

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

MATHEUS ROSSETTO

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM A INCORPORAÇÃO  
DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Joinville  
2017

MATHEUS ROSSETTO

DESENVOLVIMENTO DE GEOPOLÍMEROS COM A INCORPORAÇÃO  
DO LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação  
em Engenharia de Infraestrutura do Centro  
Tecnológico de Joinville da Universidade  
Federal de Santa Catarina como requisito para  
a obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia de Infraestrutura.

Orientadora: Prof. Ma. Simone Malutta

Coorientador: Prof. Dr. Luciano Senff

Joinville  
2017

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

À minha família, pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

À minha orientadora Prof. Ma. Simone Malutta pela orientação e todo o auxílio durante a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luciano Senff por toda a atenção, assistência e contribuição durante todas as etapas.

Ao Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

À Universidade Católica de Joinville pela parceria e disponibilidade do espaço e equipamentos para os ensaios de resistência.

À Companhia Águas de Joinville pelo material cedido, pelas dúvidas prontamente respondidas e oportunidade de realização desta pesquisa.

Aos meus amigos e colegas que de alguma maneira me ajudaram na realização deste trabalho, bem como na graduação.

## RESUMO

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil em todo o mundo, porém sua produção gera uma grande quantidade de CO<sub>2</sub>. Neste cenário, se faz necessária a busca por outras opções mais sustentáveis em relação ao cimento Portland. Os geopolímeros têm chamado a atenção por emitirem menos gases poluentes em sua produção e apresentarem propriedades mecânicas próximas ao do cimento. As matrizes geopoliméricas são uma composição de aluminossilicatos semi-cristalinos ou amorfos ativados por solução alcalina. O metacaulim é utilizado como fonte de sílica e alumina, enquanto o hidróxido de sódio como solução ativadora. O metacaulim, pode ser substituído de forma total ou parcial, por um material ou resíduo que contenha um quantidade significativa de sílica e alumina na forma amorfa à semi-cristalina. Portanto, essa pesquisa se concentrou em analisar as características físicas, químicas e mecânicas de argamassas com a presença de lodo de estações de tratamento de água, como fonte de aluminossilicatos em substituição parcial do metacaulim, como também, utilizando o lodo como forma de adição. As formulações tiveram relação sólido/líquido de 1,5 e relação silicato/solução de 50%/50%. Foram testadas amostras com substituição do metacaulim por lodo com 0%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30% e com adição de 0%, 10%, 15% e 20%. Concluiu-se que, no estado fresco, a incorporação do lodo reduz significativamente a trabalhabilidade da argamassa geopolimérica. No estado endurecido, após os 28 dias de cura, quando o lodo é adicionado em forma de substituição existe uma redução da resistência à compressão e flexão em relação a formulação de referência, sendo que a formulação com maior resistência à compressão foi com 25% de substituição, atingindo 33,25 MPa, redução de 25,39%. No caso de adição, todas as amostras apresentaram um aumento da resistência à compressão e flexão, sendo que a formulação com 15% de adição de lodo obteve 52,46 MPa de resistência à compressão, acréscimo de 17,73%. Com a incorporação do lodo a densidade aparente e a porosidade reduziram e a absorção teve valores variados, aumentando em alguns casos e reduzindo em outros.

Palavras-chave: Geopolímero. Lodo de ETA. Utilização resíduo.

## ABSTRACT

Portland cement is widely used in civil construction worldwide, its production is a lot of CO<sub>2</sub>. In this scenario, it's necessary create a search for more sustainable options in relation to Portland cement. Geopolymers they have called attention to the emission of gases in their production and real estate products everywhere. The geopolymer matrices are a composition of semi-crystalline or amorphous aluminosilicates activated by alkaline solution. Metacaolim is used as a source of silica and alumina, while sodium hydroxide is mixed as the activating solution. Metacaolim can be replaced in whole or in part by a material or residue containing a significant amount of silica and alumina in amorphous form to the semi-crystalline. This research was focused on analyzing the physical, chemical and mechanical characteristics of mortars with the presence of sludge from water treatment plants, as a source of alumino-silicates in partial replacement of metakaolin, as well as using sludge with addition in the geopolymer matrix. The formulations have a solid/liquid ratio of 1.5 and 50% / 50% silicate / solution ratio. Samples with substitution of 0%, 10%, 15%, 20%, 25% and 30% and 0%, 10%, 15% and 20% of the metakaolin were tested. It was concluded that in the fresh state the incorporation of the sludge significantly reduces the workability of the geopolymer mortar. In the hardened state, after 28 days of curing, when the sludge is added in the form of substitution, there is a reduction of the compressive and flexural strength in relation to the reference formulation, and the formulation with the highest resistance to compression was with 25% of substitution, reaching 33.25 MPa, a reduction of 25.39%. In the samples with addition all the samples presented an increase of the resistance to compression and flexion, being that the formulation with 15% of addition of sludge obtained 52,46 MPa of resistance to compression, increase of 17,73%. With the incorporation of the sludge the bulk density and the porosity reduced and the absorption had varied values, increasing in some cases and reducing in others.

Keywords: Geopolymer. WTS sludge. Waste use.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura tetraédrica .....	16
Figura 2 – Geopolimerização .....	16
Figura 3 – Aplicação geopoliméricas com sucesso de aplicações.....	22
Figura 4 – <i>Brisbane West Wellcamp Airport</i> .....	23
Figura 5 – Esquema do posicionamento das unidades de uma ETA convencional .	24
Figura 6 – Calha Parshall com unidade de mistura rápida .....	25
Figura 7 – a) Floculador hidráulico com chicanas de madeira b) Decantadores de alta taxa com placas de PVC c) Flocos acumulados no fundo .....	26
Figura 8 – a) “Filtro russo” b) Esquema de filtragem .....	26
Figura 9 – a) Prensa parafuso b) polímero aniônico .....	27
Figura 10 – a) Metacaulim b) Areia média c) Silicato de sódio d) Hidróxido de sódio e) Lodo em forma de pó .....	32
Figura 11 – Distribuição granulométrica do metacaulim .....	33
Figura 12 – Difração de raios-X do metacaulim .....	33
Figura 13 – a) Moinho utilizado b) Lodo como foi recebido c) Lodo seco em estufa d) Lodo após a moagem .....	35
Figura 14- Curva granulométrica do lodo após a moagem .....	35
Figura 15 – a) Distribuição granulométrica da areia b) Peneirador vibratório .....	37
Figura 16 – Metodologia experimental .....	38
Figura 17 – Procedimento para a produção dos corpos de prova .....	40
Figura 18 – a) Misturador b) Balança com precisão de 0,01g c) Molde e espátulas d) Contador de golpes padrão .....	40
Figura 19 – Equipamentos ensaio de mesa (flow table) .....	41
Figura 20 – Equipamentos utilizados para ensaios em estado endurecido a) Estufa b) Máquina universal para ensaios mecânicos .....	42
Figura 21 – a) Corpos de prova após secagem na estufa b) Corpos de prova imersos em água .....	43
Figura 22 – Valores de espalhamento das formulações realizadas .....	44
Figura 23 – Abertura na mesa de consistência a) Formulação de referência b) 30% de substituição (F5) c) 20% de adição (F8) .....	45
Figura 24 – Amostras com valores diferentes de s/l a) s/l=1,4 b) s/l=1,2 .....	46
Figura 25 – Absorção de água das argamassas aos 28 dias de cura .....	47

Figura 26 – Densidade aparente das argamassas aos 28 dias de cura .....	47
Figura 27 – Porosidade aberta das argamassas aos 28 dias de cura .....	48
Figura 28 - Relações para substituição parcial do metacaulim a) Densidade aparente X absorção b) Porosidade X densidade aparente c) Porosidade X absorção.....	49
Figura 29 – Relação entre porosidade X densidade aparente .....	51
Figura 30 – Resistência à compressão após 28 dias .....	52
Figura 31 – Resistência à compressão X porosidade aberta .....	53
Figura 32 – Resistência à flexão após 28 dias de cura .....	55
Figura 33 – Resistência à flexão X porosidade aberta .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do metacaulim .....	33
Tabela 2 – Composição química do lodo .....	34
Tabela 3 – Especificações do hidróxido de sódio .....	36
Tabela 4 – Composição química do silicato de sódio .....	36
Tabela 5 – Razões ideais para formulação de geopolímeros .....	39
Tabela 6 – Formulações realizadas .....	39
Tabela 7 – Variação percentual da resistência à compressão em relação a formulação de referência .....	52
Tabela 8 – Variação percentual de resistência à flexão em relação a formulação de referência .....	55



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{m}$  – Micrometro

Al – Alumínio

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

CAJ – Companhia Águas de Joinville

CaO – Óxido de cálcio

CERMAT – Núcleo de Pesquisas 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

H – Hidrogênio

K – Caulinita

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

kN – Kilonewton

L – Mica

LDCM – Laboratório de desenvolvimento e caracterização de materiais

$\text{m}^2/\text{kg}$  – Metro quadrado por quilograma

M – Molar

$\text{MgO}$  – Óxido de Magnésio

Máx – Máximo

min – Minuto

MK – Metacaulim

ml – Mililitro

mm – Milímetro

MPa – Megapascal

$\text{MnO}$  – Óxido de manganês

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

NaOH – Hidróxido de Sódio

NBR – Norma Brasileira

O – Oxigênio

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – Pentóxido de Fósforo

pH – Potencial hidrogeniônico

PVC - Policloreto de vinila

Q – Quartzo

REF. – Referência

rpm – Rotações por minuto

s/l – Sólido/Líquido

Si – Silício

SiO<sub>2</sub> – Óxido de Silício (Sílica)

TiO<sub>2</sub> – Dióxido de Titânio

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 OBJETIVOS .....	13
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	13
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.1 GEOPOLÍMERO .....	15
2.1.1 Ativadores.....	18
<b>2.1.2 Metacaulim</b> .....	18
2.2 PROPRIEDADES DO GEOPOLÍMERO .....	19
<b>2.2.1 Estado fresco</b> .....	19
2.2.2 Estado endurecido.....	20
2.3 APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS .....	21
2.4 LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA.....	23
<b>2.4.1 Tratamento de água</b> .....	23
<b>2.4.2 Alternativas para o descarte do lodo de ETA em materiais para a construção civil</b> .....	28
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
3.1 MATERIAIS.....	31
<b>3.1.1 Metacaulim e lodo da ETA</b> .....	32
<b>3.1.2 Hidróxido de Sódio (NaOH) e Silicato de Sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)</b> .....	36
<b>3.1.3 Agregado miúdo</b> .....	36
3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	37
<b>3.2.1 Definição das formulações</b> .....	38
<b>3.2.2 Ensaio no estado fresco</b> .....	41
<b>3.2.3 Ensaio no estado endurecido</b> .....	42
<b>3.2.4 Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta</b> .....	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	44
4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....	44
4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO .....	46
<b>4.2.1 Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta</b> .....	46
<b>4.2.2 Resistência à compressão</b> .....	51
<b>4.2.3 Resistência à flexão</b> .....	54

<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	58
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	59

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é amplamente utilizado em todas as obras da construção civil e tem evoluído pra atender as necessidades com maior qualidade, durabilidade e menor custo (HAGEMANN, 2011). Em razão do volume consumido, atualmente a quantidade de matérias-primas provenientes de recursos naturais é muito significativa, e a energia utilizada para sua fabricação gera grande emissão de gases de efeito estufa, assim como poluição por poeira (ZHANG, 2014).

O concreto mais elementar é formado basicamente por aglomerante + agregado graúdo + agregado miúdo + água. O principal aglomerante é o cimento Portland, assim a comunidade científica tem procurado desenvolver ligantes alternativos capazes de apresentarem melhor desempenho, durabilidade e que sejam mais sustentáveis (HAGEMANN, 2011; WINCRET DESIGNER CONCRETE PRODUCTS LTDA, 2016).

Nesse contexto, surge o concreto de geopolímero, que consiste em uma pasta com ativação alcalina de aluminossilicatos e agregados. (DAVIDOVITS, 2002). Os materiais geopoliméricos apresentam características similares aos materiais à base de cimento, porém, com o diferencial de apresentar menor impacto ambiental.

Os geopolímeros são membros da família de polímeros inorgânicos e podem ser fabricados com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade considerável de silício (Si) e alumínio (Al) na forma amorfa à sem-cristalina (BHARATH, 2017). Assim, é possível utilizar para a sua confecção, materiais que são rejeitos industriais e não tem um descarte adequado na natureza.

Neste cenário, o processo de tratamento de água no Brasil gera grande volume de lodo que necessita ser descartado. Atualmente, o lodo tem sido descartado principalmente nos recursos hídricos próximos ou em aterros sanitários de lixo urbano. Os resíduos, quando lançados nos cursos de água sem o tratamento adequado, colaboram para aumentar a concentração de metais tóxicos, além de diminuir significativamente a luminosidade do meio. Consequentemente, o tratamento e descarte é uma atividade complexa com custos operacionais elevados. (BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2011; RODRIGUES; HOLANDA, 2013). O lodo das estações de tratamento de água (ETA) é um material de resíduo rico em minerais de silicatos e

matéria orgânica (RODRIGUES; HOLANDA, 2013). Desta forma, se torna um material muito atrativo para a produção de geopolímeros.

Diante disso, esta pesquisa se concentra em analisar propriedades físicas e mecânicas de argamassas geopoliméricas fabricadas com a utilização em diferentes quantidades do lodo de estações de tratamento de água em substituição parcial do metacaulim e como adição em uma matriz preestabelecida. O lodo utilizado, foi cedido pela Companhia Águas de Joinville e é proveniente da Estação de Tratamento de Lodo (ETL) da ETA Cubatão.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo produzir argamassas geopoliméricas com a incorporação de lodo de estações de tratamento de água em substituição parcial do metacaulim, bem como adição em uma matriz predeterminada.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da presença do lodo nas argamassas geopoliméricas em relação às propriedades no estado fresco (*flow table test*);
- Mensurar a interferência do lodo no estado endurecido (resistência a compressão e flexão, porosidade aberta, absorção de água e densidade aparente) aos 28 dias de cura;
- Verificar a relação entre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas geopoliméricas aos 28 dias de cura.

O trabalho será dividido em cinco capítulos. O capítulo 1, contém a introdução, na qual apresenta a problemática, a justificativa, a metodologia, os objetivos e a delimitação deste trabalho. No capítulo 2, estará contida a fundamentação teórica onde todos os temas importantes para o entendimento do trabalho serão abordados. O capítulo 3, apresentará a metodologia utilizada bem como os materiais e equipamentos utilizados. No capítulo 4, serão apresentados todos os resultados

obtidos que serão avaliados e discutidos. O capítulo 5, mostrará a conclusão e a verificação se os objetivos traçados foram alcançados ao final do trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os assuntos relevantes para o entendimento e desenvolvimento sobre o tema.

### 2.1 GEOPOLÍMERO

O termo “geopolímero”, foi criado por Davidovits em 1978 para designar uma família de ligantes minerais com composição química semelhante à da zeólita, porém com uma microestrutura mista, sendo amorfa à semi-cristalina (SKAF, 2008).

Dyer (1988) apud Pinto (2004) relata que as zeólitas são grupos de aluminossilicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos (...) formam-se na natureza, por exemplo, pela interação entre cinzas vulcânicas muito finas e praticamente amorfas em ambientes lacustre de caráter alcalino (águas com elevado teor de carbonato e bicarbonato de sódio). É possível também obter zeólitas nas mesmas condições a partir de sílica biogênica (esqueletos de radiolários e foraminíferas), certas argilas, feldspatos e algumas formas de quartzo.

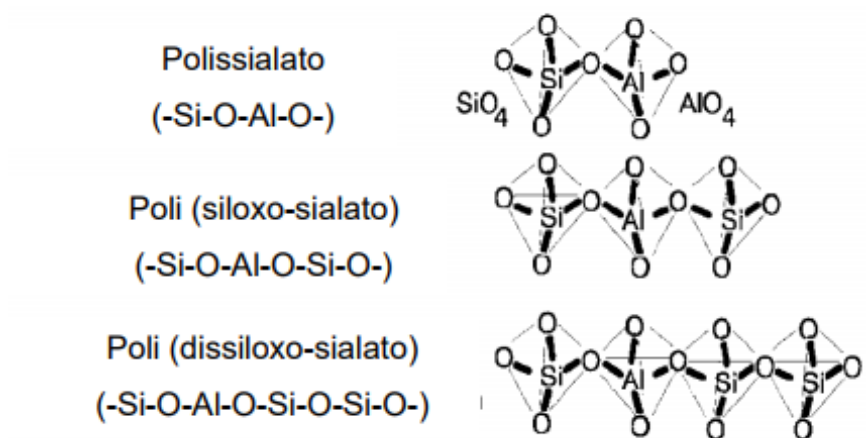
Do termo “geopolímero”, “geo” simbolizara a semelhança com materiais geológicos e “polímero” a química dos silico-aluminatos, sendo que, através destes, surgiram os polissialatos (BUCHWALD et al., 2005).

Os “polissialatos”, abreviatura de poli-silico-aluminatos (Si-O-Al), são anéis de polímeros formados entre  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  em coordenações tetraédricas com quatro oxigênios (DAVIDOVITS, 2002). Vassalo (2013) expõe que a estrutura dos polissilicatos representa polímeros naturais resultantes da reação chamada geo-síntese. A reação de geo-síntese induz o alumínio por ativação alcalina em uma estrutura de matriz silicosa (SILVA, 2000).

Essa transformação é baseada na organização e arranjo tridimensional dos átomos de silício (Si) com os de alumínio (Al). De acordo com a razão Si/Al os arranjos são formados (VASSALO, 2013). Estes podem ser divididos em três classes (figura 1), sendo elas: PS→Poli (sialato) com razão Si/Al=1, PSS→Poli (sialato-siloxo) com razão Si/Al=2 e PSDS→Poli (sialato-disiloxo) com razão Si/Al=3 (KOMNITSAS et al., 2007).



Figura 1 – Estrutura tetraédrica



Fonte: Davidovits (1994, p. 2)

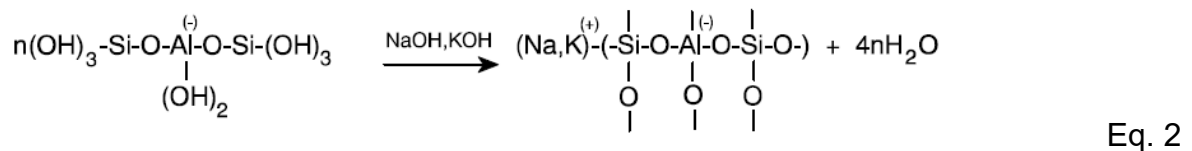
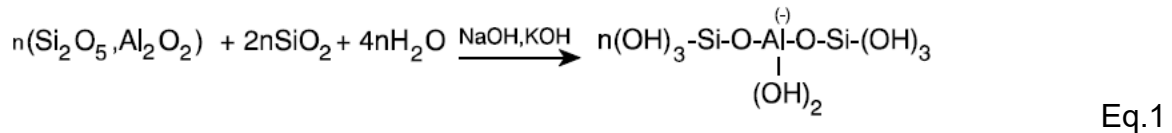
O geopolímero é obtido a partir da reação de policondensação, denominada geopolimerização. A policondensação, é a dissolução da sílica e alumina por um meio alcalino, quebrando assim as ligações originais da matéria-prima, formando um gel, que é convertido numa malha tridimensional de silico-aluminato, processo esse, com uma evolução acelerada. Após a formação do gel, ocorre à reorganização e consequentemente a polimerização e endurecimento da argamassa. (figura 2) (CESARI, 2015; VASSALO, 2013).

Figura 2 – Geopolimerização



Fonte: Cesari (2015, p. 33)

Segundo Davidovits (1994) a reação de geopolimerização é exotérmica e pode ser esquematizada como apresentado nas Equações 1 e 2.



Na equação 2, percebe-se que água é liberada durante a reação. Esta não tem função na reação química, apenas fornece trabalhabilidade à mistura durante a manipulação. Esta água é expelida da matriz no processo de cura e secagem (VASSALO, 2013).

O endurecimento dos geopolímeros deve-se à policondensação do aluminato hidrolisado e o silicato (PINTO, 2000). As variações das matérias-primas utilizadas altera o tempo de pega. Normalmente o tempo é de cerca de 90 minutos e em 4 horas o material sofre endurecimento. (BOCA SANTA, 2012).

Os geopolímeros podem ser fabricados com qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade adequada de sílica e alumina na forma amorfa à semi-cristalina (BHARATH, 2017). Assim, aceitam em sua formulação a utilização de matérias-primas naturais e resíduos gerados na indústria, diminuindo assim os custos de sua produção e o impacto ambiental gerado (BOCA SANTA, 2012).

Os geopolímeros fazem parte de uma classe de materiais com propriedades cimentícias, são materiais com grande potencial tecnológico por aceitarem em sua formulação matérias-primas naturais ou resíduos industriais de diversas fontes, desde que os resíduos sejam ricos em aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos e que tenham passado por tratamento térmico, o que os torna mais reativos para posteriormente sofrerem ativação através de uma fonte altamente alcalina. (BOCA SANTA, 2012, p. 34).

Como visto acima, os geopolímeros são formados basicamente por uma fonte de aluminossilicato, geralmente o metacaulim e um ativador alcalino, usualmente hidróxido de sódio ou potássio.

### 2.1.1 Ativadores

Para formar um geopolímero é necessário um ativador. O ativador é responsável pela dissolução dos aluminossilicatos em um meio aquoso e em condições altamente alcalinas (DAVIDOVITS, 2009).

Palomo et al., (1999) definem a ativação alcalina como um processo químico que transforma estruturas vítreas (amorfos, parcialmente amorfos ou metaestáveis) em um material cimentício compacto. As partículas do material fonte de aluminossilicatos dissolvem-se ao entrarem em contato com a solução ativador, ocorrendo a quebra das ligações originais da matéria-prima (CESARI, 2015).

A ativação pode ser feita utilizando qualquer cátion de origem alcalina, como Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Ba<sup>++</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>. O hidróxido de sódio e o hidróxido de potássio são os ativadores mais utilizados atualmente (BOCA SANTA, 2012; GOLDONI, 2014). Neste momento, o hidróxido de sódio tem sido mais utilizado, em razão de apresentar um custo de produção bem mais baixo, o que define sua escolha (BORGES, 2014).

Os aluminossilicatos, ao entrarem em contato com uma solução alcalina dissolvem-se, pois ocorre a lixiviação de Al<sup>3+</sup> e Si<sup>4+</sup>, assim, o ativador ideal é aquele que está na concentração suficiente para que ocorra o balanceamento destas cargas nos tetraedros. Para que esse processo ocorra corretamente e as ligações originais da matéria-prima sejam quebradas, a concentração do ativador deve ser elevada. A maioria dos autores defendem que a concentração de NaOH esteja na faixa de 5 a 16 mols (BOCA SANTA, 2012).

### 2.1.2 Metacaulim

Para formar um geopolímero é necessário uma fonte de sílica e alumina na matriz. O metacaulim tem sido amplamente utilizado como esta fonte, devido principalmente, à sua elevada taxa de dissolução em meio alcalino e à facilidade de controle da relação Si:Al (CESARI, 2015).

O metacaulim possui em sua composição elementos essenciais para a produção de geopolímeros, entre eles SiO<sub>2</sub>, cerca de 52%, e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com aproximadamente 40%. Os outros 8% são considerados impureza composta

de quartzo e outros argilominerais como o feldspato, a mica, gipsita, ferro e materiais orgânicos (NITA, 2006, p. 8).

Este, é obtido do mineral caulim. O caulim gera o metacaulim através do processo de desidroxilação (perda de íons OH da estrutura cristalina original), o qual se dá por tratamentos térmicos. Desta forma, o processo gera uma estrutura amorfa, logo, existe um aumento da sua reatividade, o tornando assim mais eficiente para a ação alcalina (BOCA SANTA, 2012; BORGES, 2014). Segundo Davidovits (1994), em função da transformação do caulim em metacaulim, o material se torna muito mais reativo, adquirindo propriedades pozolânicas.

Segundo Vassalo (2013) o produto obtido na transformação do caulim em metacaulim pode ter diferentes graus de finura, superfície específica e também apresentar colorações variadas. Contudo, LI *et al.*, (2010), diz que apesar das fontes de metacaulim variarem muito em tamanho de partícula, pureza e cristalinidade da origem da caulinita, quando adicionadas à matriz geopolimérica, a dispersão destas partículas afeta muito pouco o comportamento reológico e o grau de reação álcali-ativado.

## 2.2 PROPRIEDADES DO GEOPOLÍMERO

Para conhecer as características e propriedades dos geopolímeros é importante compreender seu comportamento no estado fresco e no estado endurecido (SILVA, 2005).

### 2.2.1 Estado fresco

No estado fresco, a argamassa geopolimérica apresenta um comportamento similar a um material fluído. Neste estado, de todas as propriedades existentes a trabalhabilidade é uma das mais importantes. A trabalhabilidade determina a consistência, plasticidade e facilidade de mistura da argamassa, sendo que estas variam de acordo com a aplicação. Essa propriedade pode ser alterada aumentando ou diminuindo a quantidade de água na mistura ou alterando a relação sólido líquido (SIMÕES *et al.*, 2012).

Segundo Pinto (2006), os geopolímeros apresentam propriedades de destaque no estado fresco como: boa trabalhabilidade, boa coesão e acabamento

superficial, o que resulta em um ganho rápido de resistência mecânica e dureza superficial. No entanto, Vassalo (2013), relata que estudos demonstram que as propriedades dos geopolímeros podem ser afetadas por uma pequena alteração na quantidade de Si e Al disponíveis na reação, assim é necessário um estudo completo da reatividade das matérias primas.

Para Pasuello (2011), se não houver um controle dos materiais no estado fresco as propriedades no estado endurecido (retração, porosidade, resistência mecânica, durabilidade) podem ser alteradas.

## **2.2.2 Estado endurecido**

### **2.2.2.1 Propriedades físicas**

O conhecimento das propriedades físicas é importante pois elas se relacionam e interferem nas propriedades mecânicas do mesmo. Estas características, podem ser facilmente obtidas usando a lei de Arquimedes. Este princípio, relaciona três tipos de massas: a seca, submersa e com superfície seca, sendo obtidas com a secagem em estufa, imersão em água e com a secagem superficial, respectivamente. Os corpos de prova utilizados devem ter completado 28 dias de cura (PENNING, 1989).

Isaia (2010) destaca nos geopolímeros, a resistência ao fogo, rápido endurecimento, durabilidade, boa trabalhabilidade, retração baixa, tempo de pega rápido.

### **2.2.2.2 Propriedades mecânicas**

Dentro das características mecânicas pode ser destacada a resistência à compressão, que é o parâmetro fundamental para o cálculos estruturais de várias obras da construção civil.

Apresenta resistência à compressão de 15 MPa a 20°C e 22,5 / 24 MPa a 23 / 25°C em 4 horas após a sua aplicação. Aos 28 dias ultrapassa 100 MPa. O calor radiante acelera a pega e o endurecimento (a 65°C apresenta em 1 hora 6,89 MPa e em 4 horas 41,34 MPa). Devido à elevada resistência mecânica inicial, o cimento GP pode ser usado na produção de pavimentos que exijam

rápida liberação para uso (4 horas), tais como: obras em pistas de aeroportos, vias de tráfego intenso, manutenção industrial, reparos de estruturas, fixação de máquinas e equipamentos [...] (WINCRET DESIGNER CONCRETE PRODUCTS LTDA, 2016).

A resistência mecânica pode variar de acordo com alguns parâmetros, sendo eles: a distribuição do tamanho das partículas, a natureza amorfa da matéria-prima sólida, relação Si/Al, concentração do ativador, entre outros (XU *et al.*, 2001 apud KOMNITSAS *et al.*, 2007). Palomo *et al.* (1999) descrevem que a temperatura e o tempo de cura interferem no comportamento mecânico.

### 2.3 APLICAÇÕES DOS GEOPOLÍMEROS

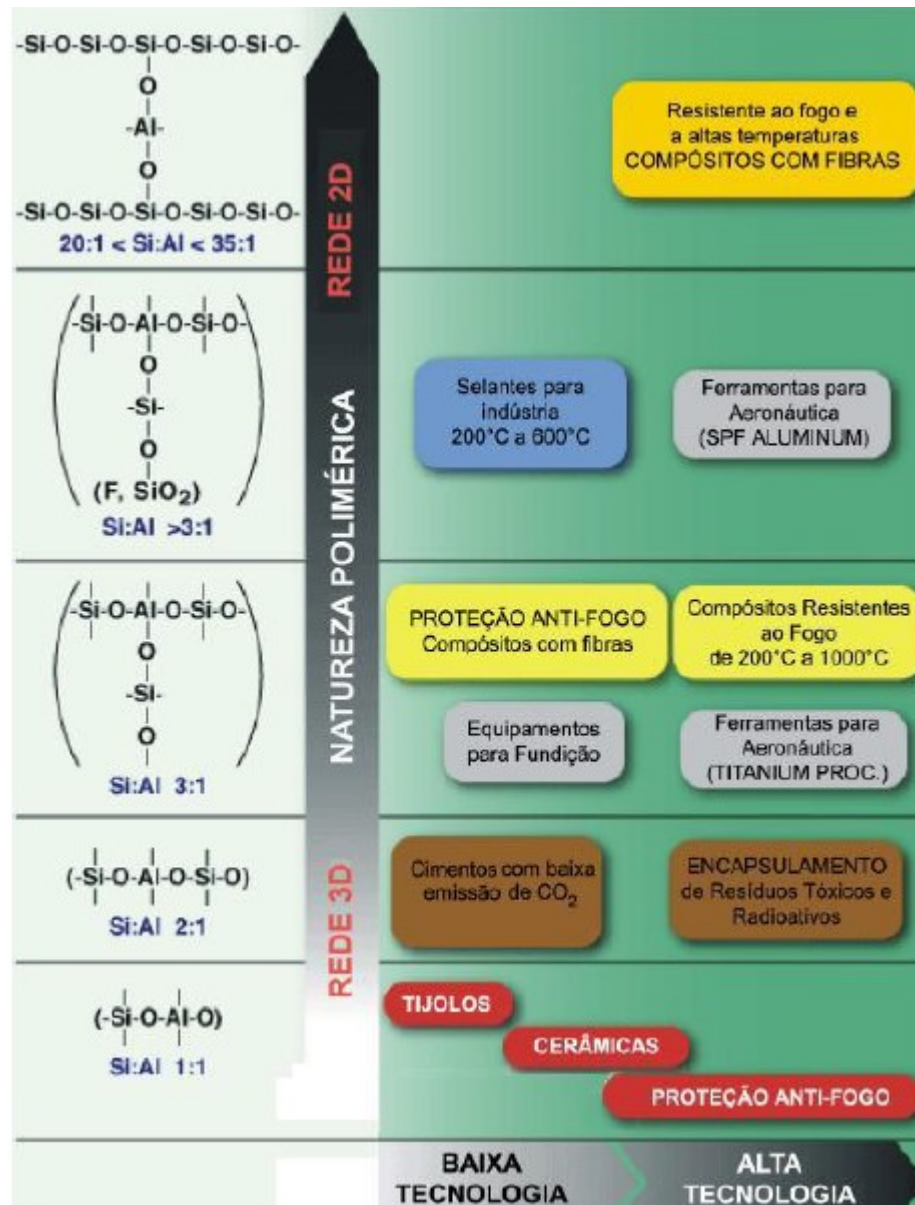
Segundo Pinto (2004), os geopolímeros encontram aplicação em quase todos os domínios da indústria, pois apresentam: alta resistência mecânica, resistência ao gelo-degelo, elevada inércia química e excelente comportamento ao fogo. Além disso, sua matriz permite a imobilização de resíduos tóxicos, do tipo metais pesados e inclusive materiais radioativos.

A grande variedade do potencial de aplicação dos materiais geopoliméricos inclui: materiais de construções e pavimentação, materiais resistentes ao fogo, artefatos de decoração, isolantes térmicos, materiais com baixa tecnologia, telhas de cerâmica, itens refratários resistentes a choque térmico, materiais de fundição, materiais compósitos para interiores de aeronaves e automóveis, sistemas de resinas de alta tecnologia, podem servir de barreira de contenção para resíduos tóxicos e radioativos [...] (BOCA SANTA, 2012, p. 65).

Sonafrank (2010) relata que na Austrália, Canadá e Europa, o concreto geopolimérico é utilizado como matéria-prima para dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, reparações de rodovias, obras de infraestrutura e outros.

Pinto (2004) descreve duas grandes linhas de atuação. A primeira sobre materiais de baixo custo, para a produção em grandes quantidades (como materiais de construção). Neste tipo, podem ser utilizados como matérias prima de base, todos os alumino-silicatos em que a razão atômica entre Si/Al varie de 1 a 3. Uma segunda linha é dirigida a obtenção de materiais mais sofisticados, com razão atômica de até 35. Estes materiais podem substituir plásticos, certos metais e produtos cerâmicos. A Figura 3 exemplifica os diversos tipos de aplicação.

Figura 3 – Aplicação geopoliméricas com sucesso de aplicações



Fonte: Pinto, 2004

Um dos grandes exemplos de aplicação dos geopolímeros é no *Brisbane West Wellcamp Airport* (figura 4), localizado na Austrália. Neste projeto foram utilizados  $40.000\text{ m}^3$  ( $100.000$  toneladas) de concreto geopolimérico, tornando-se assim a maior aplicação no mundo. Com esta escolha, deixou-se de emitir  $6.600$  toneladas de gás carbônico na atmosfera (Institute, 2017).

Figura 4 - *Brisbane West Wellcamp Airport*



Fonte: Institute, 2017

## 2.4 LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

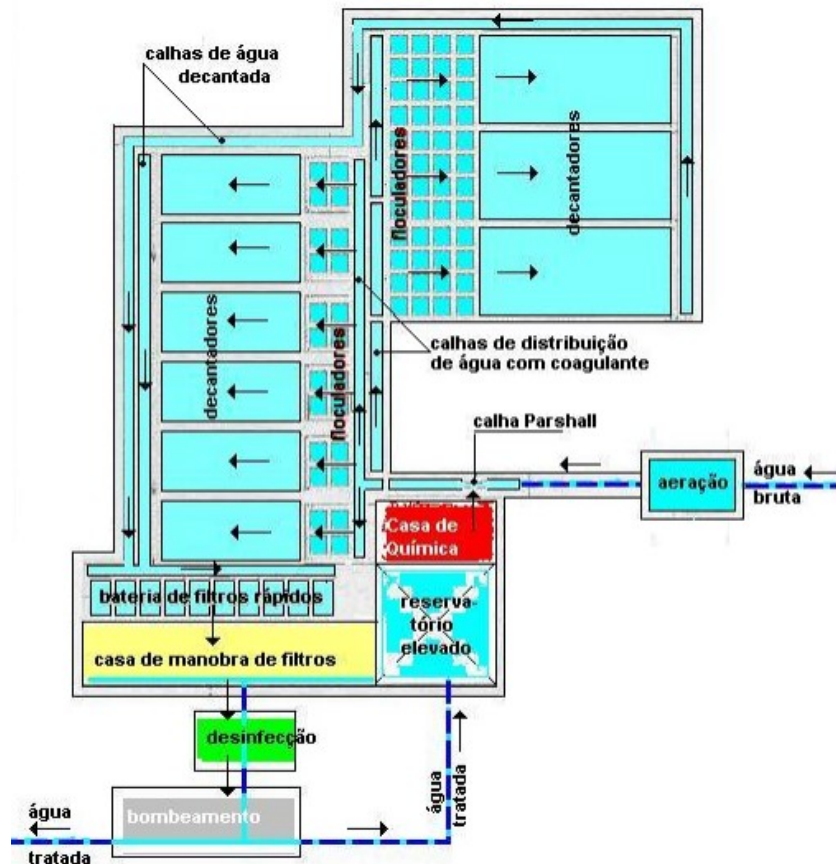
Hoje no Brasil é necessário que toda a água consumida passe por um tratamento realizado em uma Estação de Tratamento de Água (ETA), para se tornar própria para o consumo. A maioria dessas estações possuem as unidades de mistura rápida, floculação, decantação e filtração. Em uma ETA, os resíduos gerados são basicamente da limpeza de decantadores e lavagem de filtros. Após o processo de remoção de impurezas completo, é gerado um resíduo chamado de lodo de ETA (RICHTER, 2001).

### 2.4.1 Tratamento de água

No Brasil, o sistema de tratamento mais utilizado é o chamado de tratamento convencional, possuindo unidade de mistura rápida, floculação, decantação e filtração (figura 5).



Figura 5 - Esquema do posicionamento das unidades de uma ETA convencional



Fonte: Filho, 2009

O sistema convencional se inicia com os ensaios de turbidez, cor e pH. A etapa seguinte, consiste em relacionar estes ensaios com as operações de floculação, decantação e filtração.

Na chegada da água bruta na estação de tratamento, o primeiro produto químico que adicionado é o coagulante. Este, tem a função de agregar as partículas coloidais, ou seja, o material que está dissolvido na água. No Brasil, o coagulante mais utilizado é o sulfato de alumínio (FILHO, 2009). Na ETA Cubatão, este é adicionado na calha Parshall (figura 6) e sua dosagem é determinada através de ensaio de JarTest. O operador realiza o ensaio e, após os resultados, aplica a melhor dosagem. Não existe um padrão por vazão ou turbidez preestabelecido. Além disso, a ETA possui um equipamento monitor de coagulante que auxilia o operador na dosagem do sulfato.

Figura 6 – Calha Parshall com unidade de mistura rápida



Fonte: Autor, 2017

A floculação, consiste essencialmente em agregar em conjuntos maiores (chamados flocos) as partículas coloidais que não são capazes de se sedimentar espontaneamente (FILHO, 2009). Na ETA Cubatão, a floculação se dá por diversas câmeras que permitem a formação dos flocos pela redução gradativa da agitação da água. A unidade é composta por um floculador hidráulico com chicanas de madeira (figura 7a). Na decantação, por ação da gravidade, os flocos precipitam, acondicionando-se no fundo (figura 7c) e a água escoar por calhas coletoras localizadas na parte superior do decantador. A ETA é composta por dois decantadores de alta taxa com placas de PVC (figura 7b). O tempo de detenção atual, em função da sobrecarga da estação, está em torno de 30 a 40 minutos.

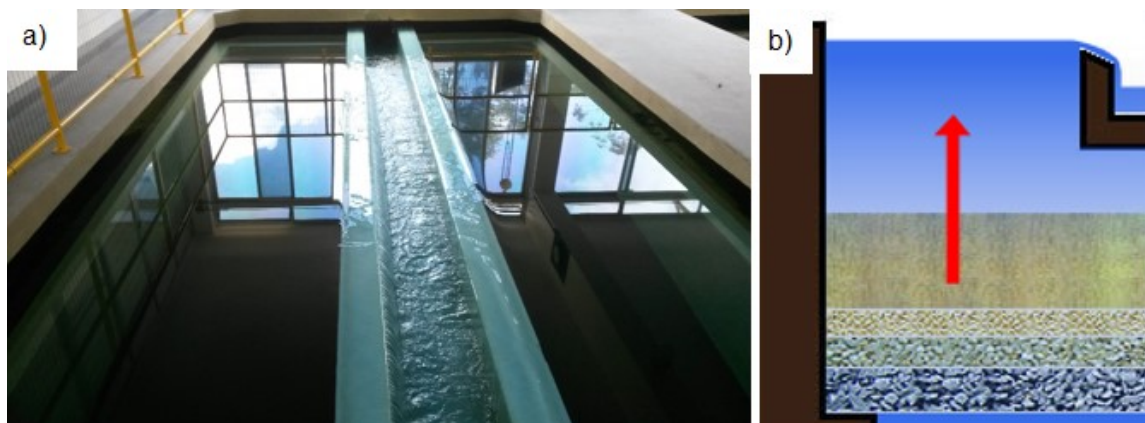
Figura 7 – a) Floculador hidráulico com chicanas de madeira b) Decantadores de alta taxa com placas de PVC c) Flocos acumulados no fundo



Fonte: Autor, 2017

Posteriormente, a água passa pelo processo de filtração. Neste, a água decantada passa por uma camada filtrante de 2 metros, composta por areia de várias granulometrias em um processo ascendente (figura 8b). A ETA possui 16 unidades filtrantes do tipo “filtro russo” (figura 8a). Os filtros são lavados no mínimo uma vez por dia, sendo que em cada lavagem são gastos em torno de 500 m<sup>3</sup> de água.

Figura 8 – a) “Filtro russo” b) Esquema de filtragem



Fonte: a) Autor, 2017 b) CAJ, 2017

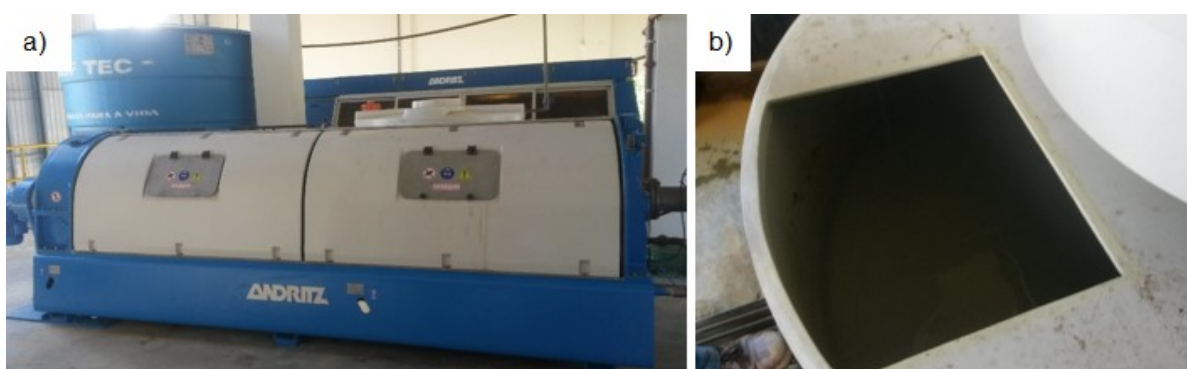
A água filtrada passa pela adição de cloro na forma gasosa, para sua desinfecção, flúor como forma de prevenção à cárie dentária e cal hidratada como correção de pH. Após estes processos, é enviada aos consumidores.

A água de lavagem dos filtros pode ser encaminhada para a estação de tratamento de lodo (ETL) e se misturar com as descargas do decantador ou pode ser recirculada para o início do processo de tratamento, na captação. Esta operação é determinada pelo operador da ETL, sendo que preponderantemente a água é recirculada.

Na ETL, os efluentes do processo de tratamento da ETA (descargas de decantadores e lavagem de filtros) são armazenados num tanque de equalização. Este efluente é recalado para um clarificador, semelhante a um floccodecantador de alta taxa. A água clarificada é destinada ao rio Cubatão e o lodo adensado é encaminhado para um tanque de lodo, que serve como armazenamento apenas. Este lodo, é então direcionado aos equipamentos de desagüe que consistem em prensas parafusos (figura 9a). São dois equipamentos compostos por uma rosca sem fim, que faz a separação líquido-sólido. O teor de sólidos obtido no processo de desagüe gira em torno de 22 a 25%.

Na unidade é utilizado o polímero aniônico (figura 9b) de alto peso molecular e baixa densidade de carga, tanto no adensamento como no desagüamento. A dosagem é feita através de testes visuais na floculação e conforme a qualidade da água clarificada.

Figura 9 – a) Prensa parafuso b) polímero aniônico



Fonte: Autor, 2017

Após este processo é gerado um resíduo chamado de lodo de ETA. O lodo de ETA é constituído de água e sólidos suspensos contidos no material utilizado, além

dos produtos aplicados à água nos processos de tratamento, ou seja, sua composição pode variar de acordo com o processo de tratamento e os materiais utilizados para o tratamento da água (DI BERNARDO *et al.*, 2005; RICHTER, 2001). Segundo Gardin *et al.* (1993), os resíduos gerados (lodo) na ETA são constituídos basicamente, de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos provenientes da água bruta, incluindo algas, bactérias, vírus, partículas orgânicas em suspensão, colóides, areias, argila, siltes, cálcio, magnésio, ferro, manganês, entre outros.

Para Barroso e Cordeiro (2001), a quantidade de lodo produzida em ETA dependerá de alguns fatores, tais como: partículas presentes na água bruta, turbidez, cor, concentração de produto químico adicionado na fase de coagulação, tempo de permanência no decantador, forma de limpeza entre outros.

O destino final para o lodo de ETA é uma das tarefas mais difíceis no tratamento de água, pois envolve transporte e restrições ambientais. Entre as alternativas mais utilizadas de disposição final, são destacadas: lançamento em curso d'água; lançamento no mar; lançamento na rede de esgoto sanitário; lagoa; aplicação no solo; e aterro sanitário (RICHTER, 2001).

Atualmente o lodo da ETA Cubatão é disposto em aterros sanitários, porém, Tsutiya e Hirata (2001), vinculam esta disposição com o alto custo de implantação e Richter (2001) sugere que devido a este fato esta seja a última escolha a ser considerada. Sendo assim, é necessária a busca por novas opções de descarte.

#### **2.4.2 Alternativas para o descarte do lodo de ETA em materiais para a construção civil**

Na pesquisa realizada por Sales e Cordeiro (2001) foram utilizados os rejeitos do lodo de ETA's com os resíduos de materiais cerâmicos (restos de telhas, blocos e lajotas cerâmicas) e de material proveniente de argamassas e concretos endurecidos da construção civil para estudar formas de utilização como agregado em argamassa e concreto. O melhor resultado obtido, em termos de resistência, foi com a adição de 3% de lodo com agregado miúdo natural que apresentou uma perda de resistência insignificante, tendo assim, características mecânicas muito similares às do concreto tradicional.

Hoppen, *et al.* (2005), avaliou a incorporação do lodo da ETA Passaúna, in natura (centrifugado), com 12% de sólidos, na massa de concreto. Foram fabricados

concretos incorporando o lodo de ETA, com teores de 3%, 5%, 7% e 10% em substituição ao peso do agregado miúdo. Com o estudo, foi possível determinar que a amostra que apresentou o melhor desempenho, em relação a trabalhabilidade e resistência mecânica, é a com adição de lodo da ETA abaixo de 7%. No caso da resistência à compressão, observou-se que já aos 7 dias todas as dosagens, com exceção de 10%, já atingiram valores superiores a 20 MPa.

Margem *et al.* (2006), verificaram a incorporação de lodo de ETA em cerâmica vermelha. Concluíram, que para percentuais iguais ou superiores a 5%, existe um aumento da absorção de água na cerâmica, ligada a variação da porosidade. Isso gerou alterações significativas nas estruturas físicas e mecânicas.

Teixeira *et al.* (2006), exploraram a adição do lodo em massa cerâmica, os quais concluem que, em geral, suas propriedades pioraram, mas ainda permaneceram dentro dos valores limites aceitáveis, o que torna esta alternativa viável na produção de tijolos e telhas.

Tartari (2008), também estudou a inclusão do lodo de ETA em massas cerâmicas. O autor concluiu que as argilas toleraram a incorporação de no máximo 8% de lodo, sendo esse o valor máximo que pode substituir parte da argila. Acima desse valor, ocorreram falhas na estrutura da peça cerâmica.

Polido (2010), investigou a adição do lodo de ETA da cidade de Campo Mourão em argamassas. Como resultado, com as incorporações de 0%, 10% e 20% teve redução da resistência mecânica, com valores médios de resistência a compressão entre 2,69 MPa, 1,70 MPa e 1,38 MPa respectivamente. Foi verificado também um aumento de 34,7% na relação água/cimento, comparado aos demais traços, para a adição de 20%.

Gomes *et al.* (2010), pesquisaram sobre a substituição parcial da areia por resíduo proveniente da ETA em concreto. O lodo foi adicionado em massa, nas porcentagens de 3%, 5%, 10% e 15% na pasta de cimento CPIII 40. Os corpos de prova apresentaram um redução da resistência mecânica e atingiram os seguintes valores de resistência à compressão aos 28 dias: 17,80 MPa (3%), 15,40 MPa (5%), 7,84 MPa (10%) e 3,76 MPa (15%), sendo que a amostra de referência tinha resistência de 19,95 MPa. Os autores concluíram que o resíduo apresentou características favoráveis para sua utilização para frações com até 5% de adição.

Ribeiro (2012), avaliou o uso de lodo em argamassas como substituição parcial da areia nas porcentagens de 5%, 10% e 15%, que apresentaram resistência

à compressão de 2,39 MPa, 2,98 MPa e 1,84 MPa respectivamente. A incorporação de 10%, mostrou um ganho de resistência de 16,86%, em relação a formulação de referência de 2,55 MPa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos utilizados para o desenvolvimento das argamassas geopoliméricas com o lodo de estações de tratamento de água, como também os ensaios escolhidos para caracterização das amostras analisadas nos estados fresco e endurecido.

Os ensaios laboratoriais necessários para a produção dos corpos de prova foram realizados nos Laboratórios de Materiais de Construção e Laboratório Interdisciplinar de Construção Sustentável (LabIConS), ambos localizados na UFSC Joinville. Para alguns ensaios de caracterização das argamassas, este trabalho contou com o apoio do Departamento de Engenharia Civil do Centro Universitário Católica Santa Catarina – Unidade Joinville e o Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) do Departamento de Engenharia Mecânica UFSC – Florianópolis.

#### 3.1 MATERIAIS

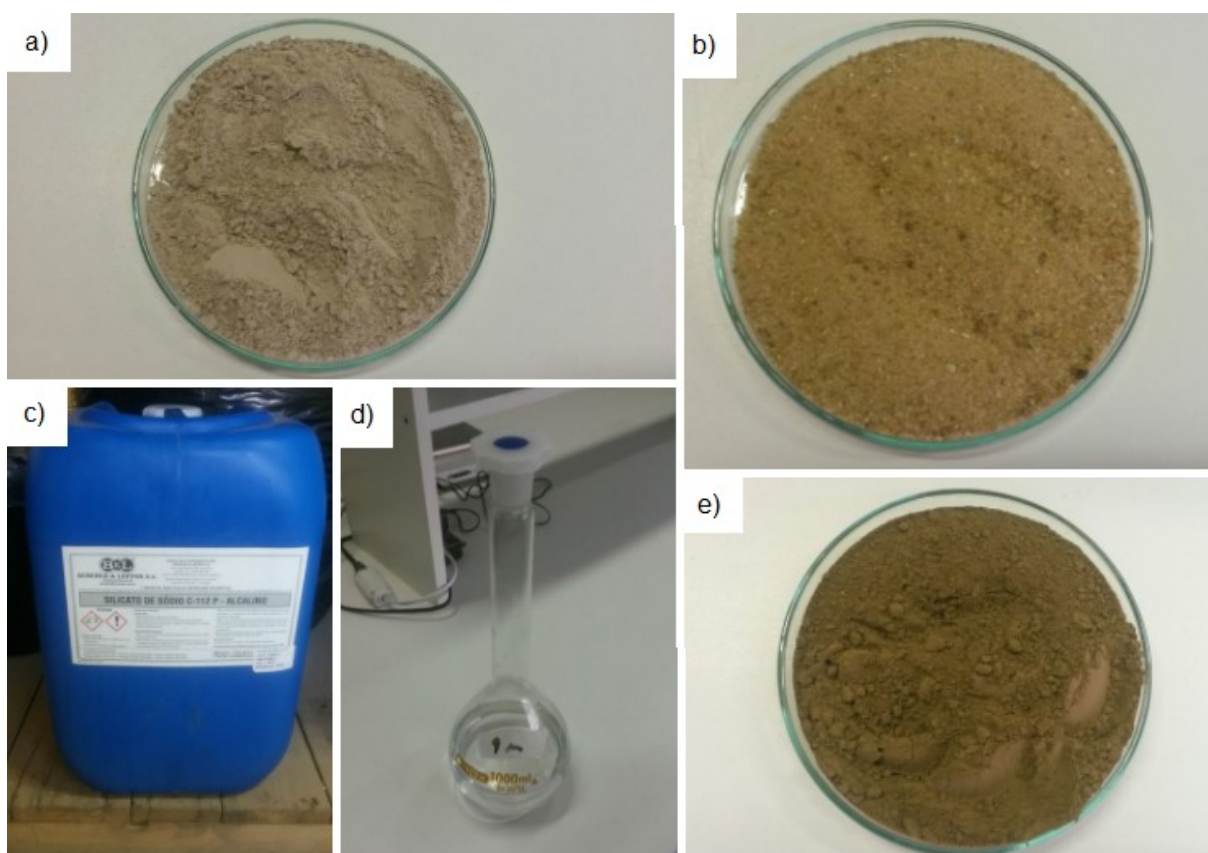
Para a produção das argamassas geopoliméricas os seguintes materiais foram utilizados:

- Metacaulim (MK) e o lodo em pó como fonte de Si e Al;
- Solução de H<sub>2</sub>O + NaOH (9 molar) + Silicato de sódio, como agente ativador alcalino;
- Areia média como agregado miúdo;

A Figura 10 apresenta todos os elementos utilizados.



Figura 10 – a) Metacaulim b) Areia média c) Silicato de sódio d) Hidróxido de sódio  
e) Lodo em forma de pó



Fonte: Autor, 2017

### 3.1.1 Metacaulim e lodo da ETA

Como fonte de aluminossilicatos foram utilizados o metacaulim e o lodo da ETA em forma de pó em quantidades variáveis. O metacaulim foi disponibilizado pela empresa Metacaulim Brasil e segue as especificações da norma NBR15894/10. O lodo é um resíduo gerado pela limpeza da água nas estações de tratamento. Este, foi fornecido pela Companhia Águas de Joinville (CAJ), retirado da ETL da ETA Cubatão.

Os ensaios de caracterização do metacaulim foram realizados pelo Núcleo de Pesquisa CERMAT, em 2015. A densidade real ( $3,17 \text{ g/cm}^3$ ) foi determinada pelo uso de um picnômetro Ultrapycnometer 1200 P/N.

A composição química do metacaulim foi determinada por fluorescência de raios-X e os resultados são apresentados na Tabela 1. Assim, foi possível perceber que ele é composto basicamente por  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (32,6%) e  $\text{SiO}_2$  (57,12%).

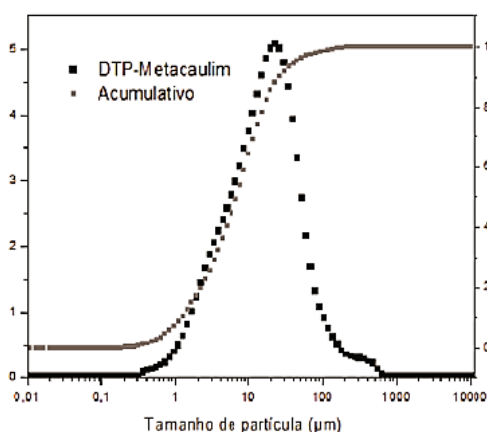
Tabela 1 – Composição química do metacaulim

Óxidos	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>
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 m <sup>2</sup> /kg									

Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

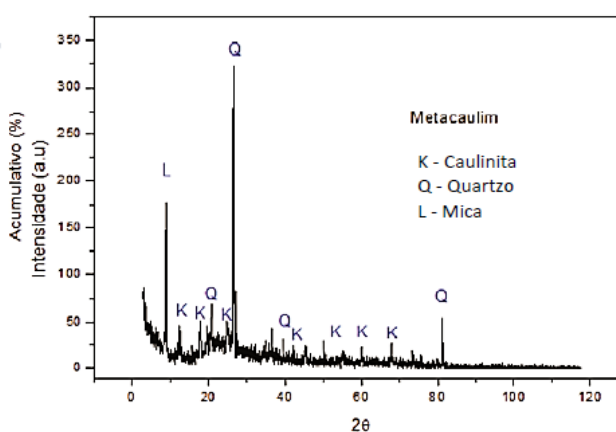
O tamanho médio das partículas (Figura 11) é de 21 µm e D50 = 6,5 µm. Com o método de difração de raios-X foram identificadas fases cristalinas como a mica (L), quartzo (Q) e caulinita (K) (Figura 12).

Figura 11 - Distribuição granulométrica do metacaulim



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

Figura 12 – Difração de raios-X do metacaulim



Fonte: Núcleo de Pesquisas CERMAT, 2015.

A determinação da composição do lodo da ETA foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios-X e espectrometria de absorção atômica e os resultados estão apresentados na Tabela 2. Foi possível perceber que ele tem uma quantidade considerável de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (25,50%) e SiO<sub>2</sub> (28,40%) o que o torna um material interessante para ser utilizado como fonte de sílica e alumina na matriz geopolimérica.

Tabela 2 – Composição química do lodo

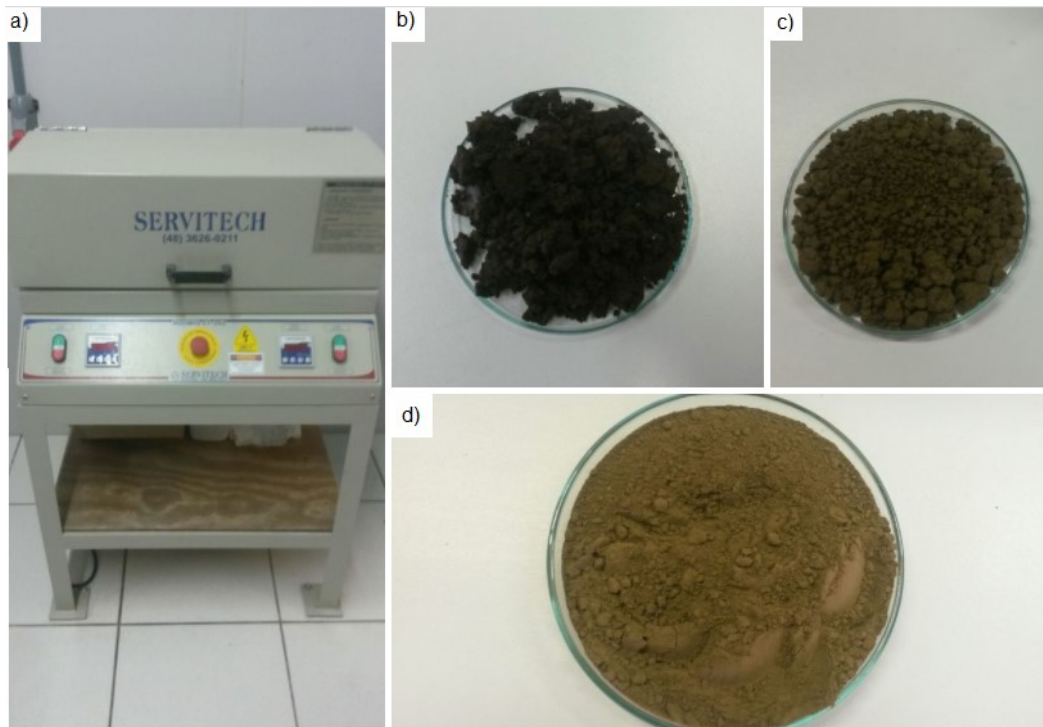
<b>Elementos Teor (%)</b>		<b>Elementos Teor (%)</b>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25,50	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
CaO	0,65	Li <sub>2</sub> O	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,85	BaO	< 0,1
K <sub>2</sub> O	0,95	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1
MgO	0,69	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1
MnO	0,12	PbO	< 0,1
Na <sub>2</sub> O	0,22	SrO	< 0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,59	ZnO	< 0,1
SiO <sub>2</sub>	28,40	ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub>	< 0,1
TiO <sub>2</sub>	0,65	<b>Perda Fogo</b>	<b>32,10</b>

Fonte: Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais  
LDCM, 2017

O lodo fornecido pela CAJ contém uma grande quantidade de água (figura 13b), porém a concentração elevada de água não é desejada pela diminuição da cinética de geopolimerização. Toda fase líquida na composição do geopolímero provém da solução de hidróxido de sódio e do silicato de sódio. Visto isso, o lodo precisou de um processamento para ser utilizado.

Primeiramente o lodo foi seco em estufa a 100 °C durante 24 horas. Após a secagem (figura 13c), o material foi levado ao moinho Servitech CT-12242 (figura 13a), utilizando um jarro com uma capa de alumínio de 300 ml. Foram usadas 39 bolas de 14 mm e 17 bolas de 20 mm. A definição da quantidade de bolas empregada foi feita de forma experimental em função da granulometria desejada. O material permaneceu no moinho durante 7 minutos com uma rotação de 380 rpm. Após este processo o lodo ficou em forma de pó (figura 13d).

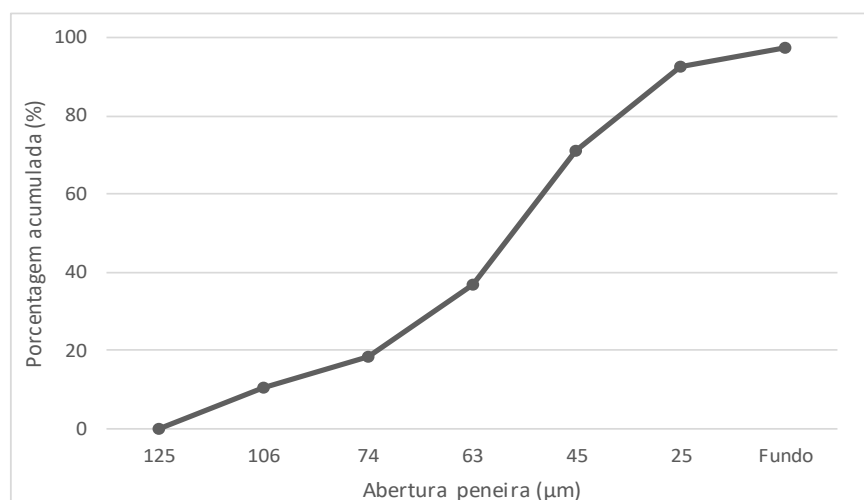
Figura 13 – a) Moinho utilizado b) Lodo como foi recebido c) Lodo seco em estufa d) Lodo após a moagem



Fonte: Autor, 2017

Para a caracterização do lodo em pó foi realizada sua granulometria. Neste processo, foram utilizadas as peneiras de 125,106,74,63,45 e 25  $\mu\text{m}$ . A curva granulométrica é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - Curva granulométrica do lodo após a moagem



Fonte: Autor, 2017

O material com granulometria superior a 125  $\mu\text{m}$  não foi utilizado para a confecção dos corpos de prova. O erro da curva granulométrica apresentada é 2,42%. A densidade do material em forma de pó também foi calculada e está na ordem de 0,513  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

### 3.1.2 Hidróxido de Sódio (NaOH) e Silicato de Sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

Como ativadores, foram utilizados uma solução de 9 mols/l de hidróxido de sódio e o silicato de sódio. O NaOH é fabricado pela empresa Buschle & Lepper S/A e possui 98% de pureza. O silicato de sódio neutro Q-112 é fabricado pela mesma empresa. As especificações técnicas dos materiais referidos são apresentadas nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Especificações do hidróxido de sódio

Determinação	Especificação
Concentração (NaOH) (%)	97,0 - 100,0
Carbonatos ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (%)	Máx. 0,60
Cloretos (NaCl) (%)	Máx. 0,03
Ferro (Fe) (ppm)	Máx. 6,0
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,13 - 2,20
Aspecto visual	Escamas

Fonte: Departamento técnico – Buschle & Lepper S/A, 2016

Tabela 4 - Composição química do silicato de sódio

Composição Química			
Óxidos	$\text{Na}_2\text{O}$ (%)	$\text{SiO}_2$ (%)	$\text{H}_2\text{O}$ (%)
Silicato	14,5 - 15,5	30,5 - 34,0	51,5 - 54,0

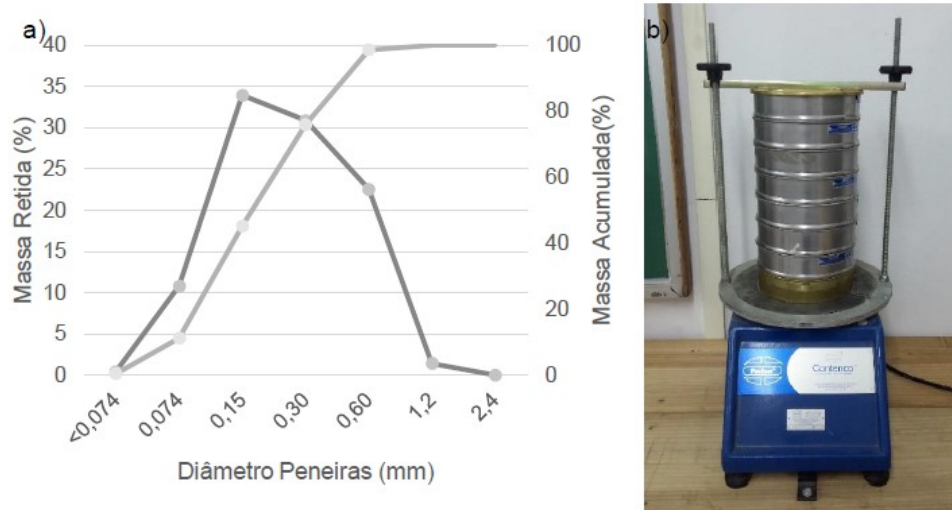
Fonte: Departamento técnico – Buschle & Lepper S/A, 2016

### 3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado na composição dos traços foi uma areia de origem silícea, com massa unitária igual a 1,59  $\text{g}/\text{cm}^3$ , fornecida pela empresa Supremo Concreto. A granulometria desta areia foi determinada utilizando um peneirador vibratório juntamente com peneiras nos tamanhos 0,074, 0,15, 0,3, 0,6, 1,2 e 2,4 mm.

A composição granulométrica obtida, assim como o aparelho, são apresentados na Figura 15.

Figura 15 – a) Distribuição granulométrica da areia b) Peneirador vibratório



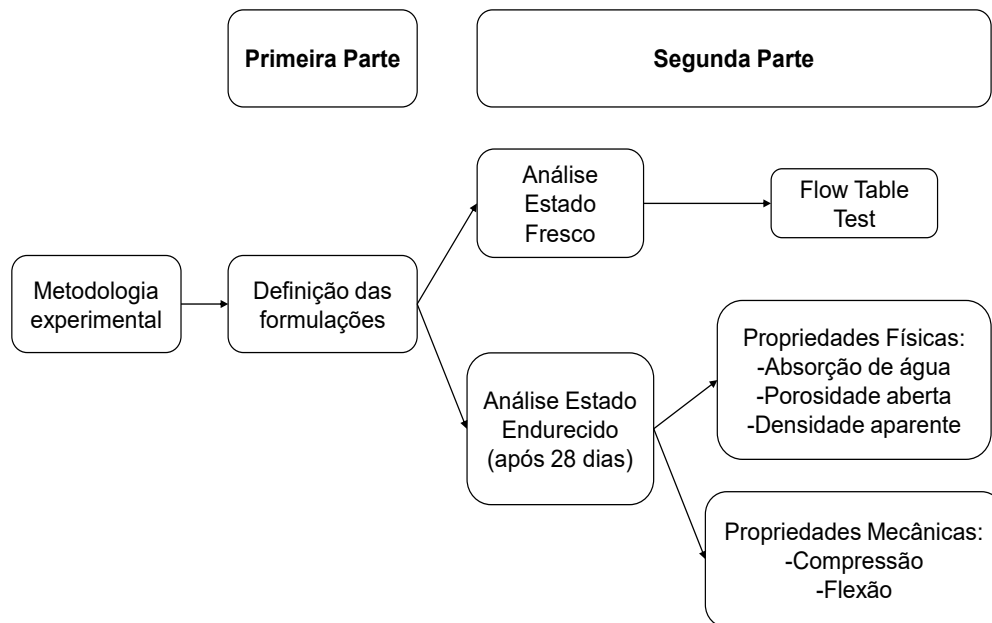
Fonte: Hartmann (2016, p. 30)

Conforme a NBR7214, a areia utilizada contém 1,4% de fração grossa, 23% de fração média-grossa, 31% da fração média-fina e 34% de fração fina e 11,2% de material passante na peneira 1,2 mm. Portanto, o agregado miúdo utilizado para a produção dos corpos de prova é classificado como areia média.

### 3.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental foi dividida em duas partes principais. A primeira referente a definição das formulações que serão analisadas, a produção das argamassas e o processo de cura. A segunda, aborda os ensaios propostos para a caracterização e entendimento da influência do lodo na matriz geopolimérica. A Figura 16 esquematiza a metodologia experimental.

Figura 16 – Metodologia experimental



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.1 Definição das formulações

As formulações foram definidas seguindo os critérios a seguir:

- Ausência visual de eflorescência nos corpos de prova;
- Incorporação máxima possível do resíduo (limitada pela trabalhabilidade);
- Manutenção constante da relação sólido/liquido, silicato e solução;

Os parâmetros adotados visam estabelecer uma relação entre a incorporação do lodo e os efeitos causados. Além dos critérios citados acima, as relações molares das formulações devem estar dentro dos indicadores citados por Duxson (2007). Este, apresenta razões ideais para a formulação de geopolímeros (tabela 5).

Tabela 5 – Razões ideais para formulação de geopolímeros

Mínimo	Relação	Máximo
3,3	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5
0,8	Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,6
0,2	Na <sub>2</sub> O/SiO <sub>2</sub>	0,48
10	H <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	25

Fonte: Duxson, (2007, p. 9)

Atendendo aos critérios já citados, foram definidas duas possibilidades de formulações (tabela 6). A primeira utilizando o lodo como substituição parcial do metacaulim. Nesta situação, o metacaulim é substituído em massa pelo lodo em pó. Nesta condição, foi adicionado lodo nas seguintes porcentagens: 10%, 15%, 20%, 25% e 30% (F1 até F5). A segunda possibilidade, empregando o lodo na forma de uma adição. Neste cenário, a quantidade de metacaulim é mantida constante e o lodo é adicionado e aproveitado como agregado miúdo, alterando assim a traço da composição. Nesta condição o lodo foi adicionado nas porcentagens de 10%, 15% e 20% (F6 a F8).

Tabela 6 – Formulações realizadas

	Formulação	S/L	Traço	Lodo (%)	MK (%)	NaOH (%) 9 M	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (%)	Areia (%)
Substituição	REF	1,5	1:2	0	100	50	50	200
	F1	1,5	1:2	10	90	50	50	200
	F2	1,5	1:2	15	85	50	50	200
	F3	1,5	1:2	20	80	50	50	200
	F4	1,5	1:2	25	75	50	50	200
	F5	1,5	1:2	30	70	50	50	200
Adição	F6	1,5	1:2,10	10	100	50	50	200
	F7	1,5	1:2,15	15	100	50	50	200
	F8	1,5	1:2,20	20	100	50	50	200

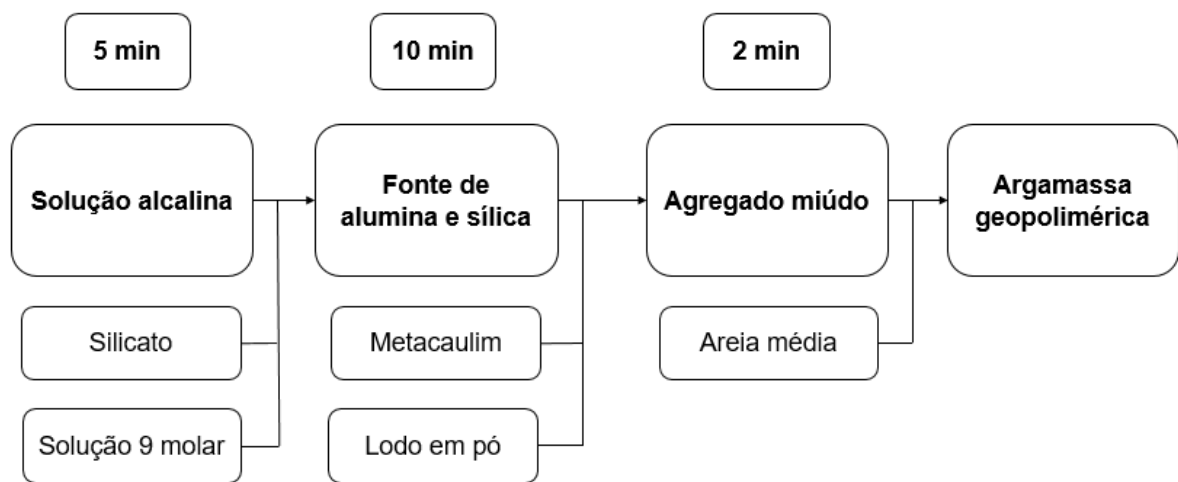
Fonte: Autor, 2017

O procedimento de mistura foi realizado como ilustrado na Figura 17 e os materiais utilizados são mostrados na Figura 18. Primeiramente o silicato de sódio e o hidróxido de sódio foram colocados no agitador mecânico e misturados a 100 rpm por 5 minutos. Em seguida, adicionou-se o metacaulim e o lodo em pó. Estes, foram



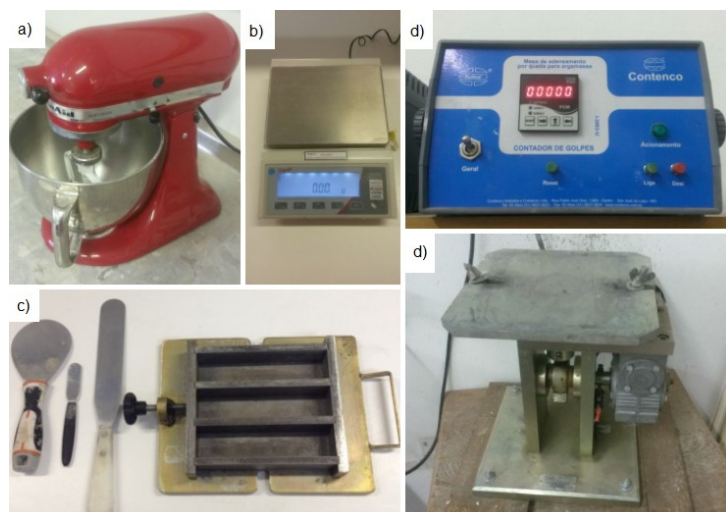
misturados a 100 rpm por 5 minutos e posteriormente, sendo feita uma pausa de 1 minuto para a mistura manual com uma espátula do material retido na lateral da cuba. Após este procedimento, o misturador foi ligado novamente a 100 rpm por mais 5 minutos. Por fim, foi adicionada a areia e misturada por 2 minutos. Para produção dos corpos de prova, seguiu-se a NBR 13279/15. Posteriormente, os corpos de prova foram levados a estufa durante 24 horas à temperatura de 40° C e depois retirados, desenformados e colocados em uma sala a temperatura ambiente.

Figura 17 – Procedimento adotado para a produção dos corpos de prova



Fonte: Autor, 2017

Figura 18 – a) Misturador b) Balança com precisão de 0,01g c) Molde e espátulas d) Contador de golpes padrão



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.2 Ensaio no estado fresco

Tem por finalidade avaliar as argamassas quanto a sua plasticidade e consistência logo após sua confecção. O ensaio que tem essa finalidade é o *flow table*, que é especificado pelas normas NBR7215 e NBR13276. Neste trabalho, este ensaio foi utilizado para limitar a quantidade de lodo inserido na matriz, uma vez que se adicionou até obter quantidades aceitáveis de trabalhabilidade. Além disso, através do ensaio, pode-se relacionar a quantidade de lodo incorporado com as propriedades do estado fresco.

O ensaio foi realizado da seguinte forma: sobre a mesa de consistência, foi colocado um cone metálico e preenchido até metade de seu volume com a argamassa geopolimérica. Com uma haste, pressionou-se a mistura com dez golpes para que esta fosse melhor compactada. Preencheu-se então o cone de compactação até seu topo, aplicando mais cinco golpes. Os espaços vazios que ainda restaram foram preenchidos com a argamassa e o excesso foi retirado com uma espátula. Por fim, retirou-se o cone verticalmente e a argamassa foi forçada a se deformar com a aplicação de 30 quedas padronizadas na mesa. Sendo assim, foi possível identificar através da abertura alcançada pela argamassa, a influência que o lodo tem na matriz. Os equipamentos utilizados podem ser vistos na Figura 19.

Figura 19 – Equipamentos ensaio de mesa (*flow table*)



Fonte: Autor, 2017

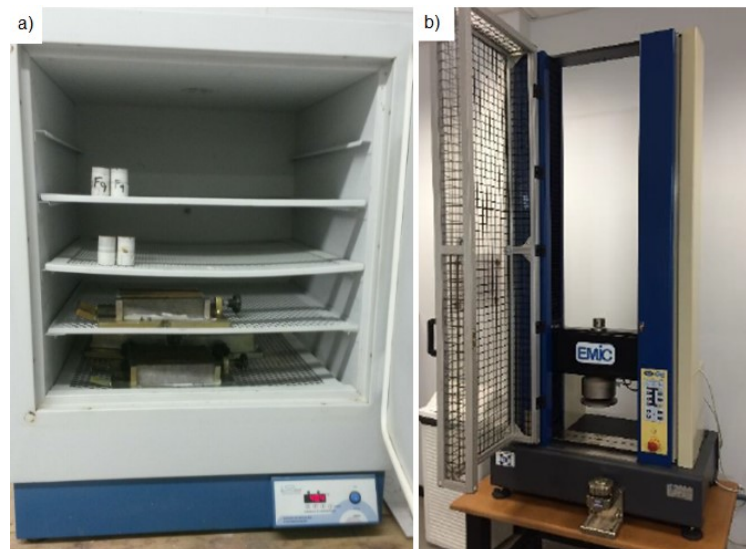
### 3.2.3 Ensaio no estado endurecido

Para analisar as propriedades no estado endurecido foram produzidos três corpos de prova, com dimensões 4x4x16 cm, para cada formulação analisada. Condicionou-se estes na estufa a 40°C nas primeiras 24 horas. Após este período, foram retirados da estufa, desmoldados e deixados a temperatura ambiente até completarem 28 dias de cura.

Os ensaios de compressão e flexão aconteceram no Laboratório de Resistência dos Materiais do Centro Universitário Católica de Santa Catarina – Joinville. O equipamento utilizado foi uma máquina universal para ensaios mecânicos, de modelo EMIC 23-100, eletromecânica, microprocessada de marca INSTRON/EMIC, com capacidade de 100kN (figura 20).

Figura 20 – Equipamentos utilizados para ensaios em estado endurecido

a) Estufa b) Máquina universal para ensaios mecânicos



Fonte: Autor, 2017

### 3.2.4 Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta

Para a obtenção das propriedades físicas (absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta) foram utilizados corpos de prova com 28 dias de cura. O método segue o princípio de Arquimedes e consiste em: a) condicionar o corpo de

prova em estufa a aproximadamente  $(103\pm 1)$  durante 24 horas e realizar sua pesagem (ms); b) imergir os corpos de prova em água durante 72 horas para que todos os poros sejam preenchidos e fazer a pesagem imersa (mi); c) pesagem da amostra com sua superfície seca (mss).

Com base nas medições realizadas é possível obter as propriedades físicas com as seguintes equações:

$$\text{Absorção de água} = \frac{m_{ss}-m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq. 3}$$

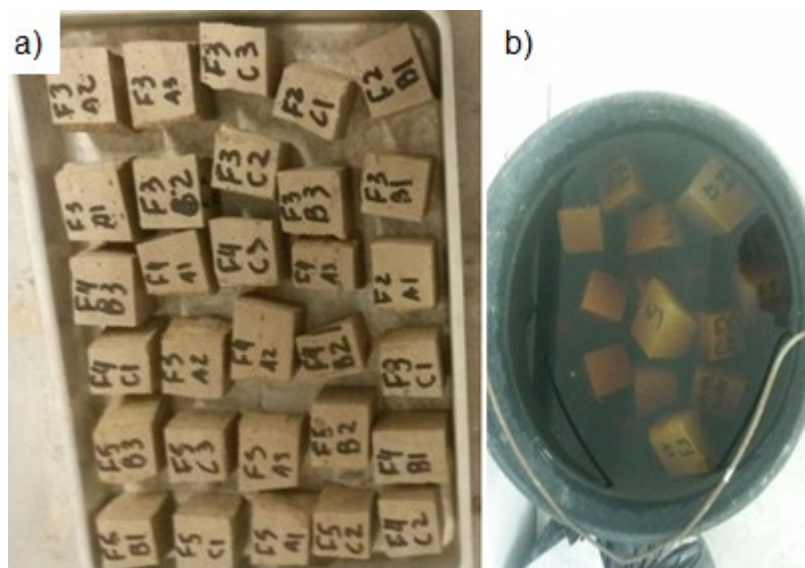
$$\text{Densidade aparente} = \frac{m_s}{m_{ss}-m_i} \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{Porosidade aberta} = \frac{m_{ss}-m_s}{m_{ss}-m_i} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

- ms = massa seca
- mi = massa imersa
- mss = massa de superfície seca

Figura 21 – a) Corpos de prova após secagem na estufa b) Corpos de prova imersos em água



Fonte: Autor, 2017

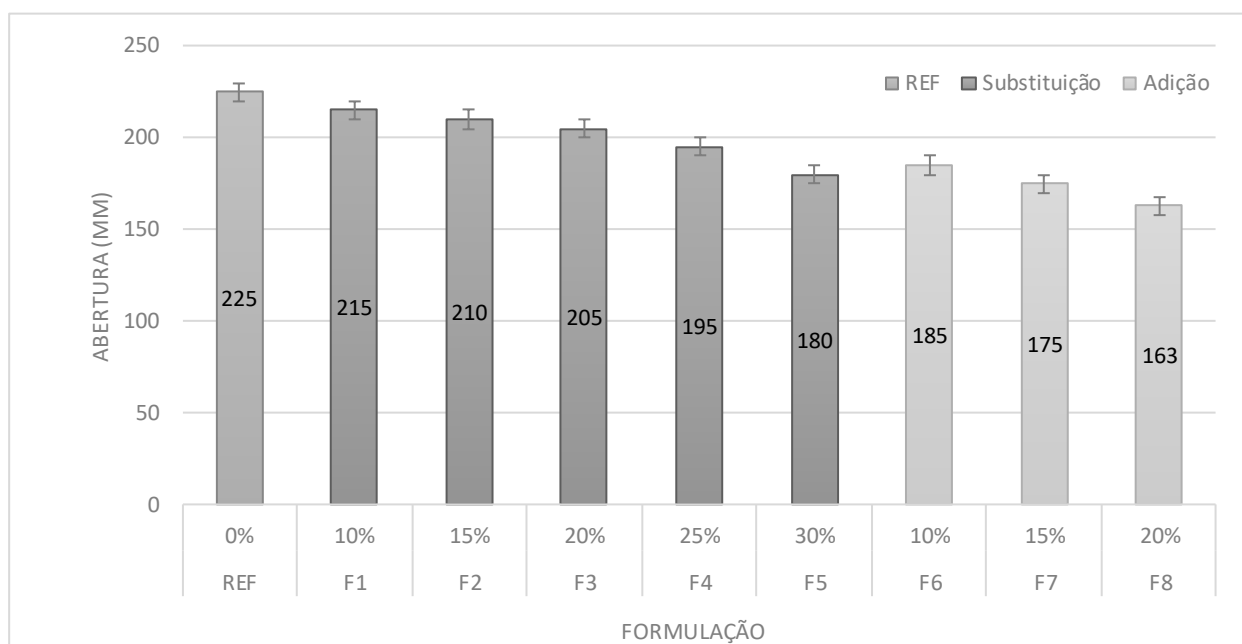
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos e as discussões referentes ao ensaios realizados.

### 4.1 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Para a caracterização das amostras no estado fresco foi utilizado o *flow table test*. Este, realizado para todas as amostras a fim de avaliar a influência no lodo nas diferentes porcentagens estudadas. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 22.

Figura 22 – Valores de espalhamento das formulações realizadas

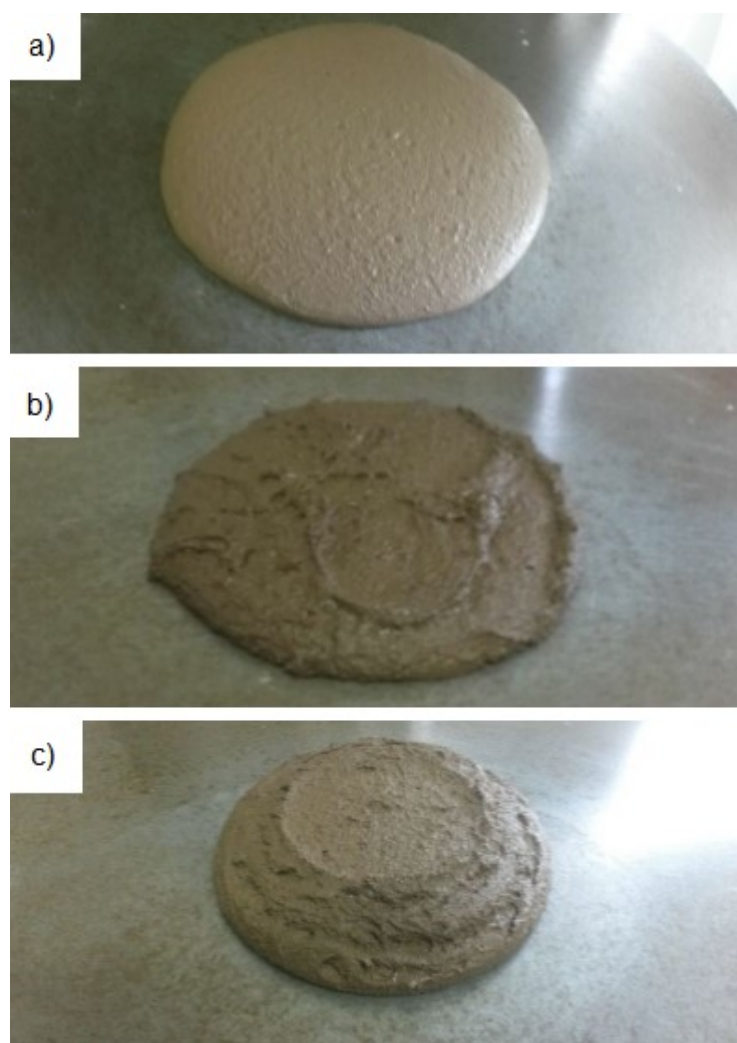


Fonte: Autor, 2017

Pode-se observar na Figura 22, que a presença do lodo causou uma redução significativa da trabalhabilidade, variando a abertura na mesa, no caso da substituição de 215 mm (F1) até 180 mm (F5) e de 185 mm (F6) a 163 mm (F8) para adição. Outro fato relevante, é que com as mesmas porcentagens de lodo adicionado mas com métodos diferentes (adição e substituição) a trabalhabilidade apresenta grande alteração. Os valores de abertura para adição são menores, pois para estas

formulações, a quantidade de metacaulim e areia foram mantidas constantes, assim existe maior quantidade de sólidos para a mesma quantidade de líquido, o que resulta na aproximação entre os sólidos e maior atrito superficial. As diferenças de trabalhabilidade para as amostras com maiores porcentagens de lodo podem ser vistas na Figura 23.

Figura 23 – Abertura na mesa de consistência a) Formulação de referência  
b) 30% de substituição (F5) c) 20% de adição (F8)



Fonte: Autor, 2017

É importante ressaltar que não foi possível manter a trabalhabilidade constante nas formulações. Nos geopolímeros, todo o líquido provem da solução (hidróxido de sódio) e do silicato de sódio, assim para manter a abertura na mesa constante a relação sólido/líquido deveria ser alterada. Foram realizadas amostras com relações s/l diferentes, porém para estas foi observado o aparecimento de

eflorescência (figura 24). A eflorescência aparece quando há hidróxido de sódio remanescente da reação com Si e Al. Assim, ocorre a formação de depósitos de sais por um processo chamado de lixiviação.

Figura 24 – Amostras com valores diferentes de s/l a) s/l=1,4 b) s/l=1,2



Fonte: Autor, 2017

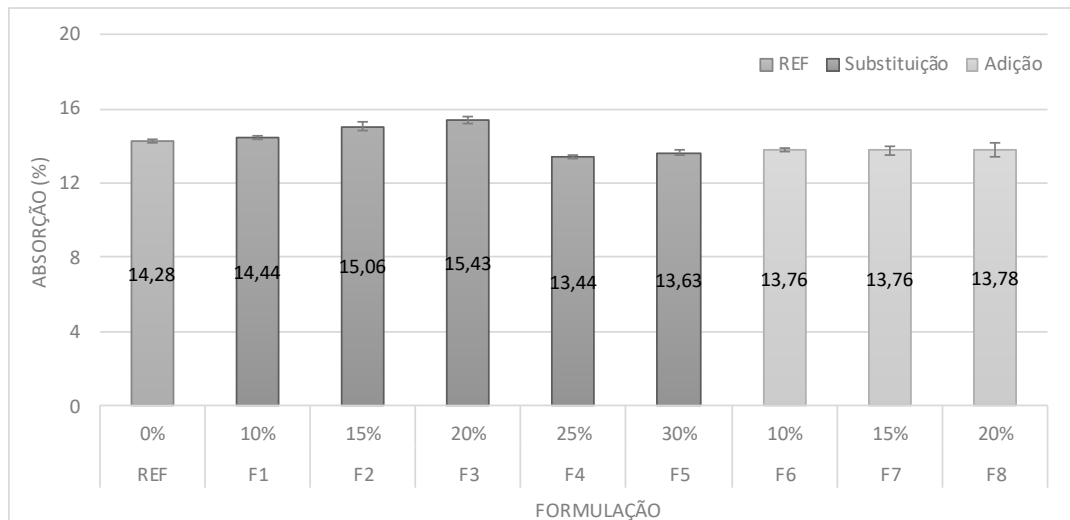
Referente a propriedades no estado fresco, a técnica que obteve os melhores resultados foi substituição, na qual os valores de abertura de mesa foram maiores. Contudo, vale ressaltar que a trabalhabilidade depende muito da aplicação desejada. Desta forma, as várias aberturas obtidas das formulações podem se apresentar adequadas para diferentes situações.

## 4.2 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

### 4.2.1 Propriedades físicas: absorção de água, densidade aparente e porosidade aberta

Os dados obtidos para a absorção de água são mostrados na Figura 25.

Figura 25 – Absorção de água das argamassas aos 28 dias de cura

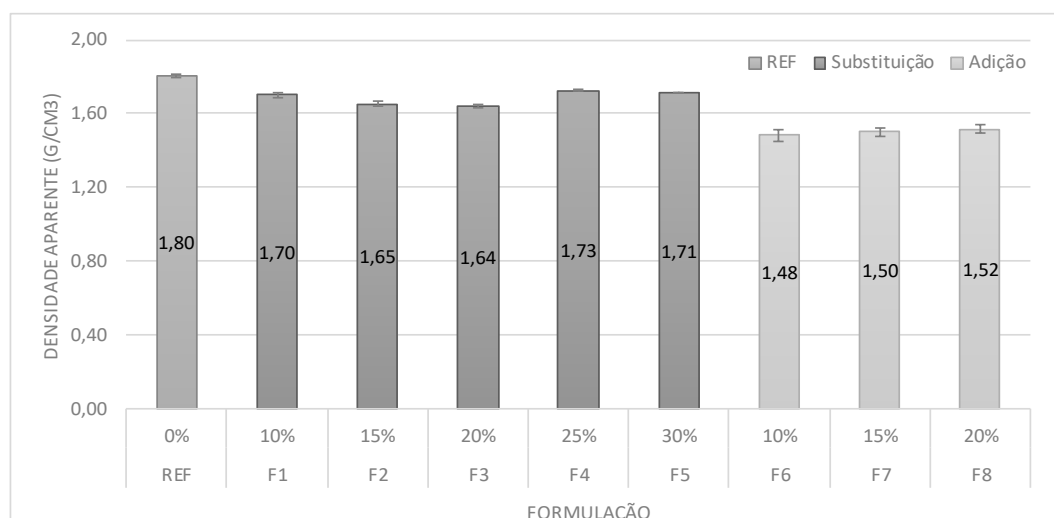


Fonte: Autor, 2017

Nota-se na Figura 25 que existe uma tendência de aumento da absorção de água com o aumento gradativo do lodo até 20% de substituição. Para 25%, é observada uma descontinuidade e a absorção reduz em 2% aproximadamente e volta a crescer em 30%. Para a adição, o valor de absorção é praticamente constante para as 3 formulações estudadas.

Os resultados para a densidade aparente são apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Densidade aparente das argamassas aos 28 dias de cura



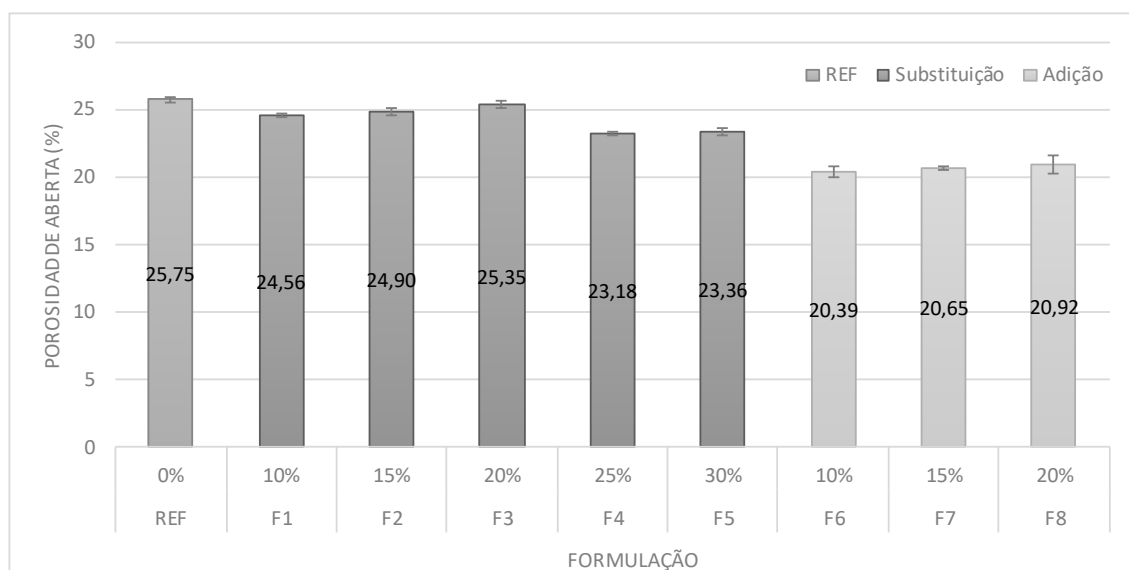
Fonte: Autor, 2017



Observa-se na Figura 26 uma redução sucessiva da densidade aparente até a substituição de 20%. Para 25%, o valor cresce  $0,9 \text{ g/cm}^3$  e tem uma leve redução para 30%. Para as formulações com adição, existe uma relação proporcional aumentando  $2 \text{ g/cm}^3$  da densidade aparente a cada 5% de adição do lodo.

As informações relacionadas a porosidade aberta são vistas na Figura 27.

Figura 27 – Porosidade aberta das argamassas aos 28 dias de cura



Fonte: Autor, 2017

Percebe-se na Figura 27, que entre 10 e 20% de substituição se mostra um crescimento da porosidade aberta. Para 25% existe uma queda de 2,17% da porosidade e um pequeno aumento para 30%. Na adição, as formulações seguem uma tendência de aumentar a porosidade conforme maior for a quantidade do lodo.

Em resumo, nas propriedades físicas, as formulações com substituição apresentam uma predisposição até 20% de substituição. Com 25% e 30% há uma quebra desta propensão. Esta, pode ser explicada pelo ensaio de consistência, onde F4 e F5 apresentaram os menores valores. Assim, nestas formulações existe menos líquido e as partículas estão mais próximas, fazendo com que estas tenham uma menor porosidade e absorção de água e uma maior densidade aparente.

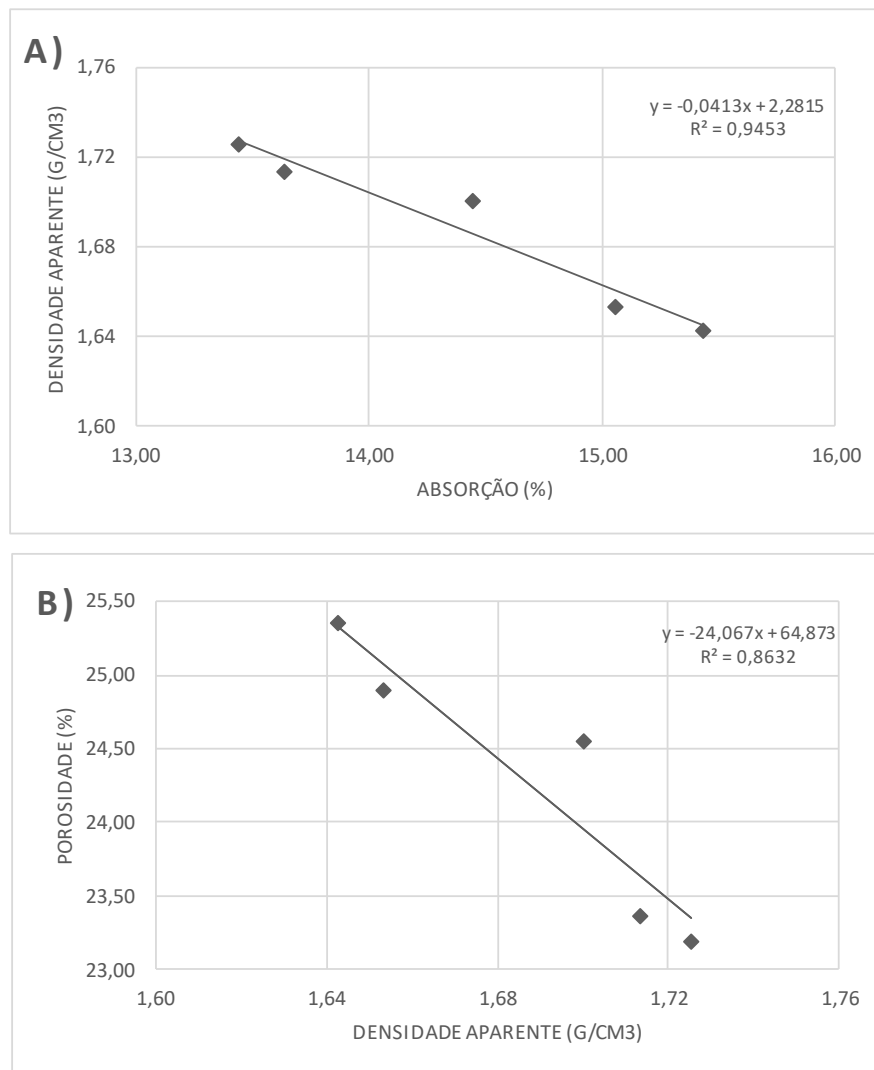
Para adição, existe sempre uma tendência que é observada nas 3 diferentes porcentagens estudadas. Os valores de absorção, densidade aparente e porosidade crescem, pois existe um aumento do traço nas formulações. Deste modo, cada vez

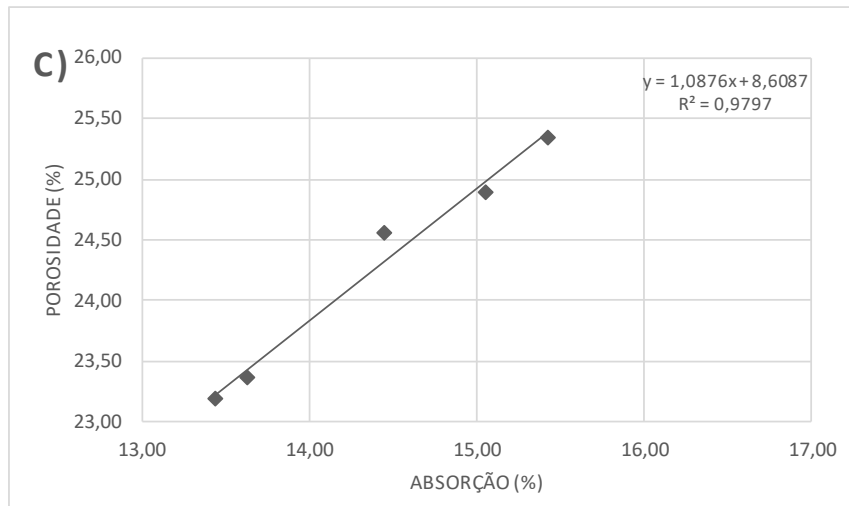
há mais sólidos para uma mesma quantidade de líquido, tendo assim, uma maior probabilidade de se formarem vazios.

#### 4.2.1.1 Relações entre propriedades físicas: Substituição

Os dados obtidos das propriedades físicas, podem ser relacionados para um melhor entendimento destas e de suas relações. A Figura 28 mostra todas as comparações entre propriedades.

Figura 28 – Relações para substituição parcial do metacaulim a) Densidade aparente X absorção b) Porosidade X densidade aparente c) Porosidade X absorção





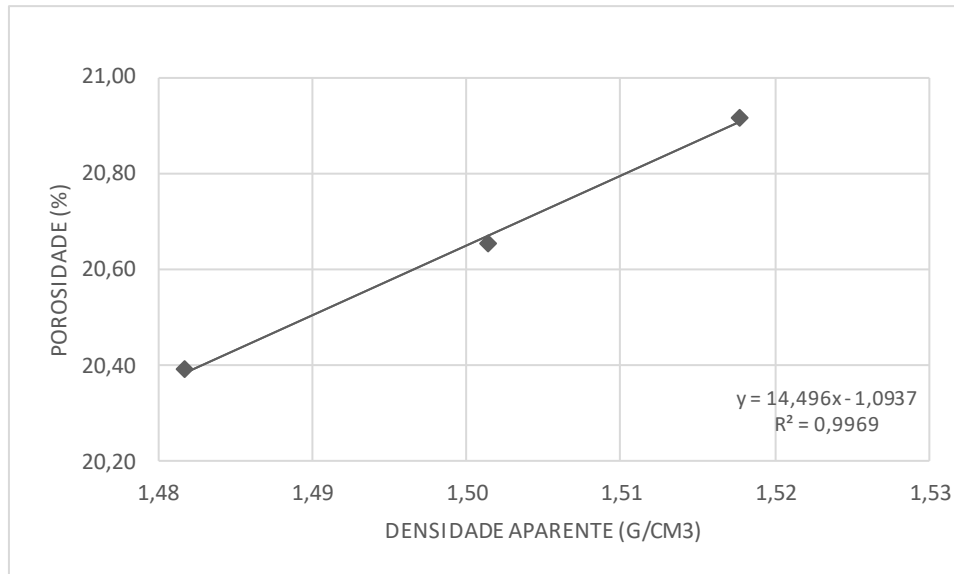
Fonte: Autor, 2017

Na Figura 28a), vê-se que existe uma relação inversamente proporcional entre absorção e densidade aparente, ou seja, quanto maior a absorção, menor a densidade aparente. Repara-se no mesmo comportamento na Figura 28b), sendo assim, quanto maior a densidade aparente menor o valor de porosidade aberta. Na Figura 28c) percebe-se um comportamento diretamente proporcional entre absorção e porosidade aberta, deste modo, as duas propriedades aumentam ou diminuem na mesma razão. Vale enfatizar que os resultados obtidos na Figura 28 seguem a lei natural dos materiais comuns.

#### 4.2.1.2 Relações entre propriedades físicas: Adição

Para adição, as únicas propriedades que puderam ser relacionadas entre si são densidade aparente e porosidade aberta e esta relação pode ser vista na Figura 29. As outras propriedades, não apresentaram uma correspondência plausível entre si.

Figura 29 – Relação entre porosidade X densidade aparente



Fonte: Autor, 2017

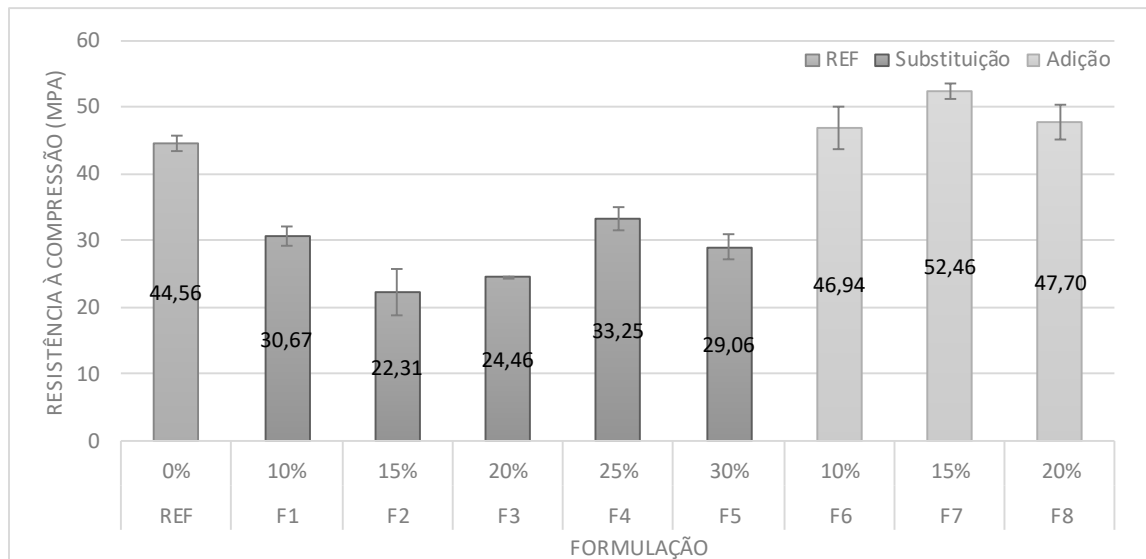
Constata-se na Figura 29 que existe uma relação proporcional entre densidade aparente e porosidade, assim, tanto porosidade quanto densidade aparente aumentam ou diminuem equivalentemente.

Observando a Figura 28b) e também Figura 29, identifica-se que na primeira as propriedades tem uma relação inversamente proporcional, porém na segunda a relação entre elas é proporcional. Novamente, esta diferença está associada a quantidade de sólidos em cada matriz, uma vez que para adição existem mais sólidos para uma menor quantidade de líquido.

#### 4.2.2 Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão após 28 dias de cura são mostrados na Figura 30. Estes, são a média dos três corpos de prova produzidos para cada formulação estudada. A formulação de referência atingiu resistência à compressão de 44,56 MPa.

Figura 30 – Resistência à compressão após 28 dias



Fonte: Autor, 2017

Verifica-se que, para formulações com o lodo como substituição, o valor de resistência à compressão reduziu significativamente em relação a REF. Outro dado significativo, é que existe um aumento da resistência nas formulações com 25% e 30%. Isto pode ser explicado, pela diferença já apresentada das propriedades físicas, na qual sempre F4 e F5 mostravam uma diferença significativa em relação as anteriores (F1, F2, F3). Para adição, a resistência à compressão da REF foi sempre superada. A Tabela 7 apresenta as variações percentuais dos valores de resistência à compressão.

Tabela 7 – Variação percentual da resistência à compressão em relação a formulação de referência

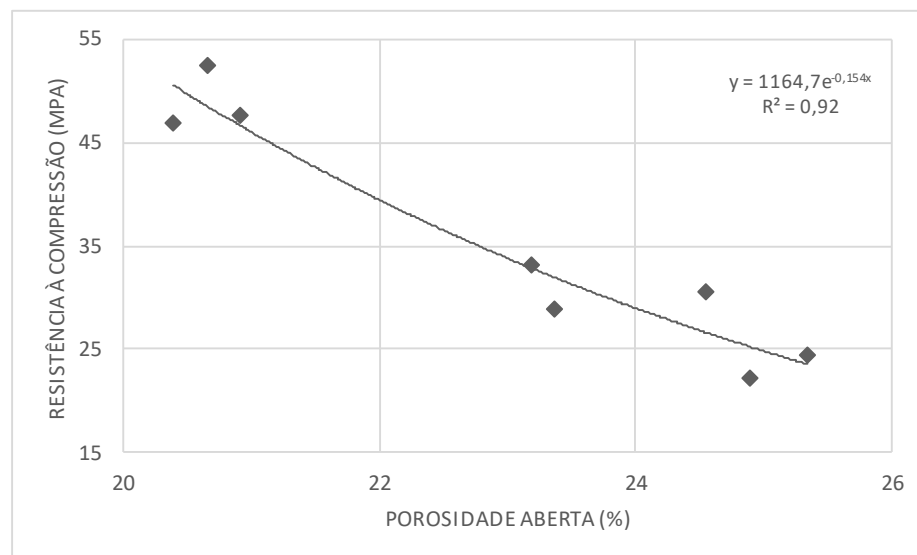
	Formulação	Varição de resistência (%)
Substituição	F1	10%
	F2	15%
	F3	20%
	F4	25%
	F5	30%
Adição	F6	10%
	F7	15%
	F8	20%

Fonte: Autor, 2017

Constata-se na Tabela 7 e na Figura 30 que a formulação de substituição que obteve o melhor resultado foi F4, com uma redução da resistência, em relação a REF, de 25,39%, atingindo assim 33,25 MPa. A menor resistência, foi vista em F2 com 22,31 MPa, redução de 49,39% em comparação a REF. Para adição, F7 obteve a maior resistência, com 52,46 MPa, aumento de 17,73%.

Os valores obtidos podem ser relacionados com as propriedades físicas. A Figura 31 relaciona resistência à compressão com porosidade aberta, as quais apresentam uma relação inversamente proporcional e que pode ser aproximada pela equação exponencial  $y = 1164,7e^{-0,154x}$  com  $R^2$  de 0,92. Essa relação é importante para se estimar os valor de resistência à compressão com dados de porosidade.

Figura 31 – Resistência à compressão X porosidade aberta



Fonte: Autor, 2017

Observa-se na Figura 31, que para se obter um argamassa geopolimérica com maior resistência à compressão é preciso ter uma menor porosidade possível, a qual tem uma variação que não é constante e depende diretamente da quantidade de lodo adicionado.

Neste sentido, identifica-se também na Figura 31 o motivo de as amostras de adição apresentarem os maiores valores de resistência à compressão, pois estas, obtiveram os menores valores de porosidade aberta. Neste ponto de vista, as formulações de substituição, F4 e F5 contiveram menores valores de porosidade que

F1, F2 e F3, assim pode ser explicado o aumento de resistência à compressão observado anteriormente.

Em resumo, a técnica que apresenta os melhores resultados de resistência à compressão é a adição, na qual o valor de REF sempre foi superado. Vale ressaltar, que os valores de resistência para substituição também são muito significativos, pois todos se apresentam acima dos 20 MPa que é a valor mínimo aceitável para aplicações em obras da construção civil.

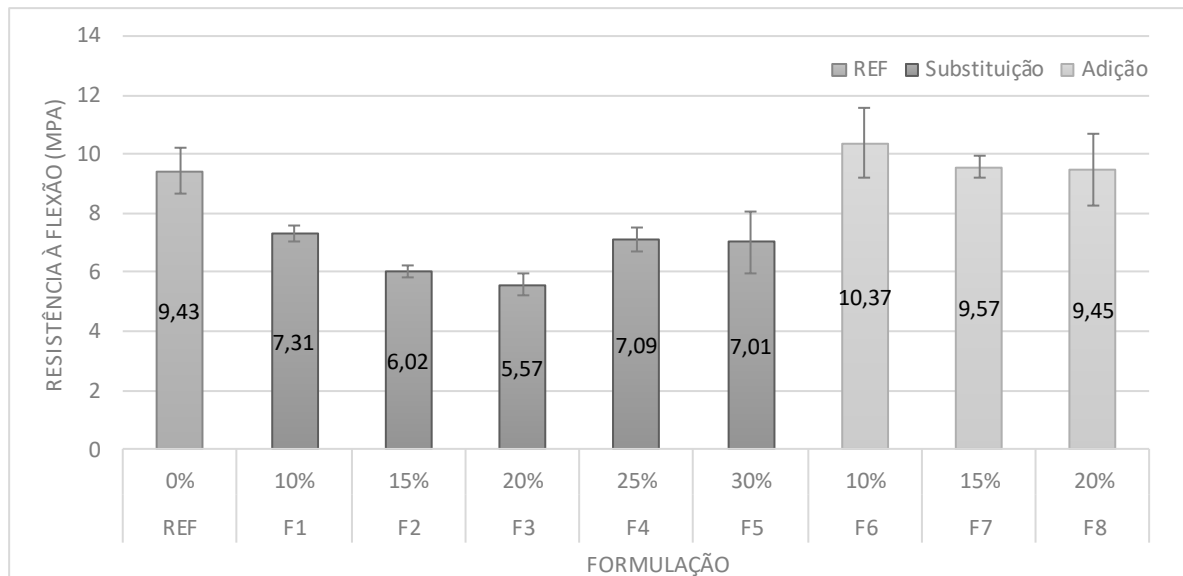
Os resultados se tornam mais significativos quando comparados com outros trabalhos já publicados. Hoppen, *et al.* (2005), com incorporação do lodo em concreto, atingiram resistência à compressão aos 28 dias, de 39 MPa, 34 MPa, 33 MPa, 29 MPa e 12 MPa para 0%, 3%, 5%, 7% e 10% de incorporação, respectivamente. Chama atenção a formulação com 10%, que nas argamassas geopoliméricas atingiu 33,67 MPa para substituição e 46,94 MPa para adição.

Gomes *et al.* (2010), também em concreto, atingiu 19,95 MPa, 17,80 MPa, 15,40 MPa, 7,84 MPa e 3,76 MPa para 0%, 3%, 5%, 10% e 15% de adição de lodo. Polido (2010) e Ribeiro (2012) atingiram valores máximos de 3 MPa em argamassas.

#### **4.2.3 Resistência à flexão**

Os valores de resistência à flexão foram obtidos com corpos de prova com 28 dias de cura e são mostrados na Figura 32. Estes, são a média dos três corpos de prova produzidos para cada formulação. A formulação de referência atingiu resistência à flexão de 9,43 MPa.

Figura 32 – Resistência à flexão após 28 dias de cura



Fonte: Autor, 2017

Nota-se que similarmente na resistência à compressão as formulações de substituição apresentaram uma redução da resistência à flexão se comparada a amostra de referência. Novamente, F4 e F5 tiveram um acréscimo da resistência, se comparadas com a tendência das formulações anteriores (F1, F2 e F3). Para as amostras de adição, o valor de resistência à flexão foi sempre maior que REF. A Tabela 8 mostra as variações percentuais de resistência em relação a REF.

Tabela 8 – Variação percentual de resistência à flexão em relação a formulação de referência

		Formulação	Variação de resistência (%)
Substituição	F1	10%	-22,47
	F2	15%	-36,22
	F3	20%	-40,99
	F4	25%	-24,84
	F5	30%	-25,69
Adição	F6	10%	9,93
	F7	15%	1,45
	F8	20%	0,14

Fonte: Autor, 2017

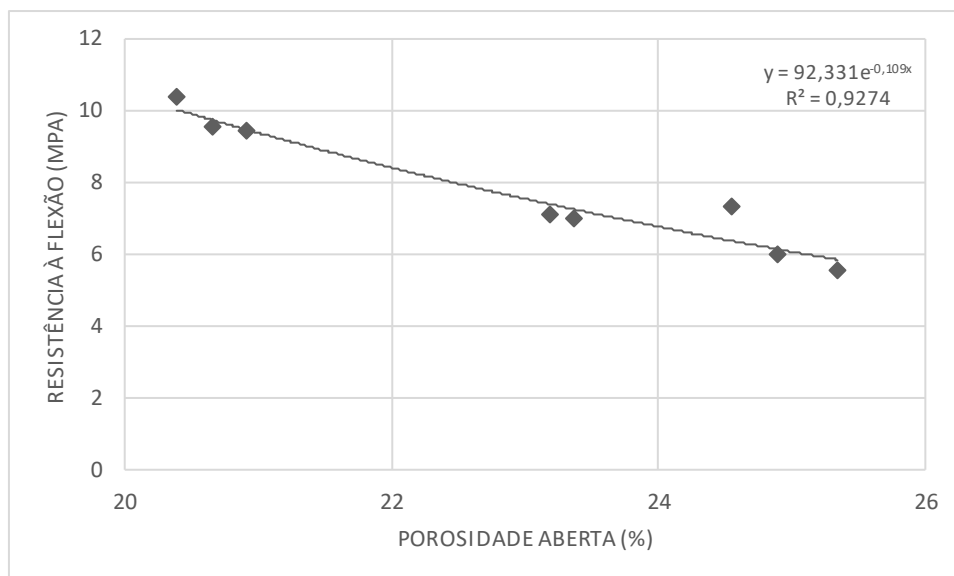


Observando a Figura 32 e a Tabela 8, constata-se que a amostra de substituição que alcançou o maior valor de resistência à flexão foi F1 com 7,31 MPa, redução de 22,47% em relação a REF. Nas amostras de adição, F6 atingiu 10,37 MPa, aumento de 9,93% se comparado com REF.

Percebe-se que a resistência à flexão é bem inferior a resistência à compressão. Esse comportamento também é observado nas argamassas a base de cimento Portland, onde a resistência à tração é da ordem de  $0,3\sqrt{f_{ck}}$ , ou seja, para uma argamassa com resistência à compressão de 45 MPa tem-se, aproximadamente, uma resistência à flexão de 2,01 MPa. Assim, as amostras apresentam um valor de resistência à flexão muito superior se comparado com argamassas convencionais. Em média, as formulações estudadas alcançaram 22,4% da resistência à compressão como resistência à flexão.

Os dados de resistência à flexão podem ser relacionados com as propriedades físicas já estudadas. A Figura 33 relaciona resistência à flexão e porosidade aberta. Estas, tem uma relação inversamente proporcional que pode ser estimado pela equação exponencial  $y=92,331e^{-0,109x}$  com  $R^2$  de 0,9274.

Figura 33 – Resistência à flexão X porosidade aberta



Fonte: Autor, 2017

Vê-se na Figura 33, que para se obter argamassas geopoliméricas com maior resistência à flexão é necessário reduzir a porosidade, relacionada diretamente com a quantidade de lodo adicionada.

Para flexão, a técnica que apresenta os valores mais significativos de resistência é a adição, porém vale destacar que tanto nas formulações com adição, quanto nas com substituição, o valor de resistência à flexão foi muito superior ao valor de 2 MPa, que uma argamassa convencional a base de cimento apresentaria.

## 5 CONCLUSÃO

Por meio do ensaio de consistência (*flow table test*) foi possível perceber que a presença do lodo reduziu a trabalhabilidade significativamente nas duas situações estudadas. A técnica de substituição, apresentou valores de abertura maior se comparada ao caso de adição. Isso pode ser explicado pelo aumento do traço das amostras de adição, onde existiam mais partículas sólidas para a mesma quantidade de líquido, fazendo com que estas ficassem mais próximas elevando o atrito superficial.

Quanto as propriedades físicas, comparadas a REF, para substituição, a absorção cresceu até F3 (20%) e reduziu para F4 (25%) e F5 (30%). A densidade aparente e a porosidade aberta sempre diminuíram. No caso de adição, a absorção, densidade aparente e porosidade aberta decresceram em todas as formulações. De maneira geral, a incorporação do lodo gerou queda nos índices de propriedades físicas.

Os parâmetros de resistência à compressão e flexão tiveram comportamentos semelhantes nas duas possibilidades estudadas. O caso de adição obteve os melhores resultados nas duas situações. Os dados mais significativos se mostraram na formulação F7 (15%), que exibiu um acréscimo de resistência de 17,73%, atingindo 52,46 MPa de resistência à compressão e F6 (10%) com 10,37 MPa de resistência à flexão, elevação de 9,93%. Na situação de substituição, os valores mais expressivos são de F4 (25%) com um decréscimo de 25,39%, tendo 33,25 MPa de resistência à compressão e F1 (10%) alcançando 7,31 MPa de resistência à flexão, diminuição de 22,47%.

A redução dos parâmetros de resistência pode ser explicada pela função que o lodo tem em cada técnica. Para substituição, o lodo se apresenta como fonte de aluminossilicato, sendo assim, existe a necessidade da Si e Al reagirem com o ativador. Assim, conclui-se que a Si e Al presente no lodo não são totalmente reativas ou apresentam uma reatividade inferior ao metacaulim, sendo assim, foi observada a variação de resistência para substituição. No modo de adição, o lodo tem a função de um agregado miúdo, desta forma, ele não precisa reagir e é incorporado para o aumento da resistência mecânica.

Além da função do lodo, a porosidade aberta influenciou na resistência mecânica. Esta, apresentou uma variação que não é constante e depende diretamente da quantidade de lodo adicionado. Percebeu-se que, para se obter argamassas geopoliméricas mais resistentes, é necessário diminuir a porosidade. Tendo isso em vista, pode ser explicado o valor de resistência à compressão e flexão elevando das formulações de adição, que apresentaram os menores valores de porosidade aberta.

Com base no dados obtidos, pode-se afirmar que o lodo de ETA pode ser utilizado em argamassas geopoliméricas, tanto na forma de substituição parcial do metacaulim, como adição com função de um agregado miúdo. O uso do caso de substituição é mais indicado para aplicações que necessitam de argamassas fluídas e com maior trabalhabilidade. A técnica de adição seria apropriada para situações nas quais se necessita valores elevados de resistência, como em estruturas, porém a trabalhabilidade não é muito relevante.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar diferentes granulometrias do lodo e suas influências no estado fresco e endurecido;
- Variar a relação silicato/solução e depois a relação s/l para a incorporação de maior quantidade de lodo;
- Testar técnicas para o aumento da reatividade do lodo;
- Adicionar o lodo como substituição parcial ou total da areia;
- Estudar o uso de um agente formador de poros e investigar as características térmicas e acústicas;
- Analisar a incorporação de aditivos nas argamassas geopoliméricas para a melhora da trabalhabilidade.

## REFERÊNCIAS

BARROSO, Marcelo M.; LAGUNA ACHON, Cali.; CORDEIRO, João S. **Eficiência do Leito de Drenagem para Desaguamento de Lodo de ETA que Utiliza Sulfato de Alumínio como Coagulante**. In: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 30., 2006, Puntadel Este. Anais eletrônicos.... Disponível em: <[http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR02264\\_Barroso.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR02264_Barroso.pdf)>. Acesso em 23 set. 2017.

BERNARDO, Luiz di; DANTAS, Angela di Bernardo; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Trabalhabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. São Carlos: Ldibe Editora, 2011. 453 p.

BHARATH, R. R. **Rheology of geopolymers concrete**. Disponível em: <[http://www.kscst.iisc.ernet.in/spp/37\\_series/spp37s/synopsis\\_seminar/025\\_37S1026.pdf](http://www.kscst.iisc.ernet.in/spp/37_series/spp37s/synopsis_seminar/025_37S1026.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2017.

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. 34 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2012.

BORGES, P. H. R et al. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

BUCHWALD, A.; DOMBROWSKI, K.; WEIL, M. **Development of Geopolymer Concrete Supported by System Analytical Tools**. Proceedings of the 2nd Int. Synposiun of Non-tradition Cement and Concrete, ed. by Bilek and Kersner, 25-35, 2005.

CESARI, Vanessa Fernandes. **Influência do uso de aditivos dispersantes em pastas de geopolímero produzido com cinza volante e hidróxido de sódio**. 2015. 128 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

CUNHA, Mário Jorge Forte Martins. **Durabilidade de Geopolímeros Monofásicos**. 2013. 99 p. Dissertação (Mestrado) - Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 2013.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of successes and failures in geopolymer applications. market trends and potential breakthroughs**. Geopolymer institute. Geopolymer. Melbourne, Australia: Conference, oct. 28-29 2002.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements**. Geopolymer institute. Kiev, Ucrânia: 1994.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions**. France: Geopolymer Institute, 2005. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=wIFo7L\\_zO8AC&pg=PA65&lpg=PA65&dq=GEOPOLYMER+SYSTEM&source=bl&ots=Fm1skldLbV&sig=fxJd8LcnoPBlxiD3J-GmwHaokMM&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjV2oWlufvOAhXJIJAKHR\\_SAwMQ6AEIJjAB#v=onepage&q=GEOPOLYMER%20SYSTEM&f=false](https://books.google.com.br/books?id=wIFo7L_zO8AC&pg=PA65&lpg=PA65&dq=GEOPOLYMER+SYSTEM&source=bl&ots=Fm1skldLbV&sig=fxJd8LcnoPBlxiD3J-GmwHaokMM&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjV2oWlufvOAhXJIJAKHR_SAwMQ6AEIJjAB#v=onepage&q=GEOPOLYMER%20SYSTEM&f=false)>. Acesso em: 15 jun. 2017.

DI BERNARDO, L. e Dantas, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.

FILHO, Carlos F. de M. **Abastecimento de Água**. 2009. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/Abastece.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2017.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR., A. D. **Desidratação de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Água**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1993, Natal. Anais... Natal: ABES, 1993.

GOLDONI, Alessandro Graeff. **Resistência à flexão e compressão em geopolímero com incorporação de nanotubos de carbono**. 2014. 85 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GOMES, Igor Alan Soares et al. **Adição de lodo de estação de tratamento de água em argamassa**. 2010. 11ª Semana de Iniciação Científica e 2ª Semana de Extensão. Disponível em: <<https://www.unilestemg.br/pic/sic-11/resumos/pesquisa-engenharia-tecnologia/adicao-de-lodo-de-estacao-de-tratamento-de-agua-em-argamassa.pdf>>. Acesso em: 23 set. 2017.

HAGEMANN, S. E. **Materiais de construção básicos**. Rio Grande do Sul: Instituto Federal Sul-Rio-Grandense; Universidade Aberta do Brasil, 2011. Disponível em: <[http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/\\_pdf/apostila\\_mcb.pdf](http://tics.ifsul.edu.br/matriz/conteudo/disciplinas/_pdf/apostila_mcb.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2017.

HOPPEN, Cinthya.; PORTELLA, Kleber F.; ANDREOLI, Cleverson V.; SALES, Almir.; JOUKOSKY, Alex. Estudo de Dosagem para Incorporação de Lodo de ETA em Matriz de Concreto, Como Forma de Disposição Final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005. Campo Grande. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <[http://www.sanepar.com.br/sanepar/CalandraKBX/filesmng.nsf/C22AAD74368E2D9B832570B500646487/\\$File/I-106.pdf?OpenElement](http://www.sanepar.com.br/sanepar/CalandraKBX/filesmng.nsf/C22AAD74368E2D9B832570B500646487/$File/I-106.pdf?OpenElement)>. Acesso em: 23 set. 2017.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2010.

INSTITUTE, Geopolymer. **Visit to Geopolymer Concrete Airport and Eco-Building**. 2015. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/news/visit-airport-eco-building/>>. Acesso em: 23 set. 2017.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, p.1261–1277, 2007.

LI, C. ; SUN, H.; LI, L. **A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements**, Cem. Conc. Res., vol. 40 ,p.1341–1349, 2010.

MARGEM, J.I.; ALEXANDRE,J.; VIEIRA, C.M.F.; MONTEIRO, S.N. Cerâmica Vermelha Incorporada ao Lodo de ETA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CINÊNCIAS MATERIAIS, 17., 2006. Foz do Iguaçu. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17cbecimat-102-036.pdf>>. Acesso em 23 set. 2017.

NITA, C.; **Utilização de pozolonas em compósitos de cimento reforçados com fibras de celulose e PVA**. 2006, 128 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M.W.; BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes a cement for the future. **Cement and Concrete Research**. v. 29, p.1323-1329, dez. 1998.

PASUELLO, A., et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. atual. São Paulo: Editor Geraldo C. Isaias, 2011. 1946 p.

PENNINGS, E. C. M.; GRELLNER W. Precise nondestructive determination of the density of porous ceramics. **J. AM. Ceramics Society**. v. 72, 1989.

PINTO T. A., **Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina**. Construção Magazine. Tese de Doutorado da Universidade de Minho, Portugal 2004. Disponível em: <[http://home.utad.pt/~ibentes/index\\_files/Novos%20Materiais.pdf](http://home.utad.pt/~ibentes/index_files/Novos%20Materiais.pdf)>. Acesso em: 23 set. 2017.

PINTO, A.T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Editora UTAD, Portugal, 105 p., 2006.

POLIDO, Marciele Aparecida. **Estudo de argamassa com adição do lodo de ETA**. 2010. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Tecnologia em Materiais de Construção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2010.

RIBEIRO, Rodolfo Faquini. **Estudo de dosagem de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) em argamassa**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2012.

RICHTER, C.A. **Tratamentos de lodos de Estações de Tratamento de Água**..1. ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2001.

RODRIGUES, L. P.; HOLANDA, J. N. F.. **Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento**. 2013. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ce/v59n352/10.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2017.

SALES, A.; CORDEIRO, J.S. **Imobilização da fase sólida dos lodos de Estação de Tratamento de Água (ETAs)**. *Apud in*: ANDREOLI, C.V. (Coord.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Curitiba: ABES/PROSAB – Rede Cooperativa de Pesquisas, 2001.

SILVA, F. J. **Reforço e Fratura em Compósitos de Matriz Álcali-ativada**. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) Instituto Militar de Engenharia, p. 271, Rio de Janeiro, 2000.

SILVA, S. P. da. **Caulim**. Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2001.

SIMÕES, A., et al. **Ciência e Engenharia de Materiais de Construção**. 1. ed. atual. São Paulo: IST Press, 2012. 1057 p.

SKAF, T. **Influência de matérias-primas na microestrutura e resistência de compósitos geopoliméricos**. 2008. 118 f. Dissertação de mestrado em Ciências dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia.

SONAFRANK, GH COLE, **investigating century cement production . Cold Climate**. Housing Research Center (CCHRC). Alaska, p.114, 2010.

TARTARI, Rodrigo. **Incorporação de Lodo Gerado na Estação de Tratamento de Água Tamanduá, como Aditivos em Massas para Cerâmica Vermelha**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

TEIXEIRA, S. R.; et al. **Efeito da adição de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural**. *Cerâmica*, São Paulo, v.52, n. 324, p. 215 a 220. Out/Dez. 2006.

TSUTUYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e Disposição Final de Lodos de Estação de Tratamento de Água do Estado de São Paulo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21. 2001, João Pessoa. Anais... João Pessoa: ABES, 2001.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de Geopolímero a partir de Metacaulim ativado**. 2013. 103 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

WINCRET DESIGNER CONCRETE PRODUCTS LTDA. **Cimento Portland versus Ligantes Geopoliméricos Considerações econômicas sobre as implicações do mercado de carbono no custo dos concretos**. Disponível em <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/cpxgp.pdf> >. Acesso em: 29 abr. 2017.



ZHANG, Zuhua et al. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. **Construction & Building Materials**. v.56, p.114, jan. 2014.