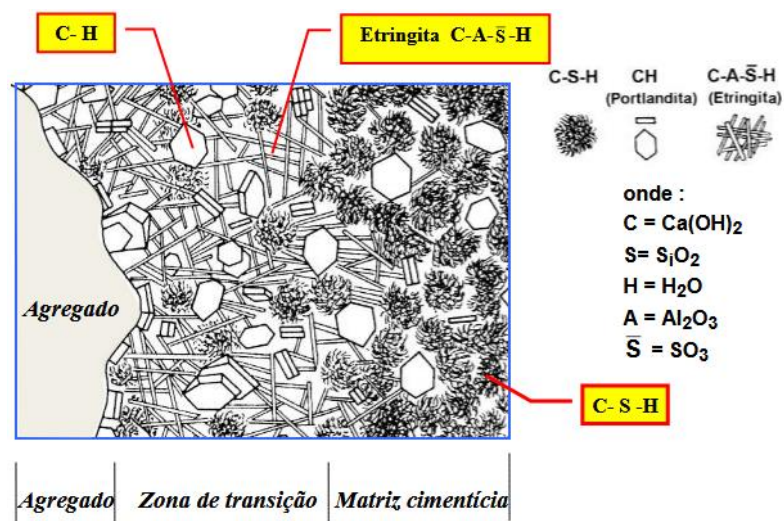
As propriedades desejáveis do cimento são alcançadas quando ocorre reação com a água e conforme o grau de hidratação. Ao serem hidratados, os compostos do clínquer sofrem reações químicas que alteram as propriedades físicas, químicas e mecânicas do sistema. Conforme Metha (1994) apud Armange (2005), os compostos do cimento estão instáveis na temperatura ambiente, então, quando são hidratados, liberam energia na forma de calor e tendem a ficarem mais estáveis.

O processo de hidratação das partículas envolve três etapas específicas: a dissolução de íons, a nucleação e a precipitação das fases hidratadas (OLIVEIRA; GARCIA; PANDOLFELLI, 2007). Na dissolução, ocorre formação de íons cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e tetra-hidroxi aluminato ( $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ), que, quando alcançam um nível de saturação, precipitam-se em formas aciculares resultando na Etringita (C-A-S-H), responsável pela pega e pela resistência inicial, e em monossulfatos hidratados, com formas de placas hexagonais. A etapa de nucleação é um período onde os íons liberados se chocam com as moléculas de água e formam ligações entre as espécies até que atinjam um tamanho crítico, no qual o núcleo fica estável. Na precipitação,

ocorre o crescimento dos núcleos já formados. Durante esse processo, os íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$  são retirados da solução, ocasionando a retomada da dissolução dos compostos do cimento e o contínuo crescimento dos grãos hidratados. Assim, esse ciclo continua até que todos os compostos sejam reagidos com a água.

Os principais produtos gerados a partir da hidratação são os silicatos de cálcio hidratados (Tobermorita C-S-H), hidróxido de cálcio (Portlandita C-H) e sulfoaluminatos de cálcio hidratados (C-A-S-H). Os compostos de C-S-H estão presentes em maior volume na pasta de cimento, e são os principais responsáveis pelo endurecimento e resistência mecânica do material. Sua morfologia varia de fibras amorfas a malhas reticuladas. Já, as partículas de C-H formam cristais prismáticos que vão crescendo quando surgem espaços vazios. Por possuir característica alcalina, esse composto atua de modo passivo na estrutura ajudando a prevenir a corrosão nas armaduras (SILVA, 2005). Estes compostos estão melhor representados na Figura 2, onde é possível entender a forma como se apresentam na pasta de cimento.

Figura 2 - Representação esquemática dos compostos hidratados do cimento.



Fonte: Silva, 2005.

### 2.3 ORIGEM, PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DOS GEOPOLÍMEROS

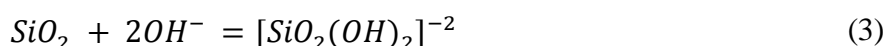
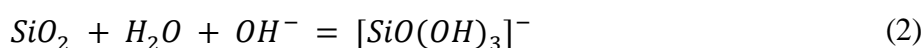
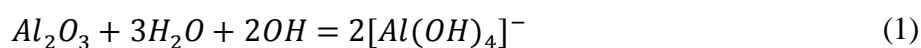
Desde 1970, os materiais geopoliméricos vêm sendo estudados pelo francês Joseph Davidovits, principal responsável pelo reconhecimento dos geopolímeros. Em suas pesquisas investigou uma maneira de produzir materiais resistentes ao calor a partir de matérias-primas naturais de origem geológica. Foram nos materiais com presença de aluminossilicatos que

conseguiu desenvolver polímeros naturais com cadeias moleculares constituídas de silício, alumínio e oxigênio, resultantes da ativação alcalina da sílica que a permitiu atingir condições de reação formando compostos sílico-aluminatos (DAVIDOVITS, 2013).

Davidovits se interessou pela forma como os cimentos antigos eram produzidos, por apresentarem pouco desgaste e alterações químicas apesar de todo o tempo que ficaram expostos (BOCA SANTA, 2012). Um dos cimentos estudados foi um constituinte das Pirâmides do Egito erguidas há mais de 4000 anos. Análises mineralógicas e microestruturais mostraram que os blocos das pirâmides foram feitos com uma mistura de calcário caulínico e hidróxido de sódio (NaOH), formando uma matriz predominante de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) com compostos amorfos de aluminossilicatos, sendo esses compostos bem característicos dos materiais geopoliméricos (DAVIDOVITS, 2002 apud BOCA SANTA, 2012).

Os geopolímeros são formados pelo processo de geopolimerização, o qual consiste em ativar os minerais de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) em um meio altamente alcalino para que ocorram reações que resultem em redes poliméricas tridimensionais (RAO; LIU, 2015). De acordo com Livi e Repette (2015, p. 8) “[...] este processo compreende as etapas de dissolução dos sólidos reagentes e transferência das espécies dissolvidas para uma fase gel, seguida de reorganização, polimerização e enrijecimento”. Na primeira etapa, a dissolução dos sólidos ocorre pelas quebras da ligação covalente entre as moléculas de sílica e alumina quando o pH da solução aumenta. Essas etapas estão esquematizadas na Figura 3.

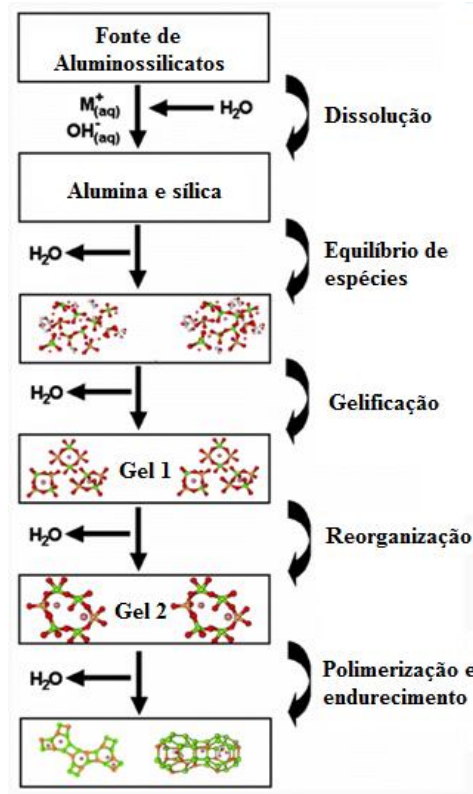
Rahier et al., apud Severo et al. (2013) apresentaram o esquema das reações químicas que descrevem o processo da ativação alcalina de aluminossilicatos. Essas reações, apresentadas nas equações (1), (2) e (3), desenvolvidas por balanço de carga e massa dos elementos, demonstram a reação entre a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e o íon hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) que ocorre na primeira etapa do processo de geopolimerização.



Esses grupos formados se ligam pela atração dos íons hidroxila ( $\text{OH}^-$ ), e se condensam em estruturas tetraédricas liberando moléculas de água no sistema. Boca Santa (2012) apud Rossetto (2017) citam que o tempo de pega do material ocorre em aproximadamente 90 minutos e sofre endurecimento em cerca de 4 horas. Segundo Skaf

(2008), é difícil determinar ao certo o tempo de pega devido ao ganho de consistência rápido dessas misturas.

Figura 3 - Etapas de reações do processo de geopolimerização.



Fonte: DUXSON, et al. (2007).

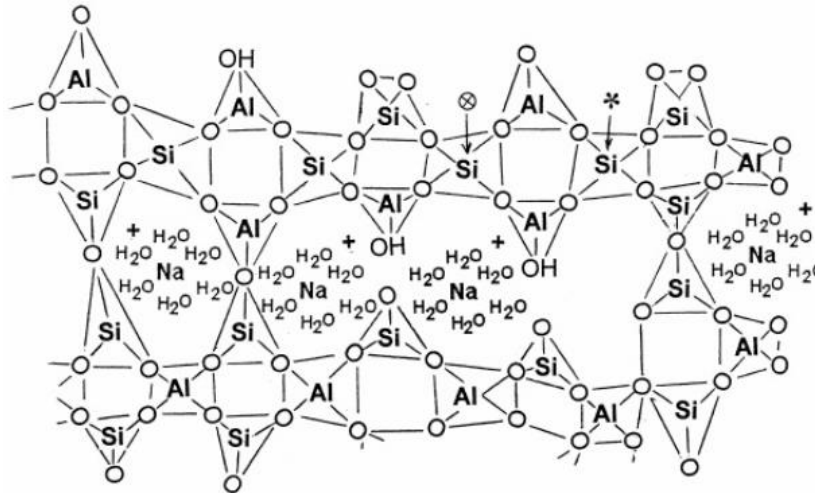
Barbosa, MacKenzie e Thaumaturgo (2000) sugeriram um modelo estrutural esquemático, Figura 4, no qual é possível entender a ligação e o ordenamento dos agrupamentos tetraédricos de Si e Al na cadeia polimérica. Esse modelo foi feito a partir de um estudo do mecanismo de polimerização e da estrutura do produto entre metacaulim e silicato de sódio combinados em meio altamente alcalino.

No desenvolvimento de geopolímeros são necessários materiais com alta fonte de alumina e sílica, minerais abundantes na crosta terrestre. Alguns exemplos de materiais correntemente usados são o metacaulim (sendo este o mais empregado), subprodutos da queima do carvão mineral como as cinzas volantes e cinzas pesadas, escória de alto forno, resíduos industriais, entre outros (NIKOLOV; ROSTOVSKY; NUGTEREN, 2017). Boca Santa (2012, p.34) evidencia essa vantagem do geopolímero que é a flexibilidade de obtenção dele a partir de vários tipos de materiais. Essas matérias-primas, fontes de aluminossilicatos são, normalmente, materiais de baixo custo e de fácil obtenção. Muitos são resíduos



resultantes de processos industriais que podem ser reaproveitados a outros fins além dos aterros sanitários. Tal é o caso do lodo de ETA, que será utilizado nessa pesquisa como fonte de aluminossilicatos em conjunto com o metacaulim.

Figura 4 - Modelo estrutural das cadeias de polímeros inorgânicos.



Fonte: Barbosa, MacKenzie e Thaumaturgo (2000).

### 2.3.1 Metacaulim

O Metacaulim é resultado da calcinação da caulinita de alta pureza a temperaturas controladas, a qual promove a quebra da estrutura cristalina transformando-a em um material amorfo e altamente reativo com propriedades pozolônicas, podendo obter características cimentícias quando ocorrer ativação alcalina (OLIVEIRA et al., 2004). A caulinita é componente majoritário do caulim e é constituída por cristais de silicato de alumínio hidratado, fonte para produção do geopolímero. No caulim, ainda, pode haver presença de quartzo, mica e outros materiais que aumentam seu teor de impurezas, não sendo interessante para o processo de calcinação.

Segundo Rocha (2005), a produção do metacaulim é realizada através das etapas de prospecção da argila caulínica, beneficiamento (etapa a qual se deriva o caulim) e eliminação de impurezas, secagem, calcinação (alcançar nível de reatividade do material), moagem e micronização (reduzir o tamanho das partículas e aumentar a área superficial para ter melhor reatividade). O padrão de partícula para uso comercial é de 2  $\mu\text{m}$ , e há exigência pelas indústrias para que o material fornecido apresente baixa variação granulométrica (LUZ et al., 2008).

Nas pastas hidratadas de cimento Portland, quando o metacaulim entra em contato com o meio altamente alcalino, ocorre dissolução dos íons de silício e alumínio. Estes íons reagem com o cálcio existente na pasta de cimento formando aluminatos, silicatos e aluminossilicatos de cálcio hidratado. Já, nos geopolímeros, após a dissolução do silício e alumínio, os íons passam a se organizar de forma tetraédrica, junto com o oxigênio, para formar anéis de polímeros inorgânicos que, após a conformação da rede, resulta em silicatos de alumínio alcalino amorfo (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ et al., 2006).

### 2.3.2 Solução ativadora dos geopolímeros

Essas soluções atuam como meio altamente alcalino para que ocorra a quebra das ligações, deixando os aluminossilicatos extremamente reativos, e posterior polimerização da matéria (VARGAS et al., 2006). As mais utilizadas são as com base de sódio, como o hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), e as de potássio, hidróxido de potássio (KOH) (HARDJITO; RANGAN, 2005). Severo et al. (2013) evidencia que a diferença entre os ativadores de silicato para os de hidróxido é que o primeiro adiciona sílica no sistema, modificando a razão entre alumina e sílica, gerando consequência nas propriedades e estrutura.

As soluções alcalinas utilizadas na produção dos geopolímeros devem possuir grande quantidade de íons OH<sup>-</sup> (hidroxila) para que a rede tridimensional amorfa comumente encontrada nos materiais de partida seja dissolvida. As matrizes com baixo ordenamento atômico são solubilizadas pelas soluções e posteriormente se transformam em matrizes compactas e com grande resistência mecânica devido aos processos de policondensação (KHALE; CHAUDHARY, 2007 apud AZEVEDO; STRECKER, 2017).

O tipo de solução utilizada influencia no desenvolvimento dos geopolímeros. As soluções controlam e afetam a maior parte das fases da geopolimerização (VAN JAARVELD, 2000 apud SILVA et al., 2014). Segundo Palomo (1999) apud Vaz (2011) as soluções contendo silicato, tanto de sódio quanto de potássio, apresentam taxas maiores de reações do que as soluções com hidróxido, pois a sílica presente inicia a reação com a alumina livre, e faz com que as etapas de dissolução, gelificação até a policondensação ocorram de maneira tão contínua e simultânea que aceleram o processo de desenvolvimento da resistência mecânica. Já, Rocha, Dias e França (2017) concluíram que as argamassas geopoliméricas produzidas com hidróxido de potássio apresentam maior trabalhabilidade, devido a maior solubilidade do potássio que do sódio.

## 2.4 USO DO LODO EM ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS E DE CIMENTO

Existem algumas pesquisas que avaliaram o uso do lodo de ETA em argamassas. Ribeiro (2012) analisou a dosagem do lodo em argamassas cimentícias substituindo o agregado miúdo, e concluiu que esse resíduo aumentou a resistência à compressão do material quando foi substituído em 10% em relação ao agregado. Batalha (2012) submeteu o lodo ao processo de calcinação na temperatura de 650°C, e usou as cinzas como substituição parcial ao cimento. Os resultados mostraram que a resistência à compressão permaneceu igual à referência para as porcentagens de 5 e 15% de substituição. No entanto, o ensaio de porosimetria apresentou redução significativa dos macroporos e aumento dos mesoporos, resultado que auxilia no ganho da resistência mecânica. Gomes et al. (2010) também usaram o resíduo como substituição ao agregado, porém, obtiveram resultados elevados de perda de resistência em todas as porcentagens substituídas. Mas concluíram, ainda assim, que é favorável o uso desse resíduo nas frações de até 5% de substituição. Nas argamassas geopoliméricas, Rossetto (2017) alcançou valores de resistência à compressão de 54,46 MPa para argamassas com adição de lodo na porcentagem de 15% em relação ao metacaulim.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os métodos, os materiais e os ensaios realizados para o desenvolvimento de argamassas cimentícias e geopoliméricas. Sendo que, para as argamassas geopoliméricas, seguiu-se a metodologia desenvolvida na pesquisa de Rossetto (2017), a qual foi a primeira pesquisa desenvolvida no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIConS) da UFSC a estudar o resíduo proveniente da ETA Joinville. Rossetto avaliou o comportamento de argamassas geopoliméricas com adição e substituição parcial do lodo no metacaulim. Assim, esta pesquisa replicou os melhores resultados alcançados pelo autor, apenas com a finalidade de verificar se a amostra do resíduo utilizada neste trabalho alcança os mesmos resultados obtidos por Rossetto (2017).

Esta pesquisa levou em consideração fatores técnicos e ambientais que envolvem o resíduo trabalhado, os quais são:

- A forma física como o lodo é fornecido (com muita umidade), e como o adequar para o uso.
- As propriedades físicas que o material possui que influenciam na sua atuação dentro das argamassas,
- A viabilidade econômica da utilização do produto.

A fim de guiar o estudo a partir desses fatores, foi feita uma abordagem dividida em duas etapas:

1. Caracterização dos materiais e adequação do lodo ETA,
2. Estudo experimental - formulações e análises físicas e mecânicas.

Para o desenvolvimento das argamassas de cimento, o traço cimento/areia e a abertura na mesa de espalhamento (trabalhabilidade) foram mantidos constantes, enquanto a porcentagem de lodo e cimento na mistura foi variando. Nos geopolímeros, a relação sólido/líquido, o traço cimento/areia, a relação silicato/solução e a molaridade da solução permaneceram constantes e os materiais fontes de aluminossilicato (metacaulim e lodo) foram variados.

A produção dos corpos de prova e os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIConS) da UFSC, Campus Joinville, e no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UNISOCIESC, campus Joinville.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nas argamassas cimentícias foram utilizados os seguintes materiais:

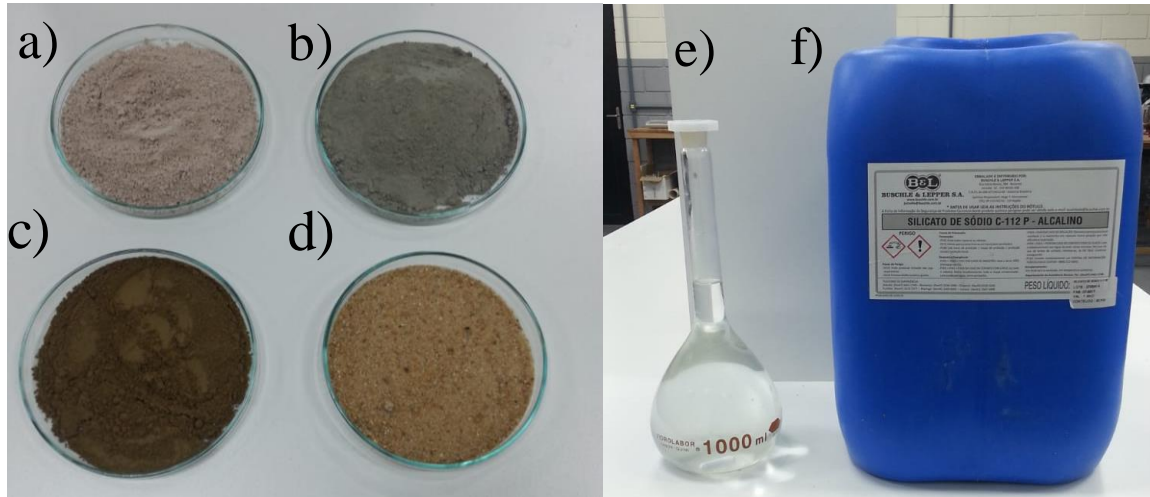
- Cimento CP II Pozolânico,
- Lodo ETA em pó,
- Areia de granulometria média como agregado,
- Água.

Já, nas argamassas geopoliméricas foram utilizados:

- Metacaulim e lodo em pó como fonte de aluminossilicato,
- Solução de  $H_2O + NaOH$  (9 molar) e silicato de sódio como ativador alcalino,
- Areia de granulometria média como agregado miúdo.

A Figura 5 apresenta os materiais utilizados para as argamassas cimentícias e geopoliméricas.

Figura 5 - a) Metacaulim; b) cimento Portland II; c) Resíduo sólido de ETA; d) Areia média, e) Solução hidróxido de sódio, f) Silicato de sódio.



Fonte: Autor, 2018.

#### 3.1.1 Resíduo sólido da ETA Cubatão

O lodo utilizado nessa pesquisa é proveniente da ETA Cubatão, localizada na região norte de Joinville. Cerca de 130 milhões de litros de água por dia são captadas, gerando em torno de 20 toneladas diárias de resíduos sólidos (ÁGUAS DE JOINVILLE, 2017).

O Comitê de Gerenciamento das Bacias Hidrográficas do Rio Cubatão e Cachoeira (2017) indica que o solo do rio é rico em aluminossilicatos e matéria orgânica. Assim, em épocas de muita chuva ocorre maior lixiviação do leito, e como consequência, aumenta a presença de alumínio e de partículas sólidas nas águas que vão para tratamento. Portanto, nessas épocas, não só aumenta a quantidade de resíduos gerados, mas também a presença de alumina e sílica no lodo.

A ETA Cubatão opera com o esquema de ciclo completo, e até 2009 os resíduos gerados no tratamento eram lançados de volta ao rio. Como consequência, a ETA, foi autuada pelo Ministério Público Federal devido ao incorreto descarte de efluentes líquidos e resíduos sólidos, sem tratamento prévio, no rio Cubatão. Assim, em 2012 começou a ser construída a Estação de Tratamento de Lodo (ETL), destinada ao adequado tratamento do lodo e efluentes antes do descarte destes. Em 2014 foi finalizada e, desde então, todo o resíduo gerado na ETA é levado à ETL para receber o correto tratamento antes de ser destinado ao aterro.

De acordo com informações obtidas<sup>1</sup> junto ao supervisor responsável da ETA Cubatão, cerca de quatro caçambas cheias, cada uma com 5t de resíduos sólidos, são levadas diariamente ao aterro sanitário, totalizando 480t por mês de resíduos sólidos destinados ao aterro.

Para a caracterização do resíduo, foram feitos os ensaios de composição granulométrica, espectrometria de fluorescência de raios-X e espectrometria de absorção atômica, a fim de analisar a composição química.

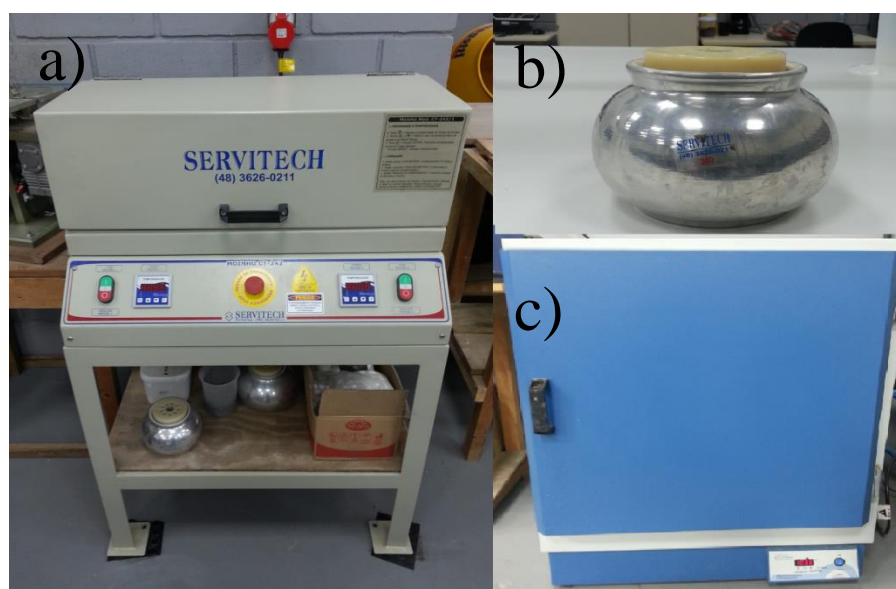
Antes de começar os ensaios, foi necessário adequar o material ao uso empregado. O lodo é um resíduo que sai com muita umidade (saturado) no final do tratamento de água. A presença de umidade no material não é desejada no desenvolvimento dos geopolímeros, pois toda a relação líquida nas misturas de argamassas geopoliméricas provém das soluções de NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, as reações não envolvem partículas de água além daquelas já presentes nas soluções. O acréscimo de água só iria fazer com que a cinética de geopolimerização diminuísse (ROSSETTO, 2017). Já, nas argamassas de cimento, a presença de umidade no lodo não prejudica tanto o desenvolvimento das argamassas, pois as reações ocorrem justamente entre a água e o cimento, mas, afetaria principalmente a trabalhabilidade das misturas, pois não se teria controle adequado sobre a quantidade de água adicionada.

---

<sup>1</sup> Informações fornecidas pessoalmente à pesquisadora durante visita para coleta de material na ETA Cubatão em 07 de novembro de 2017.

Então, o lodo foi processado para então poder ser utilizado. Primeiro, o resíduo foi seco em estufa à 100°C por 24 h e, não ocorrendo calcinação do lodo, e depois, resfriado em temperatura ambiente por mais 24h. Após, foi moído no moinho de bolas da marca Servitech modelo CT-12242 em um jarro de 300 ml, feito com material interior cerâmico e capa de alumínio externa. Para a moagem foram usadas 39 bolas de 14 mm e 17 bolas de 20 mm, que permaneceram moendo o grão por meio da fricção durante 7 minutos a uma rotação de 380 rpm. A quantidade de bolas utilizadas e o tempo de moagem foram definidos de forma experimental por Rossetto (2017), em função da granulometria fina desejada. Os equipamentos utilizados nessa etapa estão apresentados na Figura 6.

Figura 6 - a) Moinho de bolas; b) Jarro 300 ml; c) Estufa.



Fonte: Autor, 2018.

A partir dos resultados do ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X, realizado no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) no SENAI em Criciúma, apresentados na Figura 7, é possível visualizar que esse resíduo é constituído principalmente por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , e, por isso, é um material interessante para o emprego nos geopolímeros.

Figura 7 - Composição química do resíduo sólido da ETA Joinville.

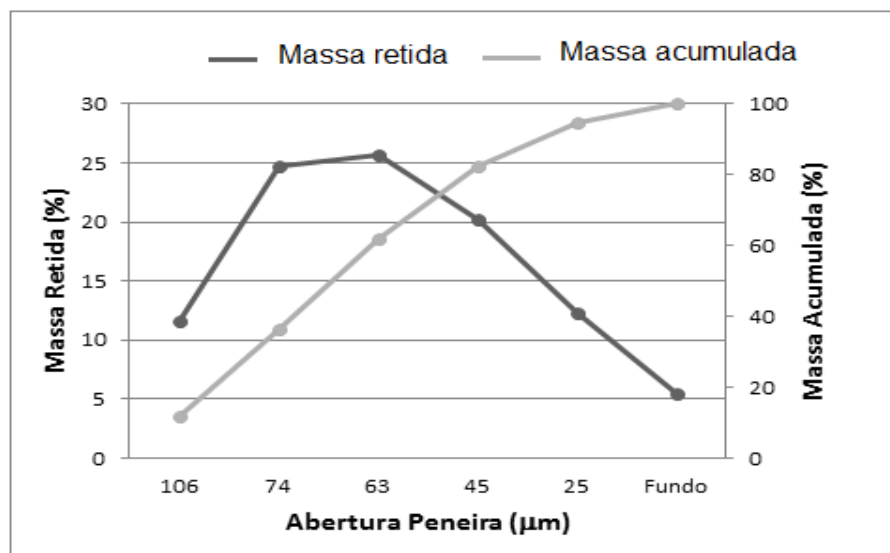
<b>Elementos</b>	<b>Teor (%)</b>	<b>Elementos</b>	<b>Teor (%)</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,44	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
CaO	0,50	Li <sub>2</sub> O	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,15	BaO	< 0,1
K <sub>2</sub> O	0,62	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1
MgO	0,70	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1
MnO	0,11	PbO	< 0,1
Na <sub>2</sub> O	0,28	SrO	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,31	ZnO	< 0,1
SiO <sub>2</sub>	25,61	ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub>	< 0,1
TiO <sub>2</sub>	0,52	<b>Perda Fogo</b>	<b>37,85</b>

(-) Elemento Não Analisado

Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM), 2018.

No ensaio de composição granulométrica, o material foi peneirado nas peneiras de abertura 106, 74, 63, 45 e 25 $\mu$ m. Acima da peneira 106 $\mu$ m o material não foi utilizado. A Figura 8 apresenta a curva granulométrica do resíduo.

Figura 8 - Curva granulométrica do Resíduo Sólido de ETA.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.1.2 Cimento Portland (CPII Pozolânico)

Foi usado cimento Portland tipo 2 com adição pozolânica. De acordo com o fabricante, o material é composto de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, sulfato de cálcio, íller carbonático e pozolana. A produção deste material atende às especificações para cimento



Portland composto da NBR 11578 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991).

### 3.1.3 Metacaulim

O metacaulim utilizado é de fabricação da empresa Metacaulim do Brasil cujo o nome comercial é Metacaulim HP Ultra. A composição química desse material foi determinada por meio do ensaio de fluorescência de raios-X, cujo resultado é apresentado na Tabela 1. Assim, é possível perceber que o metacaulim é composto em sua maior parte por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , respectivamente, e por alguns outros minerais e impurezas em menores quantidades.

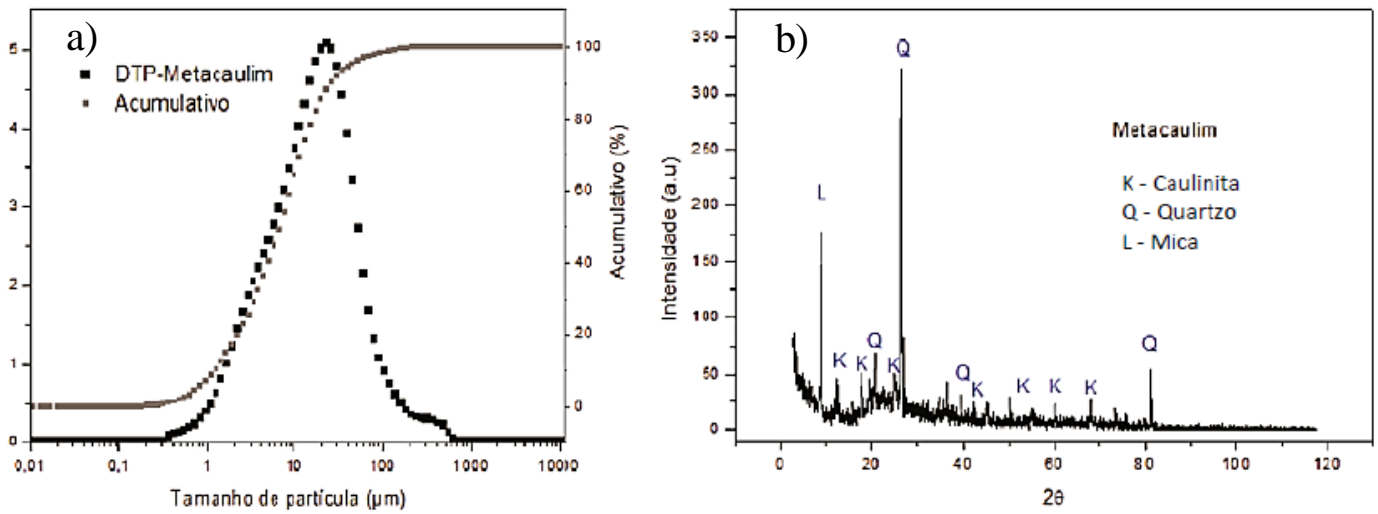
Tabela 1- Composição química do metacaulim

METACaulim										
Óxidos	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{FeO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{MnO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$
Teor (%)	32,6	0,08	2,26	2,13	0,59	< 0,05	< 0,05	0,06	57,12	1,51
Perda ao fogo	2,62%									
Área Específica	32700 $\text{m}^2/\text{kg}$									

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

Com o método de difração de raios-X foram verificadas fases cristalinas como a caulinita (K), quartzo (Q) e a mica (L), Figura 9 b). E pela distribuição do tamanho de partículas foi alcançado o tamanho médio das partículas de 21  $\mu\text{m}$  e  $D_{50} = 6,5 \mu\text{m}$ , Figura 9 a).

Figura 9- a) Distribuição do tamanho de partículas do metacaulim; b) ensaio de difração de raios-X no metacaulim.

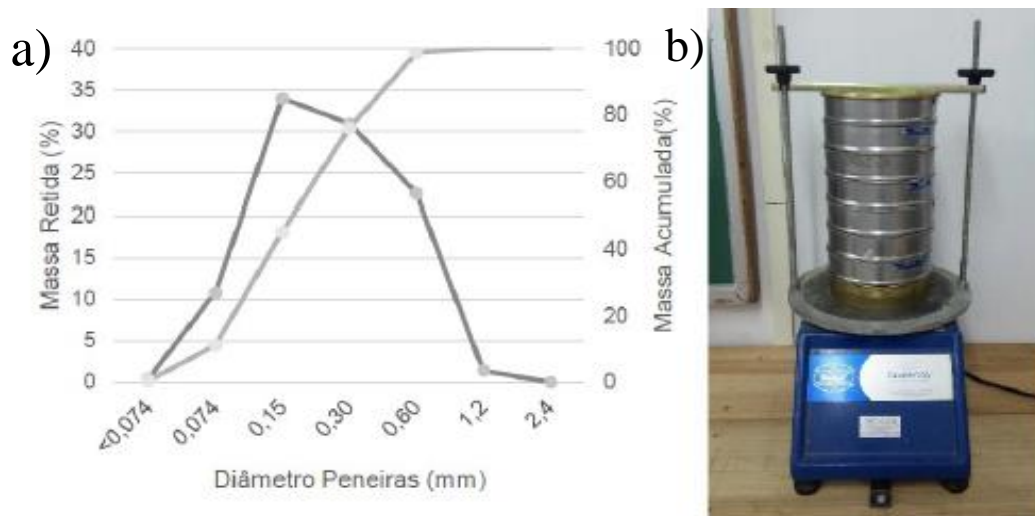


Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

### 3.1.4 Agregado Miúdo

O agregado utilizado foi fornecido pela empresa Supremo Concreto, e possui origem silícea e massa unitária de  $1,59 \text{ g/cm}^3$ . O ensaio de composição granulométrica da areia foi realizado por Hartmann (2016), conforme a NBR 7214 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015). Foi usado um peneirador vibratório e peneiras de tamanho 0,074, 0,15, 0,3, 1,2 e 2,4 mm. A composição granulométrica obtida e os equipamentos utilizados estão apresentados na Figura 10.

Figura 10 - a) Composição granulométrica da areia; b) Peneirador vibratório e peneiras.



Fonte: Hartmann (2016, p. 30).

As frações granulométricas parciais da areia são de 1,4% de fração grossa, 23% de fração média-grossa, 31% da fração média-fina, 34% de fração fina e 11,2% de material passante na peneira 1,2 mm. Assim, o agregado miúdo utilizado é classificado como areia de granulometria média.

### 3.1.5 Solução Ativadora - Hidróxido de Sódio e Silicato de Sódio

Foi utilizado uma solução de 9 mols/l de NaOH, com 98% de pureza, e de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Ambos os materiais foram fabricados pela empresa Buschle & Lepper S/A, e suas especificações técnicas estão apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2- Características Técnicas do Hidróxido de Sódio (BUSCHLE & LEPPER S/A, 2016)

Determinação	Especificação
Concentração (NaOH) (%)	97,0 - 100,0
Carbonatos (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) (%)	Máx. 0,60
Cloretos (NaCl) (%)	Máx. 0,03
Ferro (Fe) (ppm)	Máx. 6,0
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,13 - 2,20
Aspecto visual	Escamas

Fonte: Buschle & Lepper S/A, 2016.

Tabela 3- Composição química do Silicato de Sódio

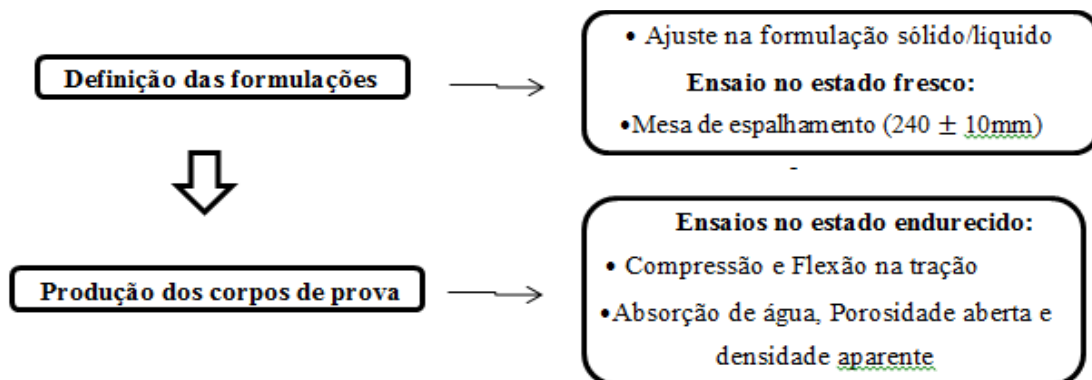
Composição química			
Óxidos	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Silicato	9,11%	28,50%	61,18%

Fonte: Buschle & Lepper S/A, 2016.

### 3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste estudo, foram produzidos corpos de prova de argamassa de cimento variando a porcentagem de lodo adicionado (em relação à massa de cimento) em 10%, 15% e 20%, e substituído em 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. E corpos de prova de argamassa geopolimérica com adição de 15%, e substituição de 25%, ambos em relação ao metacaulim. O primeiro passo foi definir as formulações para cada porcentagem de lodo adicionado e substituído, e, depois, foram produzidos os corpos de prova para a realização dos ensaios. A Figura 11 esquematiza a sequência das atividades.

Figura 11 - Sequência de atividades para os ensaios.



Fonte: Autor, 2018.

#### 3.2.1 Definição das formulações

–Nas argamassas de cimento: as formulações foram definidas junto à mesa de espalhamento, onde foi feita análise da interação entre a água e os demais materiais (cimento e areia), de modo a adicionar uma quantidade ótima de água a fim de chegar a estados de consistência e plasticidade adequados, e manter a trabalhabilidade constante.

Para a confecção das misturas, primeiro foram adicionados a areia, o cimento e a porcentagem de lodo correspondente, e misturados manualmente a fim de aumentar a interação entre os materiais sólidos. Depois, a água foi adicionada e a massa foi levado ao misturador mecânico e misturada por 1 minuto, dando uma pausa de 1 min e 30 s para mistura manual do material retido na lateral da cuba, e misturada mais 1 minuto no agitador. Os equipamentos utilizados são apresentados na Figura 12.

–Nas argamassas geopoliméricas: seguiu-se a metodologia utilizada por Rossetto (2017). Nos geopolímeros, a inserção do lodo dificultou a fluidez das misturas, de modo que

não foi possível manter a trabalhabilidade constante nas massas. Portanto, utilizou-se como parâmetros para determinação das formulações (Rossetto, 2017):

- ausência visual de eflorescência nos corpos de prova;
- manutenção constante da relação sólido/líquido;
- relação molar do silicato/solução dentro dos indicadores de razões ideais citados por Duxson (2007), apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Razões ideais para relação molar dos geopolímeros (Duxson, 2007, p.9, apud Rossetto, 2017).

<b>Mínimo</b>	<b>Relação</b>	<b>Máximo</b>
3,3	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	4,5
0,8	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	1,6
0,2	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	0,48
10	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	25

Fonte: Duxson, (2007, p.9), apud Rossetto (2017).

Figura 12 - a) Misturador mecânico, b) Mesa de consistência (flow table).

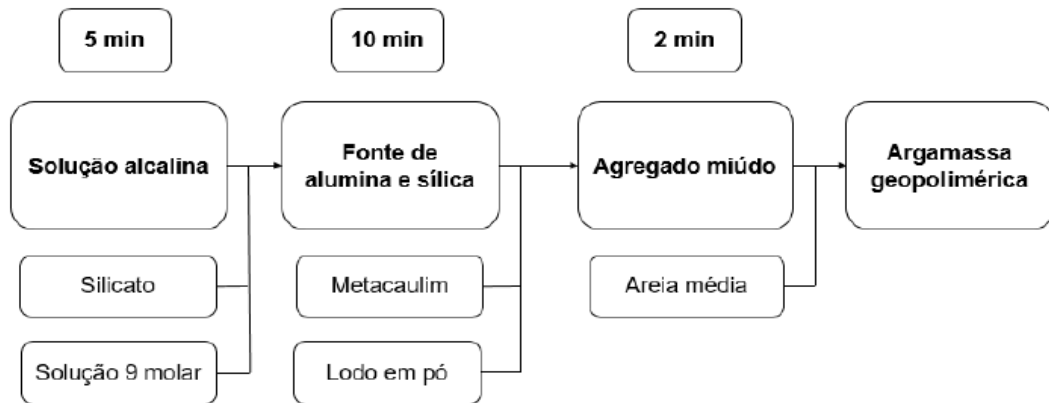


Fonte: Autor, 2018.

O procedimento realizado para as misturas segue a sequência apresentada na Figura 13. Primeiro a solução ativadora foi preparada, misturando o NaOH (9 molar) e o silicato de sódio no agitador mecânico a 100 rpm por 5 minutos. Em seguida foi adicionado o metaculim e o lodo e misturados, também, a 100 rpm por 5 minutos. Após, a areia foi adicionada e a mistura foi agitada por mais 2 minutos. Para a produção dos corpos de prova, as misturas já

prontas foram moldadas conforme a NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), e levadas à estufa por 24h à temperatura de 40°C. Após esse período, os corpos de prova foram desenformados e deixados em uma sala para curar à temperatura ambiente por 28 dias.

Figura 13 - Procedimento para preparação das misturas de geopolímero.



Fonte: Rossetto, (2017, p. 41)

### 3.2.2 Mesa de espalhamento

Este ensaio foi realizado junto à definição das formulações, permitindo determinar os traços das misturas através da avaliação da trabalhabilidade no estado fresco. O valor de abertura na mesa foi mantido constante em  $240 \pm 10$  mm para as argamassas cimentícias, e para as argamassas geopoliméricas a abertura foi livre. O ensaio foi feito conforme a NBR 13276 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). O equipamento utilizado é apresentado na Figura 12 b).

### 3.2.3 Resistência à Compressão

Neste ensaio foram produzidos 3 corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4 x 4 x 16 cm, para cada formulação. A produção dos corpos de prova de argamassa de cimento seguiu a NBR 13279 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), sendo desmoldados com 24h após a moldagem e rompidos aos 28 dias de cura. Na produção dos corpos de prova de argamassa geopolimérica, seguiu-se a mesma norma, porém, após a

moldagem, os corpos de prova ficaram condicionados em estufa a 40°C nas primeiras 24h. Após esse tempo, foram desmoldados e mantidos a temperatura ambiente durante os 28 dias de cura.

Os ensaios de compressão e flexão na tração foram realizados no laboratório de Ensaios Mecânicos da UNISOCIESC. O equipamento utilizado foi uma máquina universal para ensaios mecânicos destrutivos da marca EMIC. A Figura 14 mostra o equipamento e o ensaio sendo realizado.

Figura 14 - Máquina de ensaios mecânicos.



Fonte: Autor, 2018.

### 3.2.4 Densidade aparente, absorção de água e porosidade interna

As propriedades físicas de densidade aparente, porosidade interna e absorção de água foram determinadas a partir dos valores de massa seca, massa imersa e massa saturada de superfície seca do material após os 28 dias de cura usando o princípio de Arquimedes. Para a realização do ensaio foi usado a metade de cada um dos 3 corpos de prova de cada formulação. Essas partes foram colocados na estufa a 100°C por 24 horas a fim de obter a massa seca (ms). Em seguida, as amostras foram deixadas imersas em um recipiente com água durante 48 horas a fim de expulsar o ar nos vazios e preencher todos os poros para a obtenção da massa imersa (mi). Depois de fazer a pesagem da mi, a superfície das amostras foi seca com um papel absorvente e foi realizada uma nova pesagem para determinar a massa saturada de superfície seca (msat).

Com a obtenção dos pesos, é possível chegar nos resultados das propriedades físicas a partir das equações a seguir:

$$\text{Absorção de Água} = \frac{msat - ms}{ms} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Densidade Aparente} = \frac{ms}{msat - msi} \times 100 \quad \text{Eq.2}$$

$$\text{Porosidade Aberta} = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100 \quad \text{Eq.3}$$



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados obtidos a partir da caracterização dos materiais e dos ensaios realizados, e as discussões referentes ao comportamento das argamassas cimentícias e geopoliméricas.

### 4.1 ARGAMASSAS CIMENTÍCIAS

#### 4.1.1 Ensaio no estado fresco – mesa de espalhamento

A Tabela 5 apresenta os resultados para o ensaio da mesa de espalhamento. É possível avaliar que nas argamassas de cimento a presença do lodo reduziu a trabalhabilidade das misturas, sendo necessário aumentar a quantidade de líquido para que a abertura na mesa se mantivesse constante.

Tabela 5 - Abertura das argamassas de cimento na mesa de espalhamento.

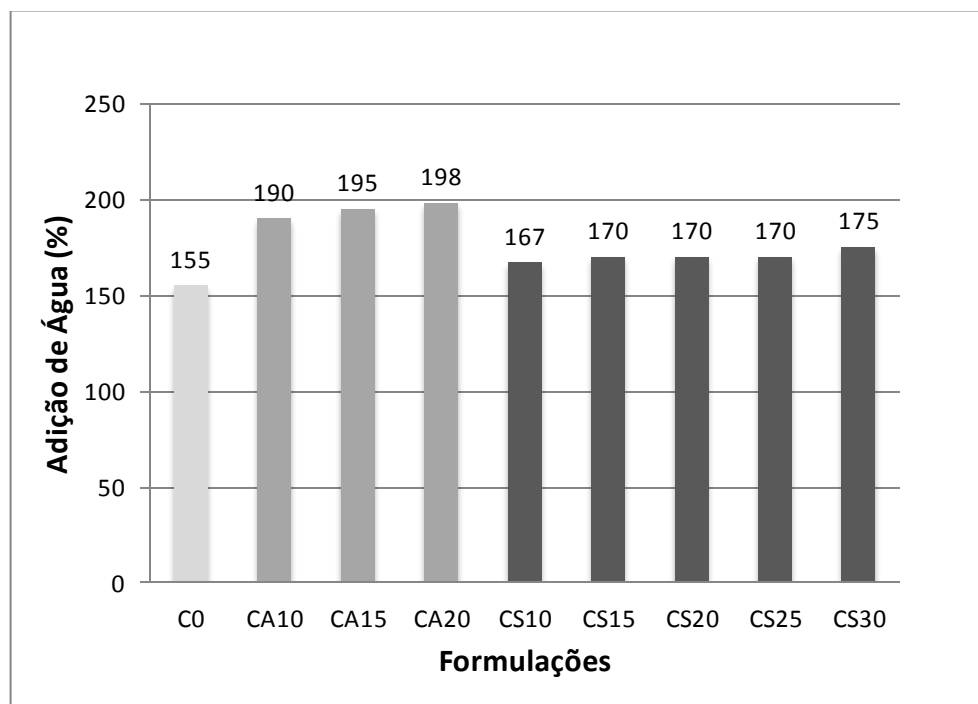
	Argamassa	Lodo (%)	Sólido/ Líquido(%)	Água/ Cimento (%)	Água (ml)	Espalhamento (mm)
Referência	C0	0,0	7,7	0,5	155,0	240,0
Adição	CA10	10,0	6,5	0,6	190,0	235,0
	CA15	15,0	6,4	0,7	195,0	240,0
	CA20	20,0	6,4	0,7	198,0	245,0
Substituição	CS10	10,0	7,2	0,6	167,0	235,0
	CS15	15,0	7,1	0,7	170,0	245,0
	CS20	20,0	7,1	0,7	170,0	240,0
	CS25	25,0	7,1	0,8	170,0	230,0
	CS30	30,0	6,9	0,8	175,0	240,0

Fonte Autor, 2018.

A presença do lodo reduziu a trabalhabilidade das misturas em até 28%. Percebe-se que as formulações com adição do resíduo (CA10-CA20) precisaram de maior acréscimo de água do que as com substituição (CS10-CS30), conforme a Figura 15. Isso acontece pela maior quantidade de material sólido nas misturas de adição. Assim, é necessário maior teor de água para que a película que molha as partículas se forme e crie adesão entre a pasta e os agregados (COSTA; MARTINS; BALDO, 2016). Também, observa-se que com o aumento da porcentagem de lodo nas misturas, a quantidade de água adicionada varia pouco, em torno

de 4%. Como visto nos traços CS15, CS20 e CS25, a quantidade de água foi a mesma para os três traços, ainda assim, a trabalhabilidade foi pouco influenciada. Esse resultado é explicado pela relação sólido/líquido (s/l), que para os três casos foram iguais. A quantidade de massa seca adicionada foi pouca para que afetasse na coesão entre as partículas (FRANÇA, 2013). Batalha (2012) chegou a este mesmo caso ao substituir 10% e 15% de lodo de ETA no agregado miúdo, utilizando relação s/l de 7,4, resultou num espalhamento de 220 mm para ambas as porcentagens substituídas.

Figura 15 - Relação de água adicionada nas argamassas de cimento.



Fonte: Autor, 2018.

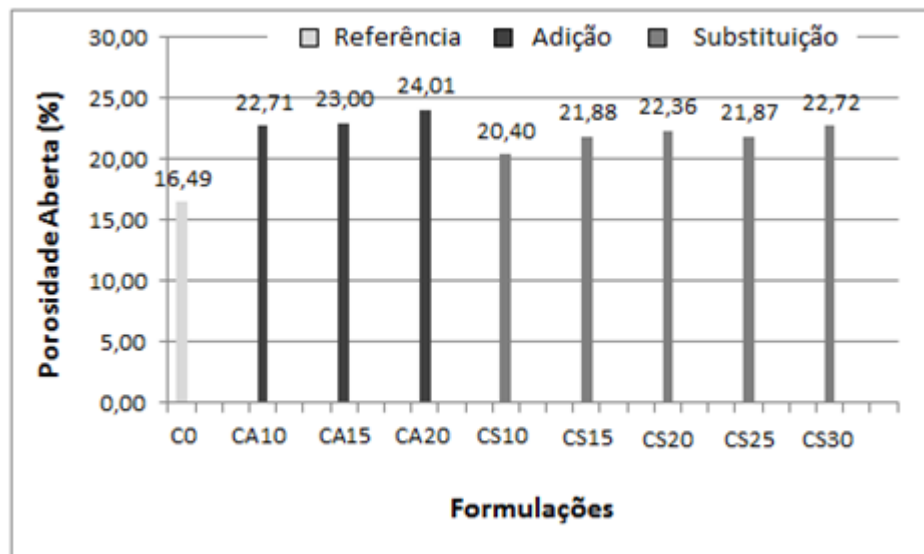
#### 4.1.2 Ensaios no estado endurecido

##### 4.1.2.1 Porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente.

Nos resultados para a porosidade aberta, as amostras de argamassas cimentícias, Figura 16, mostraram que a presença do lodo proporcionou o aumento da quantidade de poros, sendo as amostras de adição as mais influenciadas, apresentando maior porosidade. A CA20 foi a amostra com porosidade mais elevada, em torno de 42% a mais de poros que a referência, e a CS10 foi a que menos apresentou porosidade, com cerca de 24% a mais que a referência. Esse aumento de porosidade em todas as amostras está relacionado com a

trabalhabilidade das misturas. Devido à adição de água para forçar a abertura na mesa de consistência, o traço passou a ter maior relação de líquido para a mesma quantidade de sólidos, resultando em partículas de água livres que evaporaram da mistura durante a cura deixando os espaços vazios. A porosidade do material também está relacionada com a incorporação de ar nas amostras durante os processos de produção das argamassas.

Figura 16 - Valores de porosidade aberta em argamassas de cimento.

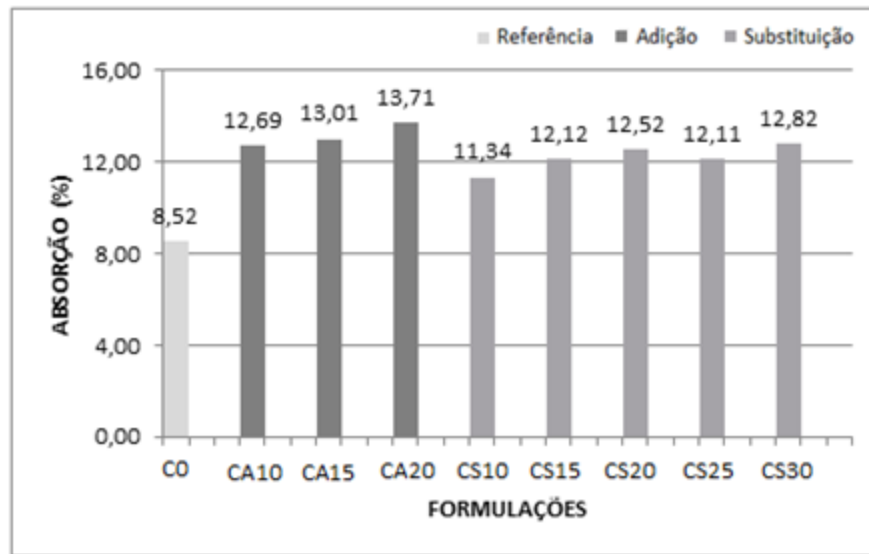


Fonte: Autor, 2018.

As amostras de argamassa de cimento com incorporação de lodo obtiveram maior absorção de água do que a amostra de referência, conforme Figura 17. O traço CA20 foi o que apresentou maior absorção, tendo absorvido 60% a mais que a referência. A CS10 foi a que absorveu menos, mas ainda teve 33% a mais de absorção que a referência. A diferença de absorção entre as amostras só de adição foi de 8% e só substituição foi de 5%, sendo que ambas apresentaram aumento de absorção à medida que o lodo foi adicionado às misturas.

Esse aumento de absorção está relacionado à porosidade do material. Por apresentar maior número de poros, a água teve facilidade para infiltrar e se alojar nos espaços vazios, (COSTA; MARTINS; BALDO, 2016), ocasionando a maior retenção de água pelas argamassas.

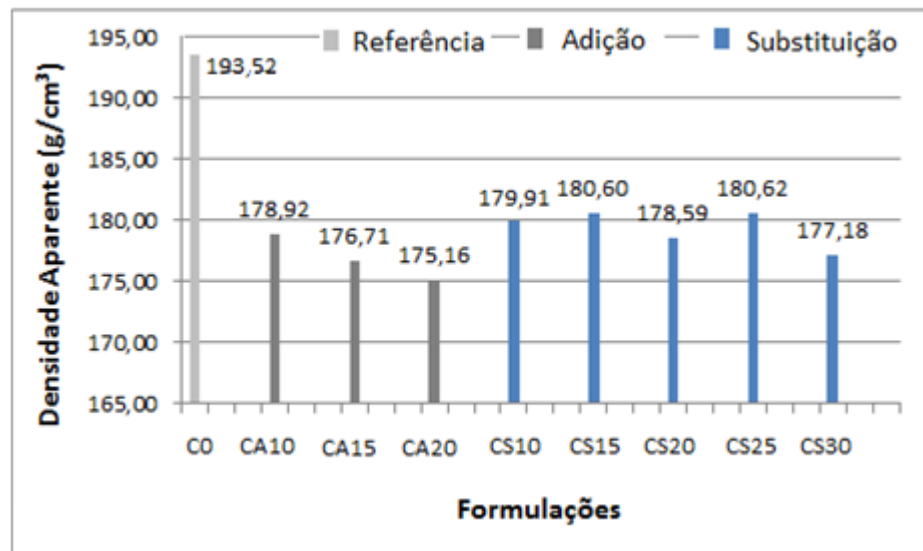
Figura 17 - Resultados de absorção de água para as argamassas cimentícias.



Fonte: Autor, 2018.

Os valores de densidade aparente, Figura 18, diminuíram significativamente e tiveram maior impacto nas amostras com adição do lodo. A densidade diminuiu em média 7,3% na substituição, enquanto na adição caiu 8,5%. Pode-se observar que as amostras com a menor densidade, CA20, e com a maior densidade, CS25, foram as mais impactadas pela porosidade.

Figura 18 - Valores de densidade aparente das argamassas de cimento.



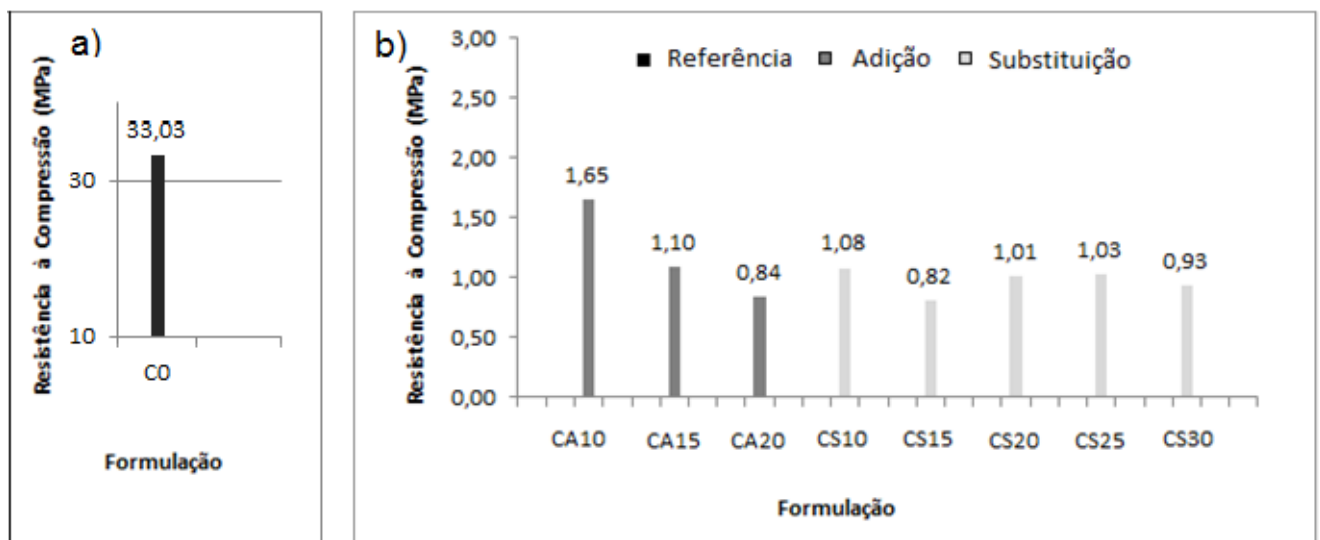
Fonte: Autor, 2018.

Os resultados dessas três propriedades físicas estão relacionados entre si e também com a trabalhabilidade. Nas argamassas de cimento, para todos os três ensaios, as amostras com adição de lodo foram as mais impactadas. Conforme analisado, as amostras de adição foram as que precisaram de maior quantidade de água para ter uma abertura de 240 mm. Porém, nem toda água adicionada na mistura é usada nas reações de hidratação com o cimento. Parte dessa água fica livre na pasta, e durante o processo de cura, evapora deixando vazios ou poros, como mencionado antes. Com o desenvolvimento de poros, há maior facilidade do material reter líquido, e por isso, os resultados de absorção aumentaram (MENEZES et al. 2016). Também, com o maior número de vazios, a massa dos corpos de prova diminui, assim como a densidade. As amostras de substituição também precisaram de maiores teores de água para manter a trabalhabilidade, e o resultado foi o mesmo, aumento da quantidade de poros, aumento da absorção de água e redução da densidade aparente.

#### 4.1.3 Resistência à compressão

O ensaio de compressão foi realizado aos 28 dias de cura, e os resultados apresentados na Figura 19, correspondem à média dos três corpos de prova produzidos para cada formulação. Verifica-se que a referência resistiu à tensão de 33,03 MPa, já, as amostras com lodo apresentaram resultados bem abaixo da amostra branca, alcançando em média 1 MPa de resistência.

Figura 19 – a) Valor de resistência à compressão para a argamassa de referência; b) Valores de resistência à compressão para argamassas de cimento com lodo na mistura.



Fonte: Autor, 2018.

Para as formulações de adição, a resistência caiu com o aumento da quantidade de lodo na mistura. Estes resultados estão relacionados com a trabalhabilidade e a propriedade física de porosidade aberta das amostras. Pode-se observar que a formulação CA20 foi a que obteve menor resistência, mas também foi a que mais recebeu água na mistura, e apresentou valores mais altos de porosidade. Já a CA10 resultou em valores menores de porosidade e menor utilização de água, e obteve maior resistência. A mistura CA10 apresentou maior resistência, atingindo 1,65 MPa.

Nas amostras de substituição, o mesmo resultado acontece. A formulação que obteve maior resistência, CS10, apresentou menores valores de porosidade e menor teor de água adicionada à mistura. A formulação CS15, que obteve menor resistência, teve um corpo de prova que apresentou avaria, tendo comportamento de ruptura diferente das demais amostras, e por isso, seu resultado fez com que a média de resistência para essa formulação ficasse menor.

Comparando os resultados com outros da literatura, observa-se que é comum chegar a esses valores de resistência ao incorporar lodo de ETA nas argamassas. Ribeiro (2012) substituiu o agregado miúdo por lodo nas porcentagens de 5%, 10% e 15% e obteve resistência de 2,39 MPa, 2,98 MPa e 1,84 MPa, respectivamente. Já, Santos (2016) substituiu a cal hidratada pelo lodo, e chegou nos valores de 4,09 MPa para 5% de substituição, 0,67 para 10%, e 0,71 MPa para 15%. Lembrando que para a formulação CS10 e CS15 foram alcançados valores de resistência de 1,08 MPa e 0,82 MPa, respectivamente, ficando bem próximos dos resultados dos autores apresentados.

## 4.2 ARGAMASSAS GEOPOLIMÉRICAS

Pela Tabela 6, observa-se que as argamassas geopoliméricas apresentaram o mesmo comportamento que as argamassas de cimento. A presença do lodo reduziu a trabalhabilidade das misturas, diminuindo em até 42% o espalhamento quando comparado com o valor de referência.

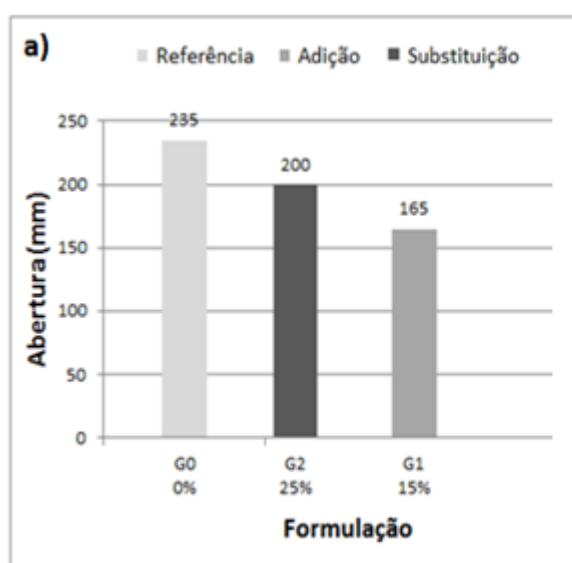
A mistura com adição do resíduo (GA15) foi a mais impactada. Como a trabalhabilidade para essas argamassas não foi mantida constante, é possível observar na Figura 20 a), que a abertura na mesa obteve grande variação. Comparando estes resultados com os de Rossetto (2017), Figura 20 b), verifica-se que os valores de abertura para todas as três formulações (G0, GA15, GS20) ficaram bem próximos aos do autor.

Tabela 6 - Abertura das argamassas geopoliméricas na mesa de espalhamento.

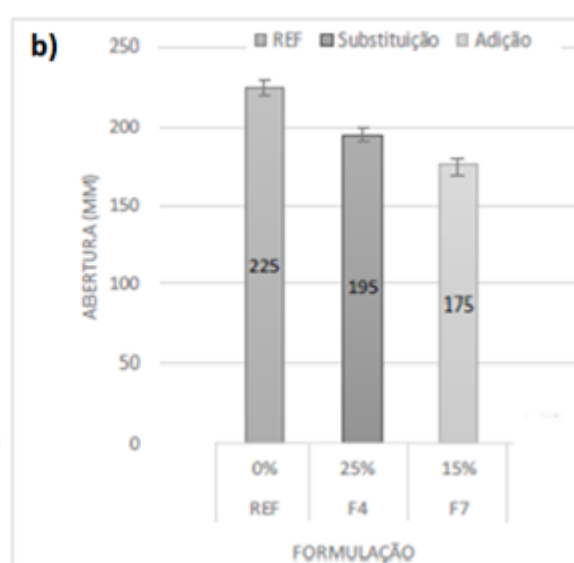
	Formulação	Lodo (%)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (ml)	NaOH (ml)	S/L	Abertura (mm)
Referência	G0	0%	217,94	174,34	3,1	235
Adição	GA15	15%	217,94	174,34	2,8	165
Substituição	GS25	20%	250,63	200,49	3,1	200

Fonte: Autor, 2018.

Figura 20 - a) valores de espalhamento das argamassas geopoliméricas; b) valores de espalhamento alcançados por Rossetto (2017).



Fonte: Autor, 2018.



Fonte: Rossetto, 2017.

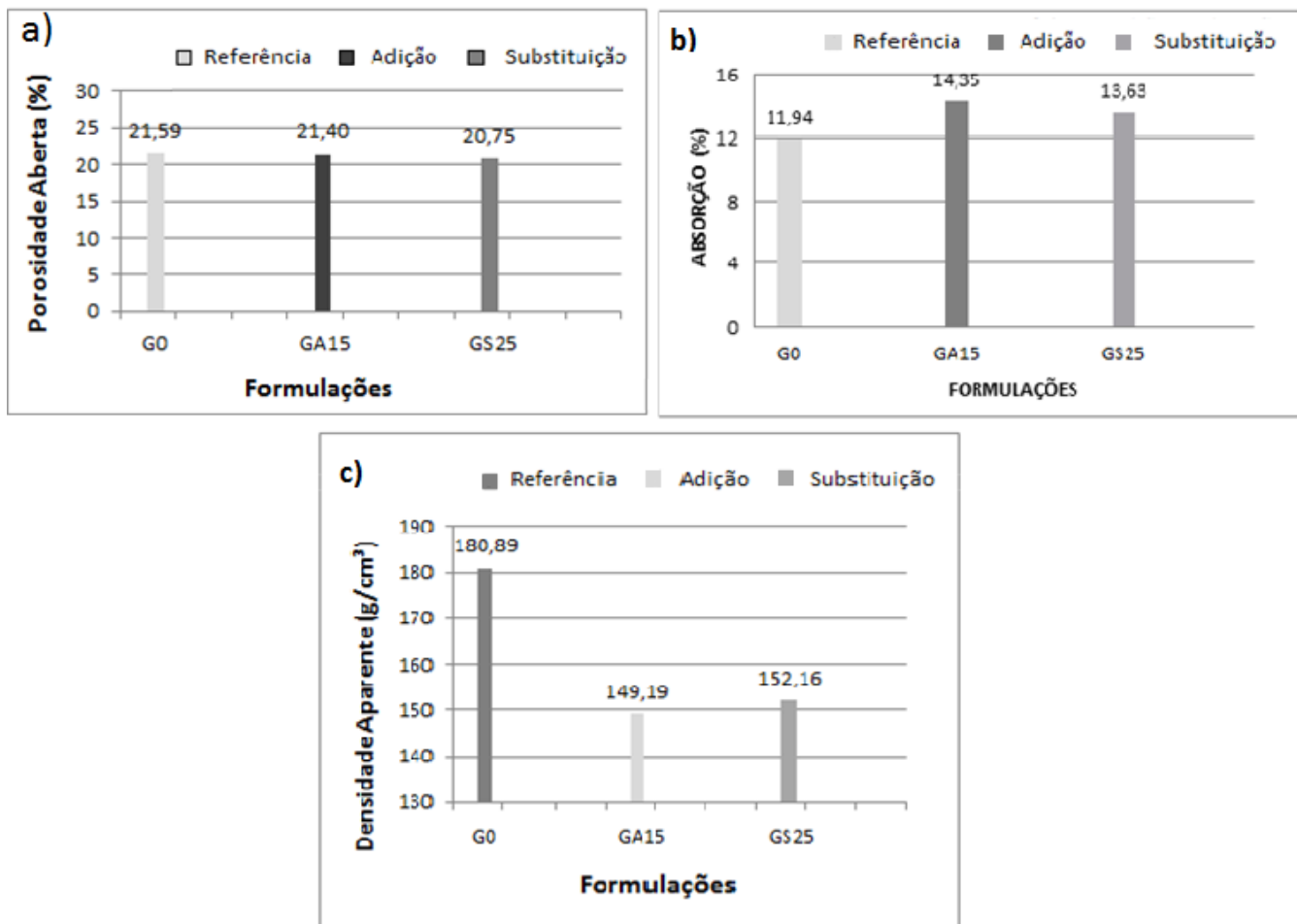
A diminuição da trabalhabilidade, tanto para as argamassas de cimento quanto para as geopoliméricas, pode ser atribuída à maior quantidade de material fino adicionado nas misturas. A presença de partículas finas ocasiona o aumento da área superficial e de contato entre os grãos, trazendo os sólidos mais próximos entre si e gerando maior atrito. Com o aumento da área a ser lubrificada, a quantidade de água usada para molhar a superfície dos grãos é maior, e a existência de água livre na massa de argamassa diminui. Assim, a consistência da mistura aumenta com o atrito, enquanto a fluidez cai.

## 4.2.1 Ensaios no estado endurecido

### 4.2.1.1 Porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente.

Nos resultados para a porosidade aberta, as amostras de argamassas cimentícias tiveram aumento da quantidade de poros. Já nas argamassas geopoliméricas, Figura 21 a), o inverso acontece, a quantidade de poros nas misturas é um pouco menor que a referência. Esses resultados estão ligados com a trabalhabilidade das misturas. Enquanto para as argamassas de cimento a água foi adicionada para forçar a abertura na mesa de consistência, para as geopoliméricas a relação sólido/líquido foi mantida constante e a abertura foi menor. Assim, a quantidade de partículas líquidas livres para evaporar da mistura durante a cura era menor, logo, o número de vazios gerados foi reduzido.

Figura 21 – a) resultados de porosidade aberta; b) resultados de absorção de água; c) resultados de densidade aparente para argamassas geopoliméricas.



Fonte: Autor, 2018.



Para a absorção de água, Figura 21b), as argamassas geopoliméricas também apresentaram valores mais altos que as de cimento. A formulação GA15 foi a que obteve maior absorção, em torno de 20% a mais que a referência.

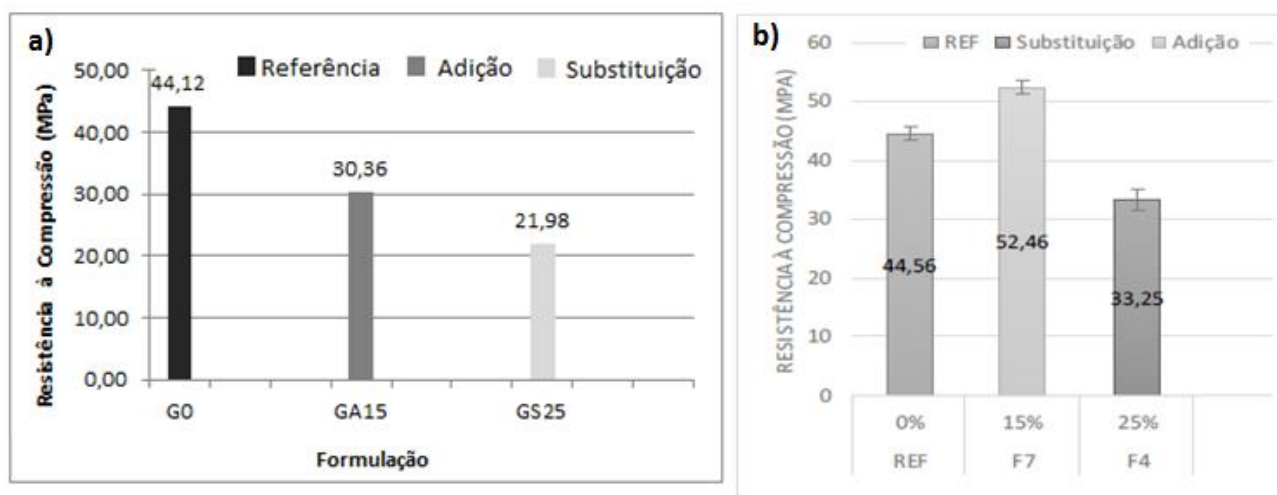
O aumento do traço na amostra de adição acarreta na maior quantidade de sólidos do que líquido na massa. Assim, nem todo material consegue reagir, e partículas sólidas ficam soltas na argamassa. Como a trabalhabilidade e a porosidade do material diminuíram, a explicação que se encontra para o aumento da absorção de água, é que o próprio resíduo é mais poroso, e por isso tem maior capacidade de reter líquido. Também, devido à presença de partículas soltas na mistura, estas absorveram a água que infiltrou durante a imersão dos corpos de prova.

Os valores de densidade aparente, Figura 21 c), tiveram uma queda mais expressiva, mesmo não havendo aumento na porosidade das misturas, chegando a diminuir 17,5% para a amostra de adição, o menor resultado, e 15,8% para a de substituição. Este resultado alcançado pode ter sido causado pela menor densidade do resíduo inserido se comparado com a do material normalmente usado, o metacaulim.

#### **4.2.2 Resistência à compressão**

Ambas as formulações tiveram menor resistência que a de referência, como mostra a Figura 22 a). Mas a formulação GA15 apresentou valores maiores que a GS25. Comparando com os resultados de Rossetto (2017), Figura 22 b), é verificado que os resultados para as amostras de referência são muito próximos, quase iguais. Já, para as com incorporação de lodo, tanto a formulação de adição como a de substituição tiveram valores bem distantes, chegando a uma diferença de 22 MPa para GA15 e 11 MPa para GS25. Este resultado pode ter ocorrido pelas diferenças dos resíduos usados, que, apesar de serem gerados na mesma ETA, possuem composições químicas e mineralógicas bastante variadas devido aos eventos meteorológicos e de estações. Também, as diferenças que ocorrem no processo de secagem e moagem do lodo podem ter interferido na granulometria e na finura do resíduo.

Figura 22 - a) resultados do ensaio de resistência à compressão nas amostras de argamassas geopoliméricas; b) resultados de resistência à compressão alcançados por Rossetto (2017).



Comparando outras pesquisas já publicadas, percebe-se como os resultados de resistência podem ser diferentes dependendo da metodologia desenvolvida e da preparação dos materiais. Por exemplo, Geraldo (2016) substituiu lodo de ETA nas argamassas geopoliméricas, em relação à massa do metacaulim, nas porcentagens de 15%, 30% e 60%, e obteve resistência aos 28 dias de cura de 25 MPa, 22 MPa e 9 MPa, respectivamente. Já Suksiripattanapong et al. (2015), produziu geopolímeros com a proporção de lodo de ETA/cinzas volantes de 70/30, variando as proporções entre os ativadores alcalinos. A máxima resistência que conseguiu chegar foi de 8 MPa aos 28 dias de cura à temperatura ambiente. Santos, Manzato e Filho (2018) produziram geopolímeros com o lodo calcinado à temperatura de 750°, e alcançaram resistência de 46 MPa em 7 dias de cura e de 60 MPa aos 28.

Por fim, conclui-se que para os dois tipos de argamassas, os resultados de resistência, trabalhabilidade e propriedades físicas estão correlacionados, assim como, as características mineralógicas e de composição do resíduo. Pela classificação de resistência à compressão da NBR 13281 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005), as argamassas de cimento com lodo adicionado e substituído nas misturas estão classificadas como P1, por apresentarem resistência menor que 2,0 MPa. Já as amostras de argamassas geopoliméricas se encontram na classe P6, resistindo à mais de 8,0 MPa.

## 5 CONCLUSÃO

Por meio do ensaio da mesa de espalhamento (Flow Table), percebeu-se que a presença do lodo resultou em argamassas cimentícias e geopoliméricas menos fluidas e com trabalhabilidade reduzida. As amostras com adição do resíduo foram mais impactadas que as de substituição, para ambos os tipos de argamassa. O aumento do traço das misturas com adição explica esse resultado. A maior quantidade de sólidos na mistura reduziu a trabalhabilidade, e, por isso, foi necessário que a quantidade de líquido aumentasse para que a trabalhabilidade fosse mantida.

No que se refere às propriedades físicas, nas argamassas cimentícias, todas as amostras com substituição do resíduo apresentaram absorção maior que a de referência, sendo que a absorção cresceu conforme o aumento da porcentagem de lodo na mistura. A densidade aparente diminuiu, e a porosidade aberta aumentou. Pelos resultados da formulação CS30 pode-se observar a relação entre essas propriedades, já que a densidade para essa amostra foi menor enquanto a porosidade foi a maior. As amostras com adição do resíduo foram as mais impactadas, pois foram as que tiveram maior absorção e porosidade, e menor densidade. A formulação CA20 foi a que apresentou maior absorção de água, menor densidade, e maior porosidade entre todas as amostras de argamassa de cimento. Nas argamassas geopoliméricas, a absorção foi maior que a referência, tanto para a adição quanto para a substituição, mas os resultados de densidade e porosidade foram menores. A formulação com adição (GA15) foi a que apresentou maior absorção e menor densidade, enquanto a de substituição (GS25) apresentou menor porosidade.

Para a resistência à compressão, os resultados mostraram que a presença do resíduo de ETA causou uma forte redução dessa propriedade em ambas as argamassas, cimentícias e geopoliméricas, e em todos os teores de lodo adicionado e substituído nas misturas. Nas argamassas cimentícias, a formulação CA10, com 10% de lodo adicionado à mistura, apresentou o maior valor de resistência, 1,65 MPa. Já, nas amostras com substituição, a formulação com maior resistência foi a CS10 obtendo 1,08 MPa de resistência à compressão. As argamassas geopoliméricas obtiveram valores de resistência maiores que as de cimento, chegando a 30,36 MPa na formulação com adição, e 21,98 MPa na de substituição. Ainda assim, os resultados foram menores que a formulação de referência.

A queda da resistência nas argamassas de cimento está relacionada com a trabalhabilidade e as propriedades físicas. A baixa densidade aparente indica maior número de vazios, o que explica o aumento na absorção de água e porosidade aberta.

Nos geopolímeros, a queda nos valores de resistência também está relacionada com as propriedades físicas, mas, também, pode ser explicada pela função aglomerante que o resíduo exerce através do fornecimento de sílica e alumina. O lodo é inserido na matriz para desempenhar a mesma função que o metacaulim, reagir com a solução ativadora. Mas, com o baixo resultado atingido, entende-se que a Si e a Al presentes no lodo são menos reativas que as do metacaulim. Os parâmetros de propriedades físicas também influenciaram na queda de resistência. A baixa densidade aparente indica maior número de vazios, o que explica o aumento na absorção de água, apesar dos resultados baixos de porosidade.

Por fim, conclui-se que da forma como o lodo de ETA foi inserido às misturas, o uso desse resíduo não é viável em argamassas convencionais devido à baixa resistência à compressão alcançada. Já nas argamassas geopoliméricas, o lodo apresentou resultados suficientes de resistência, principalmente na forma de adição, podendo até ser utilizado para fim estrutural. Assim, conclui-se a viabilidade do lodo em argamassas geopoliméricas, tanto na forma de adição, quanto de substituição parcial ao metacaulim.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar o comportamento do lodo calcinado e sua influencia na resistência mecânica de argamassas;
- Adicionar o lodo como substituição parcial do agregado miúdo;
- Testar granulometrias mais grossas do lodo nas misturas de argamassa;
- Verificar resultados mecânicos com tempos de cura maiores que 28 dias;
- Testar técnicas para aumento da reatividade do lodo em geopolímeros.

## REFERÊNCIAS

- ACHON, C. L.; BARROSO, M.M; CORDEIRO, J. S. Resíduos de estação de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Eng Sanit Ambient.** v. 18, n. 2, p. 155-122, abr./jun. 2013.
- ACHON, C. L, et al. I-020 - Impactos ambientais provocados pelo lançamento in Natura de lodos provenientes de Estações de tratamento de Água. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 23. **Anais...** 2005.
- ÁGUAS DE JOINVILLE. Etapas do tratamento. Disponível em: <[http://www.aguasdejoinville.com.br/site/?page\\_id=109&mode=etapas](http://www.aguasdejoinville.com.br/site/?page_id=109&mode=etapas)>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- AMBROZEWICS, P. H. L. Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório. 1. ed. São Paulo: Pini, 2012.
- ARMANGE, L. C. **Utilização de areia de fundição residual para uso em argamassa.** 2005. 41 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, p.2. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação.** Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação.** Rio de Janeiro. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração e à compressão.** Rio de Janeiro. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro. 2005.
- AZEVEDO, A. G. S; STRECKER, K. Influência da composição química das soluções alcalinas ativadoras na produção de geopolímeros a base de cinza volante. **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v. 12, n. 1, p. 39-46. abr, 2017.

BARBOSA, V. F. F; MACKENZIE, K. J.D; THAUMATURGO, C. Synthesis and characterization of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, v. 2, p. 309-317, 2000.

BATALHA, C. T. **Avaliação das propriedades da argamassa com substituição parcial de cimento por cinza do lodo da Estação de Tratamento de Água da cidade de Manaus**. 2012. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2012.

BATTAGIN, A. F. Uma breve história do Cimento Portland. Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em: < <http://www.abcp.org.br/cms/basico-sobre-cimento/historia/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>> Acesso em: 14 mar. 2018.

BOCA SANTA, R. A. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 135 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

BRASIL. Constituição (1990). **Lei nº 9605**, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Casa Civil. Brasília, 12 fev. 1998.

\_\_\_\_\_. Constituição (2010). **Lei nº 12305**, de 02 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. Casa Civil. Brasília, 02 ago. 2010.

CINCOTTO, M. A.; NAKAKURA, E. H. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. São Paulo: EPUSP, 2004. 20p.(Série Boletim Técnico BT/PCC/359).

COMITÊ DE GERENCIAMENTO DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO RIO CUBATÃO E CACHOEIRA- CCJ. Recursos hídricos – plano. Disponível em: <[http://www.cubataojoiville.org.br/index.php?site=recursos\\_planos&tipo=2#inicio](http://www.cubataojoiville.org.br/index.php?site=recursos_planos&tipo=2#inicio)>. Acesso em: 11 nov. 2017.

COSTA, C et al. **Estudo de Argamassas de Base Cimentícia por Microscopia Eletrônica de Varrimento**. Ciência & Tecnologia dos Materiais, Vol. 21, n.º 3/4, 2009.

COSTA. J. S; MARTINS, C. A; BALDO, J. B. Análise da absorção de água por imersão em argamassa com reciclado da indústria cerâmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer cement**, a review. Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, 2013. Disponível em: <[https://www.geopolymer.org/fichiers\\_pdf/GPCement2013.pdf](https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/GPCement2013.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2017.

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, 2007.

EPA. Environmental Protection Agency. **Process design manual: land application of sewage sludge and domestic septage**. Washington, 1995. 290p.

FALCÃO BAUER, L. A. Materiais de construção. Editora LTC. v. 1. 5ª ed. São Paulo, SP. 2013.

FERREIRA PINTO, A. P; GOMES, A; BESSA PINTO, J. **Argamassas**. Apontamentos da disciplina de Materiais de Construção I. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. 2006.

FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A. et al. Quantitative determination of phases in the alkaline activation of fly ash. Part II: Degree of Reaction. **Fuel**, v. 85, p. 1960–1969, 2006.

FILOMENO, O. L. **Caracterização das argamassas de assentamento empregadas na região de Florianópolis e estudo comparativo entre argamassas de assentamento de cimento e cal e cimento e saibro**. 1993. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1993.

FRANÇA, M. S. Comportamento de mistura de sistemas cimentícios multifásicos reativos. 2013. 160 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

GERALDO, H. R. **Aglomerante álcali-ativado contendo lodo de ETA e cinza de casca de arroz**. 2016. 134 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.

GODECKE, M. V. et al. O consumismo e a geração de resíduos sólidos no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia ambiental**. 2012. p. 1700-1712. v. 8.

GOMES, I. A. S. et al. Adição de lodo de estação de tratamento de água em argamassa. In: SEMANA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 11. **Anais...** Coronel Fabriciano, 2010.

HARDJITO, D; RANGAN, B. V. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report – Curtin University of Technology. Perth. 2005. Disponível em: <[https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/5594/19327\\_downloaded\\_stream\\_419.pdf?sequence=2](https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/5594/19327_downloaded_stream_419.pdf?sequence=2)>. Acesso em 06 nov. 2017.

JOINVILLE. Águas de Joinville prossegue com a ampliação da ETA Cubatão. **Rádio Joinville Cultural FM**. 09 out. 2012. Disponível em: <<https://intranet.joinville.sc.gov.br/portallradio/noticia/205-%C3%81guas+de+Joinville+prossegue+com+a+amplia%C3%A7%C3%A3o+da+ETA+Cubat%C3%A3o.html>>. Acesso em: 06 nov. 2017.

KATAYAMA, V. T. **Quantificação da produção de lodo de estações de tratamento de água de ciclo completo: uma análise crítica**. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

LIVI, C.N; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente Construído**. v. 15, n. 3. Set. 2015.

LUZ, A. B. et al. Argila-Caulim. In: \_\_\_\_\_; LINS, F. **Rochas e minerais industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. p. 255-294.

MARQUES, S. M. F. **Estudo de argamassas de reabilitação de edifícios antigos**. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, Universidade de Aveiro. Aveiro, 2005.

MENEZES, J. N et al. Avaliação da porosidade aparente e absorção de água da massa cerâmica para porcelanato em função da incorporação de resíduo de caulim. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA**, 60. Águas de Lindóia, São Paulo. 2016.

MORAES, M. **Argamassas de revestimento e assentamento**. PUC - GO, s.d. Disponível em <<http://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/construcao-civili-1/argamassas-de-revestimento-material-auxiliar>>. Acesso em 07 mar. 2017.

NIKOLOV, A; ROSTOVSKY, I; NUGTEREN, H. Geopolymer materials based on natural zeolite. **Case Studies in Construction Materials**. v.6, p. 198-205, 2017.

OLIVEIRA, I. Y. Q. **Gerenciamento do lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul: Uma análise crítica**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2016.

OLIVEIRA, I. R; GARCIA, J. R; PANDOLFELLI, V.C. Cinética de hidratação de ligantes à base de alumina hidratável ou aluminato de cálcio. **Cerâmica**, v. 53, p. 20-28, 2007.

OLIVEIRA, M. P. et al. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO-CONVENCIONAIS: HABITAÇÕES E INFRAESTRUTURA DE INTERESSES SOCIAIS. **Anais...** Pirassununga, 2004. Disponível em: <[http://www.usp.br/constrambi/producao\\_arquivos/estudo\\_de\\_caulim.pdf](http://www.usp.br/constrambi/producao_arquivos/estudo_de_caulim.pdf)>. Acesso em: 07 nov. 2017.

PAIVA, M. W; PARREIRA, L. R. T. Resíduos das Estações de Tratamento de Água (ETA). **Linguagem Acadêmica**, Batatais, v. 2, n. 2, p. 83-96, 2012.

PORTELLA, K. F et al. Caracterização físico-química do lodo centrifugado da estação de tratamento de água Passaúna. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA AMBIENTAL, 22. **Anais...** Joinville, 2003. Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/Sanepar/Gecip/Congressos\\_Seminarios/Lodo\\_de\\_agua/Caracterizacao\\_do\\_lodo\\_de\\_ETA.pdf](http://www.sanepar.com.br/Sanepar/Gecip/Congressos_Seminarios/Lodo_de_agua/Caracterizacao_do_lodo_de_ETA.pdf)>. Acesso em: 11 out. 2017.

PRIM, E. C. C. **Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto como material de Cobertura de aterro sanitário**. 2011. 279 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

RAO, F; LIU, Q. Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: a review. **Mineral processing and extractive metallurgy review: an international journal**. v.36, p. 399-409, jun. 2015.



RIBEIRO, R. F. **Estudo de dosagem de lodo de ETA em argamassa**. 2012. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

ROCHA, T. S; DIAS, D. P; FRANÇA, F. C. C. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA, CIÊNCIA DE MATERIAIS E INOVAÇÃO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2. **Anais...** Campos dos Goytacazes, 2017.

ROSSETTO, M. **Desenvolvimento de geopolímeros com a incorporação do lodo de Estações de Tratamento de Água**. 2017. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.

SANTIAGO, C. C. **Argamassas tradicionais de cal**. Salvador: EDUFBA, 2007. 202 p.

SANTOS, G. Z. B. **Argamassa geopolimérica à base de lodo de Estação de Tratamento de Água calcinado**. 2016. 115f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2016.

SANTOS, F. P. **Estudo da incorporação do lodo de ETA em argamassa**. 2016. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal do Pampa. Campo Mourão. 2016.

SANTOS, G.Z. B; MANZATO, L. FILHO, J. A. M. Utilização de cinzas de lodo de ETA na síntese de geopolímeros. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA. 4. **Anais...** Manaus, 2018. Disponível em: < <http://www.seminariodoambiente.ufam.edu.br/2016/programacao.html>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

SEVERO, C. G. S et al. Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativados alcalinamente. **Revista eletrônica de Materiais e Processos**, v.8, n.2, p.55-67. jul. 2013.

SILVA, A. M et al. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 20. **Anais...** Florianópolis, 2014. Disponível em: <[https://pdfdocumento.com/influencia-da-concentrao-de-hidroxido-de-sodio-na-sintese-de-\\_59cff6c61723dd3b110e173c.html](https://pdfdocumento.com/influencia-da-concentrao-de-hidroxido-de-sodio-na-sintese-de-_59cff6c61723dd3b110e173c.html)>. Acesso em: 09 nov. 2017.

SILVA, G.J.B. **Estudo do comportamento do concreto de Cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato**. 2005. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

SILVA, M. L. S et al. Análise de geopolímeros a partir de diferentes ativadores alcalinos. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA, CIÊNCIA DE MATERIAIS E INOVAÇÃO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 1. **Anais...** Nova Friburgo, 2015. Disponível em:

SILVEIRA, C. **Desaguamento de lodo de estações de tratamento de águas por leito de drenagem/ secagem com manta geotêxtil**. 2012. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2012.

SKAF, T. B. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

SOBRAL, H. S. **Propriedades do concreto fresco**. Associação Brasileira de Cimento Portland. Estudo Técnico. 2000. 34 p. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3089801/mod\\_resource/content/0/ET15.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/3089801/mod_resource/content/0/ET15.pdf)>. Acesso em: 17 jun. 2018.

SUKSIRIPATTANAPONG, C et al. Unit weight, strength and micro-structure of water treatment sludge fly ash geopolymer lightweight cellular geopolymer. **Construction and Building Materials**. 2015. v. 94, p. 807-816.

TEDESCO, T. D. C. Desenvolvimento de argamassas utilizando granulometrias distintas de perlita. 2016. 47 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville. 2016.

VARGAS, A. S. et al. Ativação alcalina de cinzas volantes utilizando solução combinada de NaOH e Ca(OH)<sub>2</sub>. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61. **Anais...** Rio de Janeiro, 2006.

VAZ, L. F. C. **Estudo do efeito de adjuvantes em geopolímeros obtidos de resíduos de minas**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil de estruturas e construção) – Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Universidade da Beira Interior. Covilhã, 2011.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Cement Technology Roadmap. 2009: Carbon emissions reductions up to 2050. **WBCSD**, 2009. 36 p. Disponível em: <<http://www.wbcd.org/Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/Carbon-emissions-reductions-up-to-2050>>. Acesso em: 30 ago.2017.