

**IMED – FACULDADE MERIDIONAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RICARDO NADAL DE OLIVEIRA**  
(Engenheiro Ambiental)

**PRODUÇÃO DE MATERIAL GEOPOLIMÉRICO UTILIZANDO LODO DE ETA  
TRATADO COM DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS**

**PASSO FUNDO**  
2020

RICARDO NADAL DE OLIVEIRA

**PRODUÇÃO DE MATERIAL GEOPOLIMÉRICO UTILIZANDO LODO DE ETA  
TRATADO COM DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS**

Dissertação de mestrado apresentada  
como requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em engenharia civil, pelo  
Programa de Pós-Graduação em  
engenharia civil da Faculdade IMED

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva

Passo Fundo

2020

---

## CIP – Catalogação na Publicação

---

O48p OLIVEIRA, Ricardo Nadal de  
Produção de material geopolimérico utilizando lodo de ETA tratado com  
drenagem ácida de minas / Ricardo Nadal de Oliveira. – 2021.  
101 f., il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED, Passo  
Fundo, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva.

1. Geopolímero. 2. Drenagem ácida de minas. 3. Engenharia civil. I.  
SILVA, Rodrigo de Almeida, orientador. II. Título.

CDU: 620.181

---

Catalogação: Bibliotecária Angela Saadi Machado - CRB 10/1857

RICARDO NADAL DE OLIVEIRA

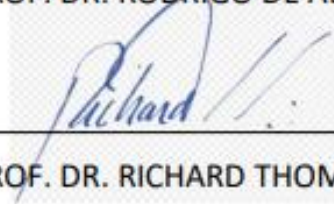
**PRODUÇÃO DE MATERIAL GEOPOLIMÉRICO UTILIZANDO LODO DE ETA  
TRATADO COM DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em engenharia civil, pelo Programa de Pós-Graduação em engenharia civil da Faculdade IMED.

Aprovado em 21 de Maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. RODRIGO DE ALMEIDA SILVA (PPGEC - IMED) – Presidente

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. RICHARD THOMAS LERMEN (PPGEC - IMED) – Membro

  
\_\_\_\_\_  
PROF<sup>ª</sup>. DR<sup>ª</sup>. ALINE ZANCHET (PPGEC-IMED) – Membro

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ELVIS CARISSIMI (UFSM) – Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família, sempre apoiando nesta caminhada para que fosse possível alcançar os meus objetivos. O meu irmão que me auxiliou nas dúvidas e melhorias do projeto.

Agradeço os novos amigos que ganhei neste período de mestrado, entre eles estão professores, colegas e funcionários da instituição IMED.

## RESUMO

O destino do Lodo de Estações de Tratamento de Água (LETA) gerado no processo de separação das impurezas presentes na água, tem sido considerado um problema, por se tratar de um resíduo classe II-A, e deve ser depositado em aterro de resíduos industriais. Estão em curso estudos para a sua utilização no desenvolvimento de materiais para construção, no entanto a sua incorporação atribui aos novos materiais, características como aumento da absorção de água, aumento da porosidade e redução da resistência mecânica. Porém, os teores de óxidos de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que formam o LETA apresentam características semelhantes aos precursores de materiais geopoliméricos. Esta dissertação teve como objetivo utilizar o material sólido resultante do processo de acidificação do LETA para produzir um precursor para materiais geopoliméricos. Antes de ser utilizado como precursor em geopolímeros o LETA passou por lavagem ácida, foi secado e calcinado na temperatura de  $500^\circ\text{C}$ . Na preparação dos geopolímeros foi definido o módulo de sílica de 0,5 e a relação líquido/sólido foi 0,4. Os teores de substituição na relação LETA/metacaulim foram de 0, 25, 50 e 75 %. A análise de FRX mostrou que após a lavagem ácida o LETA teve um acréscimo no teor de óxido de ferro e decréscimo no teor de óxido de alumínio, o que poderia prejudicar a formação de geopolímero. No entanto, a análise de FTIR uma alteração na banda de  $968\text{ cm}^{-1}$  que corresponde a formação do grupo SI-O-T (T= Si ou Al). Quanto a resistência a compressão dos geopolímeros, o melhor resultado foi atingido com 25% de LETA (9,02 MPa), e o pior resultado foi com 75% de LETA (2,33 MPa). Conclui-se que é viável tratar o LETA utilizando o ácido gerado a partir da Pirita, mas a DAM alterou as características físico-químicas e só foi possível utilizar o material após ser calcinado.

**Palavras-chave:** Lodo de ETA, Drenagem ácida de minas, Geopolímero.

## ABSTRACT

The destination of the Sludge from Water Treatment Plants (LETA) generated in the process of separating the impurities present in the water, has been considered a problem, since it is a class II-A waste, it must be deposited in an industrial waste landfill. Studies are underway for its use in the development of building materials, however its incorporation gives the new materials characteristics such as increased water absorption, increased porosity and reduced mechanical strength. However, the levels of oxides of silica ( $\text{SiO}_2$ ), iron ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) and aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) that form the LETA present characteristics similar to the precursors of geopolymeric materials. Several studies have been conducted with the objective of converting LETA into a precursor to geopolymers, another technological current for the treatment of LETA has evaluated the recovery of the coagulant by chemical dissolution. This research aims to use the solid material resulting from the coagulant recovery process to produce a precursor for geopolymer materials. In the experiment the LETA underwent acid wash, dry and heat treated. In the preparation of the materials it was defined that the silica module was 0.5 and the liquid / solid ratio was 0.4, the substitution levels in the LETA / metakaolin ratio were 0, 25, 50 and 75%. The FRX analysis showed that after acid washing, LETA showed an increase in the iron oxide content and a decrease in the aluminum oxide content, which could harm the formation of the geopolymer. However, the FTIR analysis showed a change in the  $968\text{ cm}^{-1}$  band that corresponds to the formation of the Si-O-T group (T= Si or Al). As for the compressive strength of geopolymers, the best result was achieved with 25% of LETA (9.02 MPa), and the worst result was with 75% of LETA (2.33 MPa). It is concluded that it is possible to treat LETA with the acid generated from pyrite, but DAM changed the physical characteristics and it was only possible to use the material after calcination.

**Key-words:** ETA sludge, acid mine drainage, Geopolymer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistemas de tratamento e distribuição de água. ....	20
Figura 2: Formação e agregação dos coloides .....	22
Figura 3: Destinação final do lodo de estação de tratamento de água nos municípios brasileiros. ....	23
Figura 4: Modelo para ativação alcalina de aluminossilicatos .....	31
Figura 5: Mistura de cimentos geopoliméricos .....	32
Figura 6: Aplicação de algumas espécies de geopolímeros .....	33
Figura 7: Processo de geopolimerização. ....	35
Figura 10: Redes de Sialato .....	36
Figura 11: Processo de acidificação do LETA para recuperação do coagulante. ....	45
Figura 12: Preparação do precursor de lodo. ....	47
Figura 13: Leito de secagem .....	49
Figura 14: Fragmentos de Pirita. ....	50
Figura 15: Sistema de geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM). ....	51
Figura 16: Amostra Drenagem Ácida de Minas. ....	51
Figura 17: Diagrama de acidificação e preparo do lodo de estação de tratamento de água (LETA) .....	52
Figura 18: Leito de secagem do lodo não solubilizado. ....	53
Figura 19: Roteiro da mistura do geopolímero. ....	58
Figura 20: Forma de MDF. ....	59
Figura 21: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água seco a 100 °C. ....	65
Figura 22: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água acidificado e seco a 100 °C. ....	66
Figura 23: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água calcinado a 500 °C .....	66
Figura 24: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água acidificado calcinado a 500 °C. ....	67
Figura 25: Experimento com o lodo de estação de tratamento de água acidificado tratado na temperatura de 100 °C. ....	69
Figura 26: Experimento com lodo de estação de tratamento de água acidificado e tratado na temperatura de 500 °C. ....	71



Figura 27: Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). ...	73
Figura 28: Massa específica do geopolímero .....	73
Figura 29: Índice vazios do geopolímero.....	74
Figura 30: Absorção de água do geopolímero .....	75
Figura 31: Resistência a compressão .....	77
Figura 32: Frações solúveis:(a) sais de ferro. (b) sais de alumínio. ....	100

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Definições de águas pela Portaria MS 2.914/2011.....	19
Quadro 2: Estudo da recuperação do coagulante adsorvido nas partículas do lodo de estação de tratamento de água (LETA). ....	24
Quadro 3: Estudos para reuso do lodo de estação de tratamento de água em materiais ceramicos. ....	26
Quadro 4: Estudos para a aplicação do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais cimentícios.....	27
Quadro 5: Estudos para reuso e aplicação do lodo de estação de tratamento de água em geopolímeros.....	29
Quadro 6: Composição química da argila caulinitica e do caulim. ....	37
Quadro 7: Composição química da cinza volante .....	38
Quadro 8:Características mineralógicas da literatura sobre a cinza de casca de arroz. ....	40
Quadro 9: Características mineralógicas da literatura sobre o lodo de estação de tratamento de água .....	40
Quadro 10: Teor de matéria orgânica do lodo de estação de tratamento de água (LETA).....	41
Quadro 11: Tratamento térmico no lodo de estação de tratamento de água (LETA) antes do uso.....	42
Quadro 12: Temperatura de calcinação usual pela literatura.....	43
Quadro 13:Propriedades físico-químicas metacaulim HP ultra. ....	48
Quadro 14:Matrix experimental para a caracterização do lodo de estação de tratamento de água (LETA).....	54
Quadro 15:Variáveis do programa experimental. ....	56
Quadro 16:Teste para determinação do modulo de sílica e a razão líquido/sólido. ..	57
Quadro 17: Proporção de material. ....	57
Quadro 18:Massa especifica das amostras do lodo de estação de tratamento de água (LETA).....	61
Quadro 19: Resultado ensaio de perda ao fogo do lodo de estação de tratamento de água (LETA) acidificado. ....	63
Quadro 20: Resultado Fluorescência de Raio - X (FRX).....	64
Quadro 24: Determinação da atividade pozolânica. Título completo .....	99

Quadro 25: Umidade lodo estação de tratamento de água (LETA).....101

## LISTA DE SIGLAS E SIMBOLOS

ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
DAM	Drenagem Ácida de Minas
ETA	Estação de Tratamento de Água
CPs	Corpos de prova
DQO	Demanda Química de Oxigênio
SST	Sólidos Suspensos Totais
PAC	Policloreto de Alumínio
Si	Sílica
Al	Alumínio
CO <sub>2</sub>	Dióxido Carbono
Fe	Ferro
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SABESP	Companhia de Saneamento de São Paulo
pH	Potencial Hidrogênio
CAC	Cimento de Aluminato de Calcio
Eh	Potencial redox
DRX	Difração de Raio X
MPa	Megapascal
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de Água
cP	centiPoise

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
3.1	A ÁGUA .....	19
3.2	ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA).....	19
3.3	GERAÇÃO DO LODO DE ETA.....	22
3.4	DESTINAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) 23	
3.4.1	<i>Emprego de ácido no lodo de estação de tratamento de água (leta) para recuperação do coagulante.....</i>	<i>24</i>
3.4.2	<i>Emprego do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em cerâmicas. 25</i>	
3.4.3	<i>Emprego do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais cimentícios.....</i>	<i>27</i>
3.4.4	<i>Emprego do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais geopoliméricos.....</i>	<i>28</i>
3.5	GEOPOLIMÉROS .....	30
3.6	PRECURSORES GEOPOLIMÉRICOS CLÁSSICOS .....	36
3.6.1	<i>Metacaulim como precursor de geopolímeros.....</i>	<i>36</i>
3.6.2	<i>Cinza Volante .....</i>	<i>38</i>
3.6.3	<i>Precursores geopoliméricos alternativos .....</i>	<i>39</i>
3.7	FATORES DO PREPARO DA SOLUÇÃO ATIVADORA DO GEOPOLÍMERO.....	43
3.8	TRATAMENTO ÁCIDO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA).....	44
3.9	DRENAGEM ACIDA DE MINAS.....	45
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>

	14
4.1 SOLUÇÃO ATIVADORA.....	48
4.2 PRECURSOR COMERCIAL - METACAULIM.....	48
4.3 PRECURSOR PREPARADO A PARTIR DO LETA.....	49
4.4 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO ÁCIDA .....	50
4.5 PREPARAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA). 51	
4.6 PREPARO DO PRECURSOR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) ACIDIFICADO. ....	53
4.7 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PRECURSOR .....	54
4.8 PREPARAÇÃO DA DOSAGEM .....	55
4.9 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	56
4.10 PREPARO DO GEOPOLÍMERO .....	57
4.11 CARACTERIZAÇÃO DO GEOPOLÍMERO.....	59
<b>5 RESULTADOS e discussões .....</b>	<b>61</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) .....	61
5.1.1 <i>Massa específica</i> .....	61
5.1.2 <i>Umidade</i> .....	62
5.1.3 <i>Perda ao fogo</i> .....	62
5.1.4 <i>Fluorescência de raio – X (FRX)</i> .....	63
5.1.5 <i>Difração de raio – X (DRX)</i> .....	64
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO GEOPOLÍMERO COM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) ACIDIFICADO.....	68
5.2.1 <i>Formação da pasta para o LETA tratado em 100 °C</i> .....	68
5.2.2 <i>Formação da pasta para o LETA tratado em 500 °C</i> .....	69
5.2.3 <i>Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)</i> 71	
5.2.4 <i>Propriedades físicas: Massa específica, absorção de água e índice de vazios</i> 73	
5.2.5 <i>Resistência à compressão axial</i> .....	75
<b>6 ESTIMATIVA DOS CUSTOS PARA produção do precursor geopolimerico a partir do lodo de eta com tratamento Ácido.....</b>	<b>77</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>

<b>8</b>	<b>RECOMENDAÇÃO TRABALHO FUTUROS.....</b>	<b>79</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICES.....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE A: ATIVIDADE POZOLÂNICA ENSAIO DE CHAPPELLE</b>	
	<b>MODIFICADO .....</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE B: FRAÇÕES SOLÚVEIS.....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A expectativa de vida elevada e a taxa de crescimento da população mundial de 1,2 % ao ano, faz com que haja um déficit de água potável, que atualmente é estimada em 4.600 km<sup>3</sup>/ano. Para suprir a necessidade de água, é preciso fazer uso dos mananciais superficiais, mas em muitos casos a qualidade da água é precária, sendo necessário um tratamento adequado (DA SILVA, F. P.; CARVALHO; CARDOSO, 2019; NATASHA *et al.*, 2015; TEIXEIRA, S. F. *et al.*, 2018).

As estações de tratamento de água em muitos casos são construídas para operar no método convencional, que consiste em duas etapas. A primeira é a de coagulação, onde é adicionado produtos químicos para que ocorra a desestabilização dos colóides em suspensão e assim reduzindo a força de repulsão entre partículas, promovendo seu agrupamento em coágulos. E a segunda etapa é a floculação onde ocorre a união dos grumos formados no processo de coagulação, onde as partículas se aglomeram formando um floco com peso molecular capaz de sedimentar e formar um lodo estratificado da fase , para isso, os produtos mais empregados são a base de sais de Ferro (Fe) e Alumínio (Al) (ARAUJO, 2008; OLIVEIRA, E. A. De; LEITE, 2018; SANTOS, A. D. Dos, 2003; TAFAREL *et al.*, 2016).

Um dos problemas relacionados ao lodo de estação de tratamento de água (LETA) é a umidade cerca de 95%, contendo de 0,2 a 5% de sólidos, após o adensamento nos decantadores. Neste aspecto é interessante desidratar o LETA antes do descarte, para isto é utilizado o leito de secagem por ter baixo custo e manutenção relativamente fácil (RODRIGUES, FERNANDO NERIS; AMÂNCIO, 2018). A faixa de geração de resíduos é dada pela qualidade do manancial, que varia de 12 a 18 gramas de sólidos secos para cada m<sup>3</sup> de água tratada (ROSARIO, 2007), e para uma destinação adequada o custo da tonelada de LETA pode chegar a cerca de R\$ 160,00 (SMIDERLE, 2016).

Para minimizar este custo, é preciso encontrar soluções para a destinação do LETA, neste sentido há três linhas de pesquisa: A primeira é o uso em materiais cimentícios com a substituição ou adição na mistura, mas a literatura traz alguns problemas recorrentes, como a redução na resistência à compressão, o aumento na absorção de água e o não atendimento das normas brasileiras (CHÁVEZ PORRAS; DE LIMA ISAAC; MORITA, 2008; HOPPEN, C. *et al.*, 2005; PAIXÃO, L. C. C. *et al.*, 2008; TARTARI *et al.*, 2011). A segunda é a recuperação do coagulante adsorvido



nas partículas do LETA por meio da acidificação. O coagulante recuperado pode ser empregado no processo de tratamento com eficiência similar ao comercial. Contudo, o custo do ácido utilizado no processo ainda torna a técnica antieconômica, mesmo considerando o coagulante como um produto e ao mesmo tempo reduzindo o volume do LETA para a destinação final (DANDOLINI, 2014; FREITAS; FERREIRA FILHO; PIVELI, 2005; FROTA, 2020; DE OLIVEIRA et al., 2019; FREITAS; FERREIRA FILHO; PIVELI, 2005; JULIO; SANTOS; OROSKI, 2009; KEELEY et al., 2016; SILVA et al., 2017). E a terceira é o emprego como matéria-prima em produtos álcali-ativados, devido as características do LETA com teores de Sílica ( $\text{SiO}_2$ ) na ordem de 40% e Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na faixa de 30 a 40%. Este material após o tratamento térmico está sendo testado como substituto parcial nas formulações de produtos álcali-ativados (GERALDO, Rodrigo H.; FERNANDES; CAMARINI, 2017; GERALDO, Rodrigo Henrique, 2016; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; ROSSETTO et al., 2019; SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018).

As técnicas foram estudadas separadamente, desta forma este trabalho pretende aplicar a técnica de acidificação para recuperar o coagulante industrial, dando ênfase a parcela sólida não solubilizada como material precursor em formulações de geopolímeros. Cabe salientar que a solução ácida utilizado foi preparada naturalmente pela oxidação do rejeito de carvão contendo pirita, assim possibilitando o uso em conjunto de dois resíduos (LETA e a Pirita) como insumos industriais.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um processo de tratamento para o lodo de estação de tratamento de água, que possibilitará seu uso na construção civil.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar os efeitos da lavagem ácida nas propriedades mecânica do geopolímero.
- b) Avaliar os efeitos das temperaturas de calcinação (100 °C e 500 °C) do LETA e nas propriedades do álcali-ativado após acidificação com a DAM.
- c) Estimar os custos para produção do precursor geopolimérico a partir do LETA acidificado.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 A ÁGUA

Estima-se que no planeta apenas 0,3% da água está disponível ao abastecimento humano, devido a ser uma substância com alto poder de solvatação e estar presente em todos os ambientes geológicos (geosfera, hidrosfera e atmosfera), sendo difícil se obter uma água totalmente isenta de impurezas. Na água superficial, é possível encontrar alguns microrganismos, bactérias e outros químicos tóxicos que trazem riscos à saúde da população, com doenças e infecções de veiculação hídrica (diarreicas, esquistossomose, malária) (RICHTER, 2009; RICHTER; NETTO, 1991; MILAGRES, V. R E SAYAGO, 2012; UHR; SCHMECHEL; UHR, 2016).

O ministério da saúde no art. 5 da Portaria GM/MS N° 888/2021 traz algumas definições sobre a qualidade da água e sua destinação, como é visto no Quadro 1.

Quadro 1: Definições de águas pela Portaria MS 2.914/2011

Inciso	Descrição	Definição
I	Água para consumo humano	Destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos independente da origem.
II	Água potável	Tem que atender os padrões de potabilidade estabelecidos na norma e não oferecendo risco a saúde.
III	Padrão de potabilidade	valores normatizados por lei como parâmetro de qualidade da água para consumo humano.
V	Água tratada	Água que foi submetida a processos físicos, químicos, visando atender os padrões de potabilidade.

Fonte: Adaptado MINISTERIO DA SAÚDE (BRASIL), 2011.

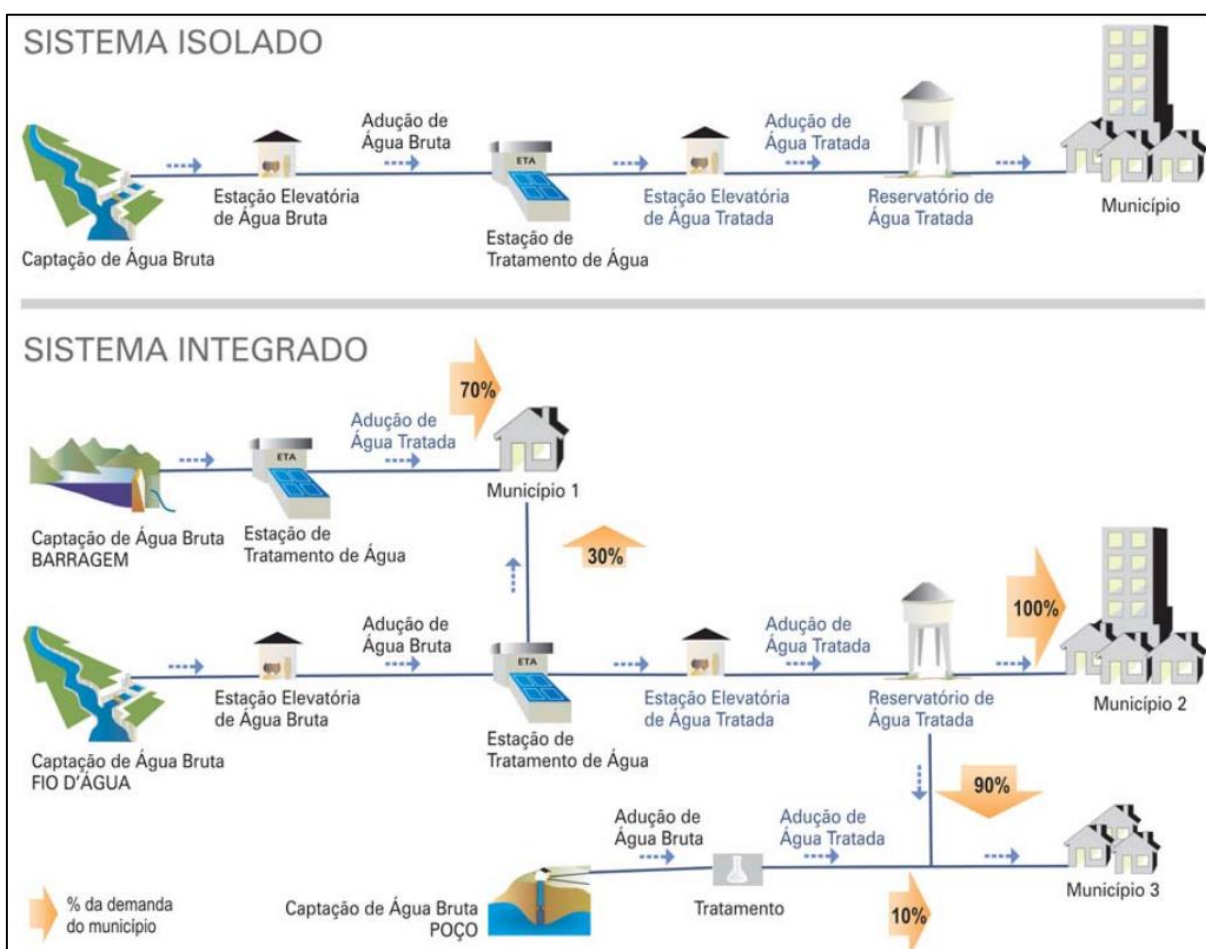
#### 3.2 ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETA)

A escolha do processo para o tratamento da água depende da qualidade do manancial, e pode ser dividida em: Simples, onde a desinfecção é feita por cloração/fluoretação antes da distribuição; Tratamento simplificado, em que a água passa por um sistema de filtração podendo ser empregados como o clarificador de contato, filtração rápida seguida da desinfecção; e por fim o tratamento mais

empregado que é o convencional, sendo o uso do processo completo que inclui, floculação, decantação, filtração, correção de pH, desinfecção e fluoretação (SAAE, 2006).

No Brasil há cerca de 7.500 ETAs, e aproximadamente 75% utilizam o processo convencional de ciclo completo de tratamento (Coagulação, Floculação, Decantação e Filtração) (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013; BOTERO *et al.*, 2009; RICHTER, 2009). Já no Atlas de abastecimento urbano os sistemas são divididos em integrado e isolado, onde tem-se para os municípios que abrangem o estudo o número de 466 ETAs do tipo integrada, quando os municípios estão com suas redes interligadas e desta forma suprem a necessidade de água tratada e 2.589 ETAs do tipo isolada, que são as estações destinadas a suprir um único município, como mostra a Figura 1 (ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (BRASIL), 2010).

Figura 1: Sistemas de tratamento e distribuição de água.



Fonte: Adaptado ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), 2010

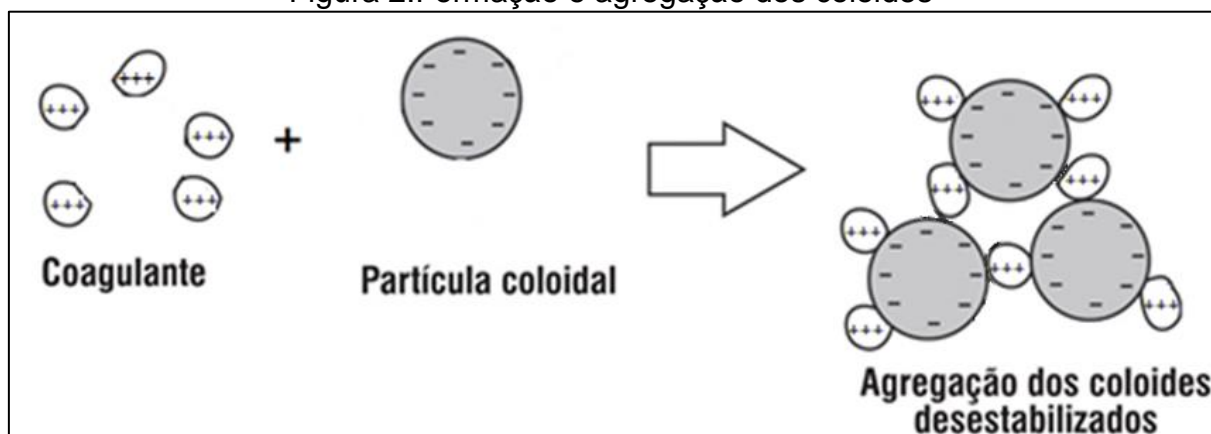
O tratamento completo da água segue diversas etapas que se subdividem em: (i) coleta – a qualidade do manancial, podendo ser necessário a busca de locais mais distantes o que exige uma demanda maior de energia e infraestrutura de adução; (ii) tratamento – consumo de produtos químicos e energia, perdas do sistema e geração de resíduos; (iii) distribuição – qualidade da água tratada, o volume e destinação final do resíduo (FRANCISCO; POHLMANN; FERREIRA, 2011; GOMES *et al.*, 2019; MINISTERIO DA SAÚDE, 2011).

A qualidade da água e o tipo de tratamento que deverá ser empregado é baseado em diversos parâmetros, que indicam as principais características físicas, químicas e biológicas do manancial, principalmente nos casos de mananciais superficiais. Um dos parâmetros mais difíceis de quantificar é o sabor e odor causado por algas e cianobactérias na água, pois não existe um valor padrão organoléptico (DANDOLINI, 2014; SPERLING, 1996).

Para remover as partículas em suspensão da água, é necessário neutralizar suas cargas elétricas e produzir a coagulação, qualquer agente que promova este processo pode ser denominado de coagulante. Na maioria das vezes, são sais polivalentes capazes de formar hidróxidos insolúveis, neste sentido o sulfato de alumínio  $[Al_2(SO_4)_3]$  é utilizado há mais de 100 anos em diferentes ETAs, devido ao custo baixo, fácil manipulação e reduzida solubilidade do hidróxido formado. Outro coagulante que pode ser empregado é a base de sais de ferro onde tem-se o cloreto férrico  $[FeCl_3]$  e o sulfato férrico  $[Fe_2(SO_4)_3]$ . A decisão técnica para escolha de qual coagulante usar inclui a qualidade da água tratada, facilidade de operação, disponibilidade do produto, o menor custo, menor volume de lodo e melhores condições para desidratar o lodo (GOMES *et al.*, 2019; RICHTER, 2009).

Os sólidos com dimensão entre 1 e 1000 nm, que estão dispersos na água e comumente denominados de coloides, e estão mantidos em suspensão pela repulsão eletrostática na superfície e assim impedindo a colisão das partículas para formar um aglomerado com peso molecular capaz de decantar. Quando ocorre a adição do coagulante, o cátion trivalente possibilita a neutralização das cargas e com isto agrupando estas partículas, além de formar hidróxidos metálicos e produzindo partículas mais densas capazes de decantar Figura 2 (LUCCA, 2017).

Figura 2: Formação e agregação dos colóides



Fonte: Adaptado de SASAKI, (2015).

### 3.3 GERAÇÃO DO LODO DE ETA

O processo de tratamento de água é baseado na concentração de fase, isto é, os poluentes dispersos em um grande volume de água são agrupados em um menor volume líquido, portanto é inevitável a geração de lodo ao fim do processo. A destinação ambientalmente segura do lodo é o grande desafio das companhias de abastecimento público de água no Brasil, estima-se que uma ETA de ciclo completo produza em média 51.840 m<sup>3</sup>/d (SAMAE, 2018) de água potável, e gere cerca de 1,8 t/d de lodo úmido para uma vazão de 2,4 m<sup>3</sup>/s de água tratada (GOMES *et al.*, 2019; OLIVEIRA, I. Y. Q. De; RONDON, 2016; SALAZAR; GUTIERREZ, 2014; WAGNER; PEDROSO, 2014).

A quantidade do lodo gerado depende de alguns fatores como: A quantidade de sólidos suspensos na água captada, o coagulante escolhido, e outros produtos como alcalinizante e/ou adsorvente, como a cal e o carvão ativo respectivamente. Comumente são aplicados dois métodos para estimar o volume de lodo gerado, o primeiro se baseia na quantidade de sólidos presentes na água bruta e a dosagem dos produtos químicos e o segundo é por ábacos empíricos que se estima o lodo em proporção ao volume de água tratada (CANCINO; VARGAS, 2015).

Os lodos gerados na ETA são classificados como: (i) - lodos de decantadores, provenientes da coagulação e (ii) - lodos de filtros, proveniente dos flocos residuais que passaram pelo decantador. Geralmente apresentam um teor de sólidos de até 5%. Apesar de apresentarem baixos teores, contendo mais de 95% de água são

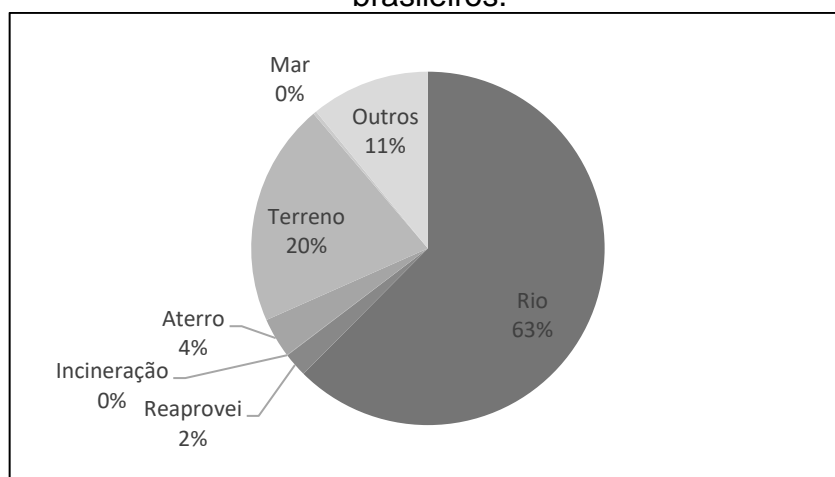
classificados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 10.004 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS., 2004) como resíduos sólidos, vetando o lançamento *in natura* no meio ambiente (SALAZAR; GUTIERREZ, 2014; SILVEIRA *et al.*, 2015).

### 3.4 DESTINAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

No Brasil, as ETAs que foram implantadas antes da publicação das leis que normatizam o licenciamento das atividades com potencial poluidor, não seguem os critérios construtivos contemplando os sistemas de destinação e disposição final do LETA gerado. Os resíduos que são gerados, são o lodo de decantadores e a água de lavagem dos filtros. O LETA é classificado como Resíduo Classe II A – não inerte, o descarte deve estar de acordo com a norma NBR 10.004/04 e o que propõe a Lei N° 12.305/10 que é a política nacional de resíduos sólidos – PNRS (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013; ACHON; CORDEIRO, 2015; HENDGES *et al.*, 2017).

No Brasil a prática de reaproveitamento do LETA não está difundida como em países da Europa, como na Holanda que desde 1989 apenas 2 % era lançado em corpos hídricos, nos EUA o percentual é maior onde 11 % é tido como lançamento em cursos d'água, e na França temos 53 % sendo utilizado na construção civil. O Brasil como vemos na Figura 3, 63 % do resíduo é descartado em cursos d'água e apenas 2 % são aproveitados (CUNHA *et al.*, 2019).

Figura 3: Destinação final do lodo de estação de tratamento de água nos municípios brasileiros.



Fonte: Adaptado CUNHA *et al.*, 2019.

Novas alternativas estão sendo testadas, no qual o LETA é utilizado em produtos úteis para a sociedade, neste sentido a incorporação em materiais construtivos e outras técnicas de recuperação de insumos a partir do lodo tem-se mostrado promissoras.

### 3.4.1 Emprego de ácido no lodo de estação de tratamento de água (leta) para recuperação do coagulante

O Quadro 2 traz estudos da recuperação de coagulante, que é feita através da mistura de um ácido ao lodo, possibilitando recuperar parte do coagulante que foi convertido em hidróxido no lodo, além da recuperação é possível melhorar a desidratação do resíduo e ainda gerando um novo subproduto que pode ser reaproveitado como coagulante recuperado, contudo a concentração dos sais de ferro e alumínio é cerca de 100 vezes menor que o comercial (GARDENALLI *et al.*, 2005; JULIO *et al.*, 2011; SILVA, R. de A. *et al.*, 2017).

Quadro 2: Estudo da recuperação do coagulante adsorvido nas partículas do lodo de estação de tratamento de água (LETA).

Autor	Utilização	Conclusões
(DE OLIVEIRA, A. B. <i>et al.</i> , 2017)	Foi utilizado ácido sulfúrico (10 mol/L) para o processo de recuperação do coagulante	O coagulante regenerado foi testado e obteve alguns resultados de redução como na DBO (43,2 %), DQO (59,8 %), Nitrito (50 %) e Turbidez (70,4 %).
(DE OLIVEIRA, L. N. <i>et al.</i> , 2019)	Recuperar o coagulante retido nas partículas do lodo, utilizando o ácido proveniente da lixiviação da pirita. E destinando a parte que não solubilizou.	Foi possível separar o coagulante do lodo utilizando a drenagem ácida de minas, e mostrando eficiência semelhante ao comercial. O material que não solubilizou no processo, se mostrou alternativa para incorporar em formulações de geopolímeros.



(VILELA, 2020)	Recuperar o coagulante através da via alcalina-acida, onde é extraído inicialmente com pH 12 e posterior com pH 2	Foram testados nos parametros Cor e Turbidez, e dos quatro coagulantes obtidos tres apresentaram resultados superiores a 99 %.
----------------	---	--

### 3.4.2 Emprego do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em cerâmicas.

O Quadro 3 mostra alguns estudos da incorporação do LETA como substituto parcial em formulações de cerâmicas vermelhas, devido as suas características mineralógicas serem semelhantes as argilas. Algumas implicações no uso do LETA é descrito pela literatura, como a variação das características em um mesmo material ao longo do ano e redução nas propriedades físicas dos materiais com a incorporação do LETA (SILVA, E. L. G. Da; MACIEL, 2019a; TEIXEIRA, S. R. *et al.*, 2006).

Quadro 3: Estudos para reuso do lodo de estação de tratamento de água em materiais ceramicos.

Autor	Utilização	Conclusões
(FIGUEIREDO; NUVOLARI, 2004)	Incorporação de lodo no solo nas proporções de 10, 20, 30 e 40 %, para fabricação de tijolo maciço.	Com o aumento dos teores de lodo, ocorreu a redução da resistência a compressão.
(CASTÃO <i>et al.</i> , 2017)	Incorporação de Lodo de ETA em tijolos cerâmicos nas proporções de 10,20 e 30 %.	Os resultados apresentaram que a retração linear reduziu com a adição do lodo. Acima de 10% de lodo a absorção de água aumenta e a resistência mecânica reduz.
(SILVA, E. L. G. Da; MACIEL, 2019a)	Incorporação de lodo de ETA em massa argilosa nas proporções de 5, 10, 15, 20 e 25 %	A absorção de água varia em função dos teores de lodo utilizados. Todos os CPs apresentaram absorção de água inferiores a 25 %. CPs com teor de até 15 % de lodo pode ser empregado na fabricação de tijolos maciços.
(CHALHOUB <i>et al.</i> , 2019)	Incorporação de lodo de ETA em solo nas proporções de 3, 6, 9 e 12 % para fabricação de tijolo ceramico	É possível utilizar o lodo para a fabricação de tijolos, mas deve-se obedecer a porcentagem de água na mistura. Quando utilizado teores acima de 9 %, ocorre uma

		maior retração e com isso a redução da resistência.
--	--	---

### 3.4.3 Emprego do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais cimentícios.

O Quadro 4 traz alguns estudos onde foi utilizado o LETA em materiais cimentícios, tanto na forma de substituição parcial ao cimento Portland ou como agregado, neste caso o resíduo deve ser calcinado para eliminar os teores de matéria orgânica característica deste tipo de material. Há um limite no uso do material pois ocorre na redução da resistência a compressão, sendo utilizado porcentagem próxima a 25 %, pois a substituição do cimento pelo LETA faz com que ocorra redução na condutividade elétrica com um tempo maior de cura (HOPPEN, Cinthya *et al.*, 2006b; RUVIARO *et al.*, 2020; STEIN, 2016).

Quadro 4: Estudos para a aplicação do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais cimentícios.

Autor	Utilização	Conclusões
(HOPPEN, Cinthya <i>et al.</i> , 2006a)	Uso de 3, 5, 7 e 10 % de lodo de ETA em substituição em peso de agregado miúdo, na formulação de concreto.	10 % é o teor máximo de substituição, pois a resistência a compressão foi inferior a 15 MPa. 4 a 8 % de substituição no peso da areia, obteve-se resistência superior a 27 MPa.
(RODRIGUES; HOLANDA, 2013)	Substituição de solo por 5 % de lodo de ETA, em formulação de tijolo solo-cimento	O uso de lodo na formulação influencia diretamente nas propriedades tecnológica do tijolo.

		Só é possível substituir a porcentagem máxima de 1,25 % de lodo no tijolo.
(RUVIARO <i>et al.</i> , 2020)	Avaliar a influência da incorporação de 10 e 25 % de lodo de ETA calcinado, como MCS em pastas e argamassas.	Não ocorreu perdas significativas de resistência a compressão utilizando 25 % de substituição. Na resistência a tração na flexão, só é possível utilizar 10 % de substituição sem perdas.

#### 3.4.4 Emprego do lodo de estação de tratamento de água (LETA) em materiais geopoliméricos.

O Quadro 5 traz alguns estudos sobre a utilização do LETA como matéria prima geopolimérica, tanto como precursor ou como agregado. Mas alguns problemas são relacionados ao uso deste resíduo in natura, tais como: Redução da resistência mecânica, porosidade, aumento da absorção de água, são alguns problemas quando utilizados em massa cerâmica. Sendo necessário o beneficiamento antes da utilização, um dos métodos é a calcinação onde consegue-se remover a água e a matéria orgânica adsorvida nas partículas do material (SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018). Algumas implicações ocorrem no uso do LETA em formulações geopolimérica, como a necessidade do tratamento térmico no resíduo devido ao alto teor de matéria orgânica, os teores de sílica ( $\text{Si}_2\text{O}$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) interferem na qualidade do produto. A incorporação do LETA faz com que a resistência a compressão seja reduzida em comparação ao corpos de prova de referência com reduções na ordem de 25 %, por fim, a temperatura de calcinação do material é um divisor pois a literatura indica que em temperaturas acima dos  $900^\circ\text{C}$  implica na perda de resistência e temperaturas abaixo do  $600^\circ\text{C}$  também ocorre mas com reduções menores, ou seja a determinação desta temperatura é um complicador para o uso do resíduo (ROSSETTO, 2017; WAIJAREAN; ASAVAPISIT; SOMBATSOMPOP, 2014)

Quadro 5: Estudos para reuso e aplicação do lodo de estação de tratamento de água em geopolímeros.

Autor	Utilização	Conclusões
(WAIJAREAN; ASAVAPISIT; SOMBATSOMPOP, 2014)	Foi estudado o uso do lodo de estação de tratamento de água para formulações de geopolímeros.	Uma das conclusões que o autor chegou foi que o lodo não calcinado não desenvolveu resistência nos estágios iniciais, tendo valores próximos de 0,76 MPa após 60 dias de cura.
(GERALDO, Rodrigo Henrique, 2016)	Foi estudado as proporções de substituição de metacaulim por lodo de 0, 15, 30 e 60 %.	O uso do lodo de ETA traz um aumento na porosidade e com isso redução nas resistências a tração na flexão e na compressão. Nas argamassas com 15 % de substituição conseguiu-se uma média de 25 MPa na resistência a compressão.
(ROSSETTO, 2017)	Foi testado as substituições de metacaulim por lodo de ETA nas proporções de 0, 10, 15 e 20 %. E adição de 0, 10, 15 e 20 %.	No estado fresco o lodo faz com que a trabalhabilidade seja reduzida. Na substituição ocorreu perda de resistência, com redução na ordem de 25,39 %. Na adição ocorreu um ganho na resistência a compressão, com acréscimos na ordem de 17,73 %.

(ABDELAAL <i>et al.</i> , 2020)	Foi estudado a mistura de lodo de ETA com matacaulim desaluminado, nas proporções 75/25, 80/20, 85/15, 90/10 e 95/5) para imobilização de ions $Cd^{+2}$ , $Pb^{+2}$ e $Hg^{+2}$	O geopolímero apresentou uma resistência a compressão de 8 MPa, para a proporção 85/15. Os testes foram feitos com a concentração de 100, 200 e 300 ppm dos metais pesado, tendo uma eficiência de 98 % de imobilização.
---------------------------------	--	--

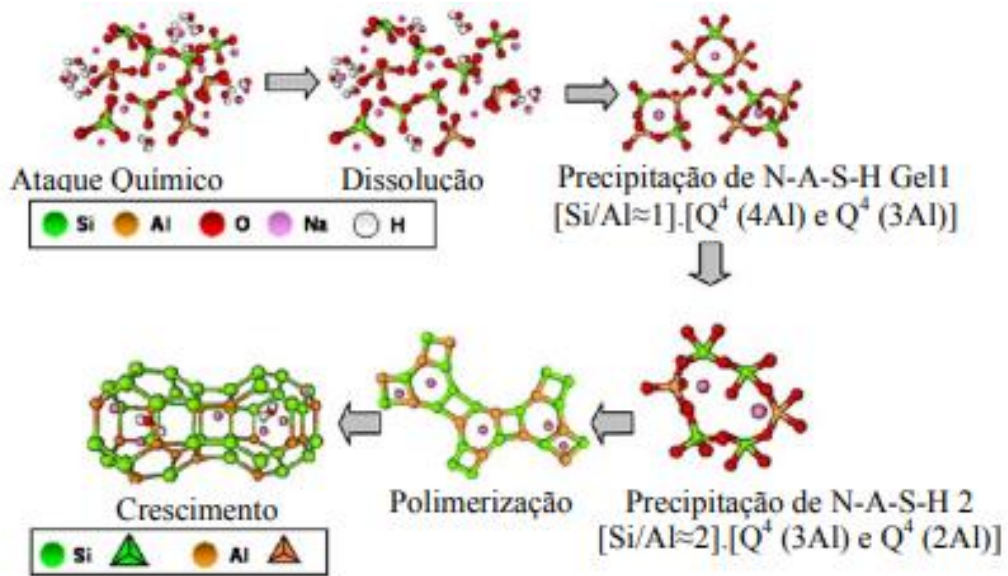
### 3.5 GEOPOLIMÉROS

Glukhovsky (1957) foi o primeiro a realizar pesquisas da possibilidade em preparar materiais cimentícios com baixo teor de cálcio, esses novos materiais foram classificados em dois sistemas principais; a primeira era elevado teor de cálcio [ $Me_2O$ - $Me_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ ]; e a segunda com baixo teor de cálcio [ $Me_2O$ - $MeO$ - $Me_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$ ]. Entre 1970 e 1973, devido a ocorrência de incêndios que danificaram as estruturas de concreto, foi iniciado estudos para criar um produto que fosse resistente ao fogo sem inflamabilidade. Baseado na capacidade de polimerização do Silicato e do Alumínio, em meio alcalino foi desenvolvido um material denominado geopolímero patenteado por Davidovits em 1978 (LONGHI, 2015; PALOMO, A. *et al.*, 2014).

Os cimentos alcalinos podem ser classificados e divididos em três categorias: (a) Cimentos com elevado teor de cálcio, o principal produto desta reação é um gel C-S-H (hidrato de silicato de cálcio), semelhante a hidratação do cimento Portland; (b) Cimentos com baixo teor de cálcio, o principal produto desta reação é um polímero alcalino inorgânico tridimensional, conhecido como N-A-S-H (geopolímero); e (c) Cimento híbrido, os produtos desta reação são complexo, pois envolve uma mistura de géis cimentícios, o gel C-A-S-H (contem sódio) e (N, C) -A-S-H (gel de N-A-S-H) com altos teores de cálcio (PALOMO, A. *et al.*, 2014) a Figura 4 mostra o processo de ativação alcalina dos aluminossilicatos.

Cabe salientar que a nomenclatura adotada para os géis são N- Sódio, A – Alumínio, S- Sílica e H- Água

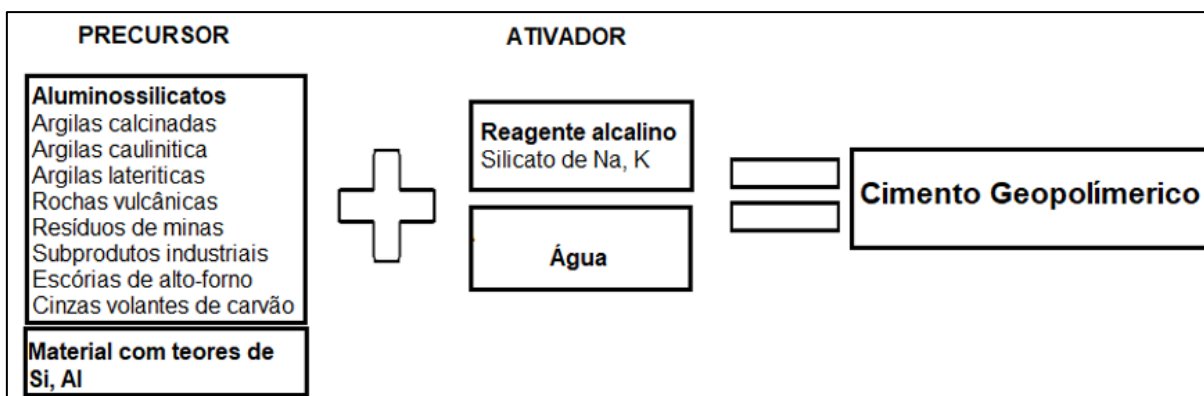
Figura 4: Modelo para ativação alcalina de aluminossilicatos



Fonte: (SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011).

A reação da mistura de um aluminossilicatos sólido com uma solução aquosa de alta concentração alcalina, produz um polímero inorgânico sintético, que foi denominado genericamente cimentos alcalinos, e quando a proporção mínima entre Si e Al é de 1:1 é denominado de geopolímero, nomenclatura dada por Davidovits. Há uma gama de materiais que podem ser empregados como precursores na preparação dos cimentos alcalinos. Alguns precursores não necessitam de processos adicionais para sua aplicação tais como as cinzas vulcânicas e a terra diatomáceas, outros como as argilas Caulinítica necessitam de tratamento térmico (metacaulim), para a produção do geopolímero pode-se utilizar uma variedade de precursores oriundos de processos da indústrias ou de origem natural, tais como as cinza volante, metacaulim, escórias de alto forno (AZEVEDO *et al.*, 2017; AZEVEDO; STRECKER; LOMBARDI, 2018; RAMOS, 2017), como mostra a Figura 5.

Figura 5: Mistura de cimentos geopoliméricos



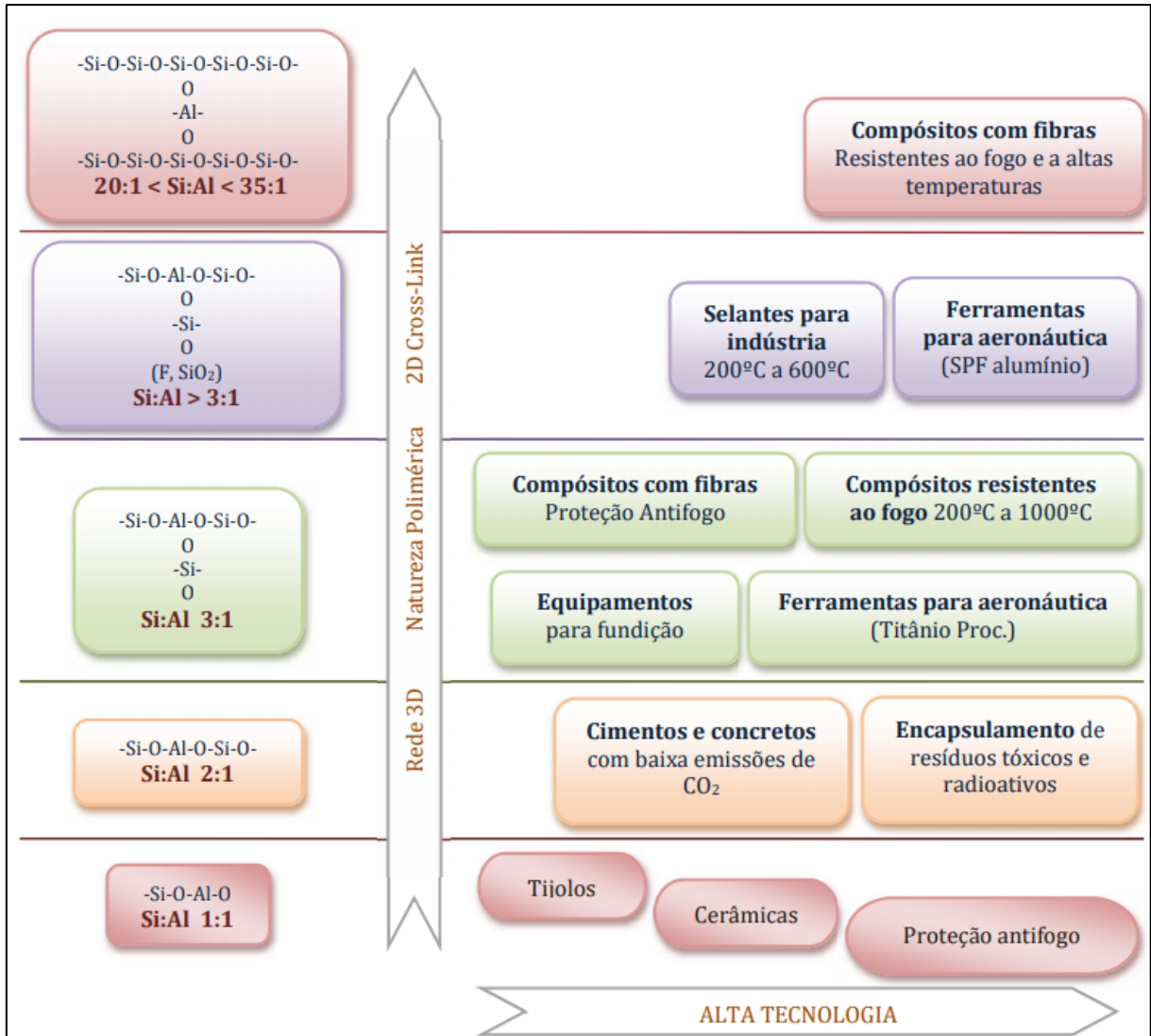
Fonte: Adaptado (DAVIDOVITS, J., 1991).

Esses materiais conseguem fornecer desempenho comparável aos tradicionais materiais cimentícios (resistência a compressão, resistência a ácidos, baixa contração e baixa condutividade térmica), com a vantagem de emitir teores mais baixos de CO<sub>2</sub> (DAVIDOVITS, J., 2017; DUXSON, P. *et al.*, 2007b; ISTUQUE *et al.*, 2019; TEMUJIN *et al.*, 2009).

Nas décadas de 80 e 90 os materiais desenvolvidos por Davidovits chegaram à escala industrial e receberam nomes diferentes para cada país em que eram produzidos como: *PYRAMENT cements* no Estados Unidos, *TROLIT binders* na Alemanha e *GEOPOLYMITE binders* na França. No Brasil está sendo comercializado atualmente pela empresa Geo-Pol, no formato de um bicomponente, tendo na formulação da mistura de um precursor e um ativador. A Figura 6 mostra a aplicação de algumas espécies de geopolímeros que obtiveram sucesso (CABALLERO, 2017).



Figura 6: Aplicação de algumas espécies de geopolímeros



Fonte: ALVARENGA, (2018), apud DAVIDOVITS, (2002)

A nomenclatura geopolímero é baseada no termo polissialato, que é a abreviação de sílico-oxo-aluminato, estas estruturas variam em função da proporção de Si:Al: poli(sialato) -Si-O-Al-O- (razão Si:Al=1:1); poli(sialato-siloxo), -Si-O-Al-O-Si-O- (razão Si:Al=2:1) e o poli(sialato-dissioloxo), -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O- (razão Si:Al=3:1). (DAVIDOVITS, J., 1991).

A concepção do geopolímero dada por Davidovits relata algumas características e vantagens do novo material desenvolvido, como a alta resistência, a cura em ambiente com curto espaço de tempo (20 MPa com apenas 4 horas), podendo atingir resistência na faixa de 70 a 100 MPa com modificações na condição de cura, ainda traz outras características como: Baixos valores de permeabilidade,

resistência a altas temperaturas, alta durabilidade, matéria-prima abundante, economia de energia, elevada resistência ao fogo, resistência a abrasão, baixa emissões de CO<sub>2</sub>, entre outras (DUXSON, P. *et al.*, 2007b; FORNASA, 2017; KORF, 2019b; LEMOUGNA *et al.*, 2016; ZHAO; SANJAYAN, 2011).

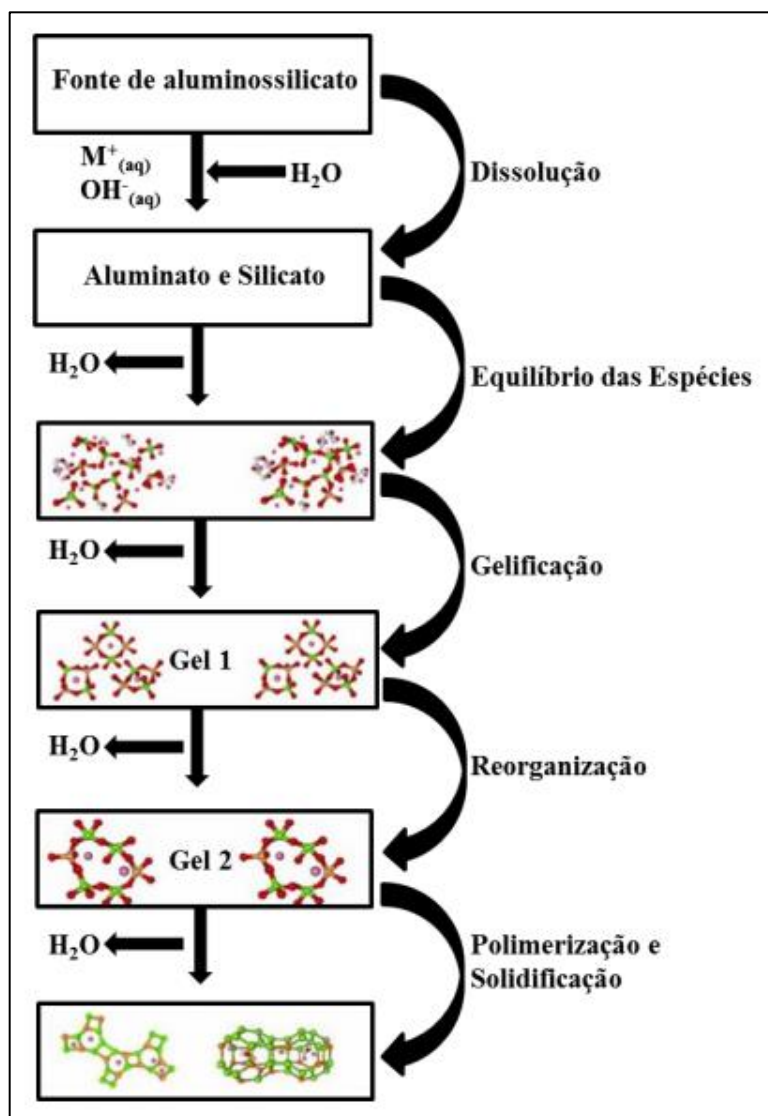
O grau de polimerização resultante da mistura de um precursor e um ativador alcalino depende das características físicas (tamanho da partícula, arranjo atômico, área de contato) e químicas (composição química, concentração do ativados, solubilidade das espécies, e as razões entre sílica/alumina, sílica/sódio, líquido/sólido e a temperatura de cura, assim como a utilização de aditivos (DAVIDOVITS, J., 2017; ROWLES; O'CONNOR, 2003; SANTA, 2012).

A formação do polímero inorgânico se dá através da mistura da sílica e do alumínio em solução no meio alcalino, tendo sua origem em parte do precursor e em parte oriunda dos ativadores, que são materiais coadjuvantes na formação do material geopolimérico. A cristalização organiza o sistema em rede tridimensional de silico-aluminato, em poucas horas. Após o gel ser formado as partículas se realinham e com isto ocorre a polimerização e o endurecimento da mistura, como mostra a Figura 7 (GERALDO, Rodrigo Henrique, 2016; KORF, 2019b; ROSSETTO, 2017; SANTA, 2012).

A estrutura do geopolímero para a razão sílica/alumina superior a 2, consiste em uma rede de unidades funcionais formadas por tetraedros de SiO<sub>4</sub>(2 Al), com o alumínio fazendo o cruzamento das cadeias poliméricas devido ao número de coordenação IV, que é assumido pelo alumínio para poder resultar em uma carga negativa, assim balanceando o sistema através dos íons positivos que estão alocados nas cavidades da rede tetraédrica. Estes íons positivos são fornecidos pelo ativador que é a base de cátions metálicos tais como o Sódio (Na<sup>+</sup>) e/ou Potássio (K<sup>+</sup>), onde a ligação de Si-O-X (X= Na<sup>+</sup> ou K<sup>+</sup>) faz com que não ocorra o retorno das ligações de siloxane (Si-O-Si), (DAVIDOVITS, Joseph, 1994; LOT; MELCHIADES; BOSCHI, 2015; MAZZA, 2010; ROCHA, 2017; SILVA, J. V. e, 2019).

Os produtos gerados após a polimerização são semelhantes as zeólita naturais tendo elevada resistência mecânica e durabilidade. A diferença entre a zeólita e o geopolímero é a microestrutura amorfa, mas a grande semelhança com a estrutura porosa das zeólita permite que os geopolímeros sejam excelentes para o confinamento de resíduos radioativos e metais tóxicos (DOS SANTOS, F. A., 2017; SILVA, J. V. e, 2019).

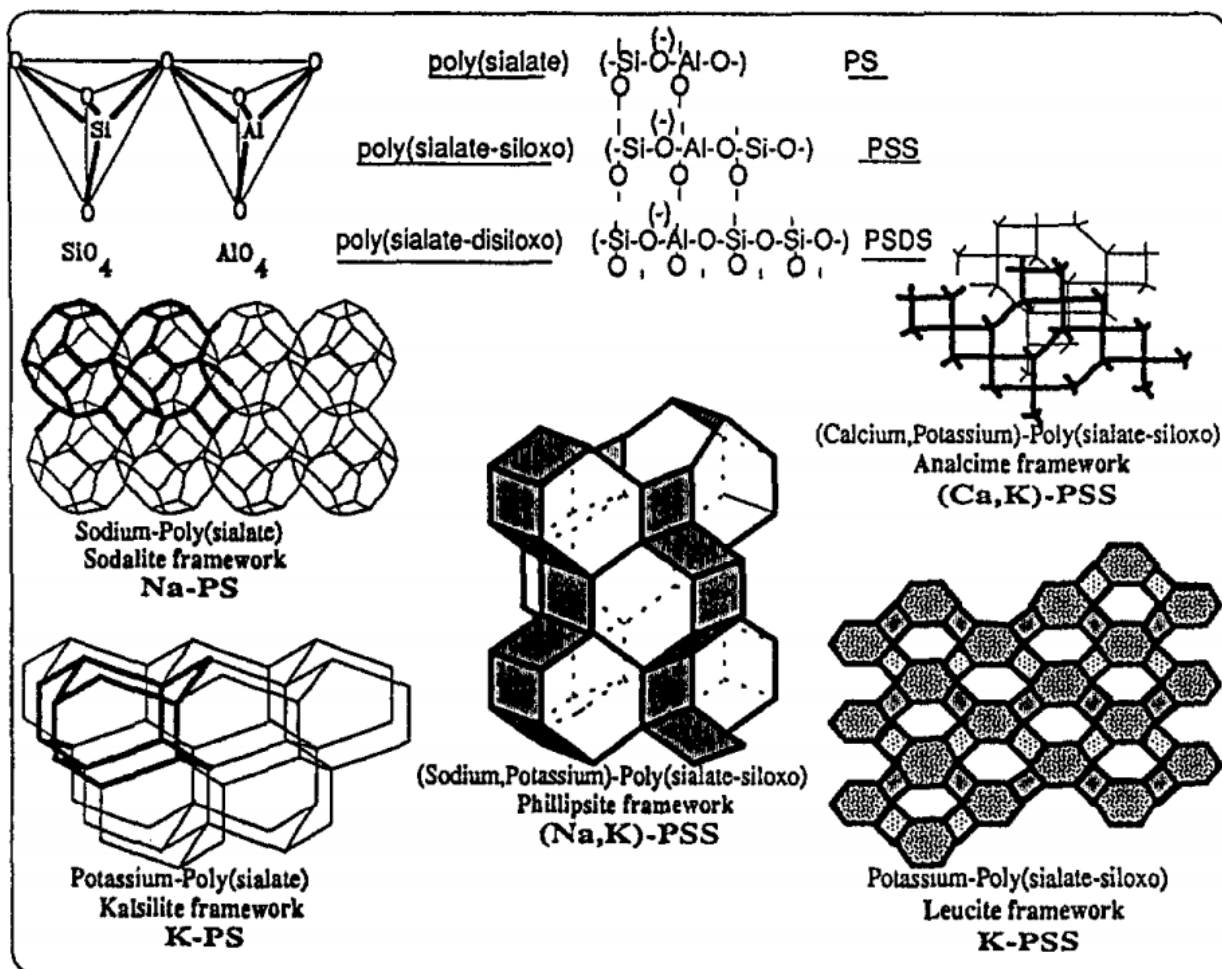
Figura 7: Processo de geopolimerização.



Fonte: Adaptado (DUXSON, P. *et al.*, 2007a)

A designação química do material dada por Davidovits, representa um material poli(sialato) (PS-A) Figura 10. Esse sistema polimérico é organizado em tetraedros de  $SiO_4$  e  $AlO_4$  ligadas alternadamente pelo compartilhamento dos átomos de oxigênio (DOS SANTOS, F. A., 2017).

Figura 8: Redes de Sialato



Fonte: Adaptado de (DAVIDOVITS, J., 1991).

### 3.6 PRECURSORES GEOPOLIMÉRICOS CLÁSSICOS

#### 3.6.1 Metacaulim como precursor de geopolímeros

O termo Caulim é proveniente da palavra chinesa Kauling, em referência a colina de Jauchau Fu, localizada ao norte da China, onde o material é extraído. O caulim tem como composição principal a caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) como mostra o Quadro 6, e com isto a característica predominante da cor branca devido o teor de ferro ser baixo, é encontrado a uma profundidade de dez metros (DE ARAÚJO, 2016; SANTOS, J. P. de O. *et al.*, 2014).

Quadro 6: Composição química da argila caulinitica e do caulim.

<b>Composto</b>	<b>Argila Caulinitica Típica</b>	<b>Caulim Teórico</b>
SiO <sub>2</sub>	> 40,0% e < 60,0%	46,54%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 25,0% e < 45,0%	39,50%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 8,0%	-
Na <sub>2</sub> O	< 0,1%	-
K <sub>2</sub> O	< 3,0%	-
TiO <sub>2</sub>	< 1,0%	-
CaO	< 1,0%	-
H <sub>2</sub> O (PF)	>8,0% e < 18,0%	13,96%
Outros	< 1,0%	-
Relação Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / SiO <sub>2</sub>	-	0,85

Fonte: Adaptado ROCHA, (2005)

O Metacaulim é um material pozolânico, seu uso começou a partir de 1965 onde foi incorporado ao concreto para a construção do barramento no Rio Paraná para a usina hidrelétrica de Jupiá localizada entre as cidades de Andradina e Castilho (SP) e Três Lagoas (MS) no Brasil, onde foi utilizado para conter algumas reações álcali-silica no concreto devido ao uso de agregados obtidos na região da barragem (LACERDA, 2005).

É gerado através da calcinação da argila Caulinitica em uma temperatura que varia dos 650 °C a 800 °C, dependendo da pureza e cristalinidade das argilas. O metacaulim utilizado na geopolimerização tem variação no diâmetro das partículas, na composição, na características físico-químicas da argila de origem e no teor de amorfismo, que define a temperatura de calcinação (SAKIA et al., 2002; LI; SUN; LI, 2010).

A utilização de argilas calcinadas como aditivo pozolânico para cimento tem o seu uso desde a época dos romanos, no entanto apesar de ser conhecida a sua aplicação histórica, o metacaulim não tem seu uso difundido como aditivo pozolânico no concreto em função do seu elevado custo em comparação com outros materiais pozolânicos. A literatura traz muitas informações dos benefícios que a incorporação do metacaulim produz no concreto, tais como a melhora da resistência mecânica, redução da porosidade (GRUTZECK *et al.*, 2002). Ele é considerado o precursor ideal

para a criação do geopolímero, devido as suas características de reatividade e propriedades previsíveis (TEMUJIN *et al.*, 2009).

### 3.6.2 Cinza Volante

As cinzas volantes são provenientes da combustão do carvão mineral para geração de energia elétrica, é um material com textura mais fina, pois é o material arrastado pelos gases no momento da combustão. O material sobressalente que não for comercializado, é levado a minas de carvão onde fica armazenado (SILVA, N. I. W. Da *et al.*, 1999).

As características física, química e mineralógicas da cinza volante dependem de fatores como a composição do carvão utilizado, as condições da combustão e a eficácia do sistema de controle de emissões (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2012), o Quadro 7 mostra o resultado da Fluorescência de Raio – X de uma amostra de cinza volante.

Quadro 7: Composição química da cinza volante

Elemento	Cinza Volante
SiO <sub>2</sub>	64,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,2
K <sub>2</sub> O	2,0
CO <sub>2</sub> *	1,5
CaO	1,4
TiO <sub>2</sub>	1,4
MgO	0,6
Na <sub>2</sub> O	0,2
SO <sub>3</sub>	0,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1
MnO	0,0

Fonte: Adaptado de LIVI; REPETTE, (2015)

### 3.7.3 Escória de Alto Forno

A escória de alto forno é um subproduto da fabricação do aço que é obtida após resfriamento rápido, em que a combinação de calcário, dolomita e as cinzas de carvão

com as impurezas do minério de ferro por meio químico. As escórias possuem propriedades hidráulicas, porém as reações são lentas, o que faz necessário o emprego de ativadores e catalisadores capazes de acelerar esta reação. No ano de 2013 o Brasil gerou cerca de 594 kg de resíduos por tonelada de aço produzido, e cerca de 37 % destes resíduos são de escória de alto forno (COELHO, M. A. M. *et al.*, 2009; PIMENTEL *et al.*, 2019; ROSSA JR.; PORTELLA, 2012).

A escória de alto forno é bem aceitável nas misturas, em que é possível utilizar até 45 % de substituição sem que ocorra alterações significativa nas características do geopolímero, mas a porcentagem de substituição depende da composição química do resíduo que pode interferir nas características físicas (FRARE; LUZ, 2020; ROSSA JR.; PORTELLA, 2012; SILVA, A. R. P. *et al.*, 2019).

### **3.6.3 Precusores geopoliméricos alternativos**

A casca é produzida após o beneficiamento do arroz, e devido ao seu poder calorífico (próximo de 16.720 kJ/kg) vem sendo empregada como substituta da lenha nos processos de secagem e parbolização do grão. As características física e química da cinza de casca de arroz depende da temperatura de queima, o tempo de exposição e a taxa de aquecimento. Este resíduo tem alta porcentagem de sílica podendo chegar a teores entre 70 a 90 %, tendo assim a possibilidade de ser utilizada na massa cerâmica (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001; NUERNBERG, 2018; SANTOS, S. F. Dos *et al.*, 2019).

A cinza de casca de arroz é utilizada na formulação do geopolímero, como fonte de sílica em substituição ao silicato de sódio, por ter elevados teores de sílica (SiO<sub>2</sub>), como mostra o Quadro 8, a temperatura de queima da casca do arroz interfere no teor de sílica (SiO<sub>2</sub>) presente no material (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005; FERNANDES, I. J. *et al.*, 2014)

Quadro 8: Características mineralógicas da literatura sobre a cinza de casca de arroz.

Autor	Componentes (%)						
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO
(NASCIMENTO <i>et al.</i> , 2015)	0,86	86,37	1,16	0,63	3,09	4,79	0,68
(DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001)	0,13	97,87	0,06	0,50	0,88	0,71	0,74
(FERNANDES, Iara Janaína <i>et al.</i> , 2018)	0,062	89,14	0,005	0,006	0,762	0,304	0
(FERNANDES, I. J. <i>et al.</i> , 2014)	0	95,967	0	0,054	0,606	0,508	0
(DELLA; KÜHN; HOTZA, 2005)	0,39	94,95	0,26	0,54	0,94	0,74	0,90
(SILVA, J. O. Da <i>et al.</i> , 2020)	1,87	75,93	0,43	9,40	3,15	1,64	0,80

Um material capaz de gerar a polimerização em meio alcalino deve conter teores de Sílica (SiO<sub>2</sub>) e Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), conforme demonstrado no Quadro 9. Neste aspecto o LETA apresenta algumas vantagens e desvantagens, como principal vantagem destaca-se os altos teores de Sílica (SiO<sub>2</sub>), Alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), e como desvantagem apresentam uma grande variabilidade nas características físico-químicas dependendo do manancial em que a água é coletada e do tratamento aplicado além de um elevado teor de material orgânico (GOUNY *et al.*, 2012; NIMWINYA *et al.*, 2016b; PALOMO, Á. *et al.*, 2007).

Quadro 9: Características mineralógicas da literatura sobre o lodo de estação de tratamento de água

Autor	Componentes (%)							
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
(SILVA, E. L. G. Da; MACIEL, 2019b)	52,19	21,09	17,7	0,45	2,03	0,31	4,08	0,78
(SANTOS, F. P. Dos, 2016)	17,80	11,10	16,50	-	0,6020	0,4430	0,7250	0,3399
(MONTALVAN, 2016)	18,30	46,00	8,89	0,236	0,417	1,59	1,00	0,249



(SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO; MANZATO, 2018)	40,44	11,30	42,19	-	1,29	0,58	2,22	0,66
(FERNANDEZ <i>et al.</i> , 2018)	18,56	0,62	33,98	3,60	0,12	0,63	-	-
(PETTERLE <i>et al.</i> , 2018)	36,11	11,58	32,31	-	1,02	0,42	0,55	0,35
(LAURINDO <i>et al.</i> , 2020)	31,76	9,65	24,97	1,49	0,39	0,64	1,35	-
(RUVIARO <i>et al.</i> , 2020)	66,93	11,01	17,90	0,26	1,10	0,74	1,35	0,36
<b>(ALEXANDRE; LUZ, 2020)</b>	24,2	19,3	25,8	0,3	2,9	0,6	0,2	0,4

Um dos problemas em utilizar o LETA in natura nos materiais geopoliméricos é o seu elevado teor de matéria orgânica Quadro 10, resultando em produtos de baixa resistência mecânica, elevada porosidade e elevada absorção de água. (BOTERO *et al.*, 2009; LUDUVICE, 1996; RODRIGUES, FERNANDO NERIS; AMÂNCIO, 2018; SANTOS, F. P. Dos, 2016).

Quadro 10: Teor de matéria orgânica do lodo de estação de tratamento de água (LETA).

Autor	Matéria orgânica (%)
(TEIXEIRA, S. R. <i>et al.</i> , 2006)	3,2
(OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO; HOLANDA, 2004)	0,95
(BOTERO <i>et al.</i> , 2009)	20,5
	32,5
	68,9
(RODRIGUES, FERNANDO NERIS; AMÂNCIO, 2018)	12,97
(LUDUVICE, 1996)	30 - 40
(SANTOS, F. P. Dos, 2016)	26

A dificuldade em utilizar o LETA in natura é a sua grande variabilidade nas características mineralógicas, podendo encontrar para diferentes épocas do ano e no mesmo ponto de coleta teores de sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) variados. Por este motivo é que a literatura traz na maioria dos trabalhos Quadro 11, a calcinação do resíduo antes da utilização, para que possa reduzir os teores de matéria orgânica que

prejudicam a resistência do material, e principalmente para alterar a estrutura, o tornando amorfo, também a sua baixa razão silício-alumínio é outro ponto negativo da utilização, pois a literatura indica valores entre 0,9 e 1,9 salvo algumas exceções como mostra o Quadro 11. Mas a aplicação do geopolímero depende do valor de sua razão, para um material ser destinado a confecção de cerâmicos com propriedades de resistência ao fogo deve ter uma relação superior a 2, já para resultar em um geopolímero com potencial de imobilização de substâncias a relação deve estar entre 2 e 6, o material com razão entre 6 e 40 são criados produtos com capacidade de selantes industrial e por fim razões superiores a 40 geram-se geopolímeros com elevada resistência ao fogo (DOS SANTOS, F. A., 2017; JESUS; VIEIRA; VIEIRA, 2020; SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018).

Quadro 11: Tratamento térmico no lodo de estação de tratamento de água (LETA) antes do uso.

Autor	Formas de uso do lodo de estação de tratamento de água (LETA)	Razão Molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
(WAIJAREAN; ASAVAPISIT; SOMBATSOMPOP, 2014)	Calcinado	1,78
(NIMWINYA <i>et al.</i> , 2016a)	Calcinado	2,39
(DE OLIVEIRA ANDRADE <i>et al.</i> , 2018)	Calcinado	1,42
(SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018)	Calcinado	0,95
(SANTOS, Géssica Z.B. <i>et al.</i> , 2019)	Calcinado	0,96
(GUO; SHI; DICK, 2010b)	Calcinado	6
(SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018)	Seco	1,06
(WAIJAREAN; ASAVAPISIT; SOMBATSOMPOP, 2014)	Seco	1,84
(SANTOS, Géssica Z.B. <i>et al.</i> , 2019)	Seco	1,06

Não há estudos sobre os benefícios da lavagem ácida sobre as características do LETA, para aplicação em materiais geopoliméricos. Os trabalhos em que o resíduo é aplicado, ocorre apenas o tratamento térmico de calcinação, aonde não há um consenso da literatura sobre a temperatura e o tempo de calcinação do LETA, como mostra o Quadro 12, para após ser utilizado como precursor geopolimérico (ALEXANDRE; LUZ, 2020; BUSELATTO *et al.*, 2019; COELHO, R. V. *et al.*, 2015; FERNANDEZ *et al.*, 2018; LAURINDO *et al.*, 2020; PETTERLE *et al.*, 2018; RUVIARO *et al.*, 2020; SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO; MANZATO, 2018; TAFAREL *et al.*, 2016).

Quadro 12: Temperatura de calcinação usual pela literatura.

<b>Autor</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Tempo</b>
(BUSELATTO <i>et al.</i> , 2018)	600 °C	1 h
(SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018)	750 °C	4 h
(RUVIARO <i>et al.</i> , 2020)	700 °C	1 h
(SANTOS, F. P. Dos, 2016)	445 °C	12 h
(GERALDO, Rodrigo Henrique, 2016)	800 °C	1 h
(HAGEMANN <i>et al.</i> , 2019)	700 °C	1 h
(GODOY <i>et al.</i> , 2019)	600 °C	1 h
(FERONE <i>et al.</i> , 2019)	650 °C	1 h
(MESSINA <i>et al.</i> , 2017)	750 °C	2 h
(HE; JIA, 2013)	800 °C	1 h
(WAIJAREAN <i>et al.</i> , 2014)	800 °C	1 h
(PAIXÃO, L. C. C. <i>et al.</i> , 2008)	1000 °C	3 h
(OLIVEIRA, E. A. De; LEITE, 2018)	900 °C	3 h

### 3.7 FATORES DO PREPARO DA SOLUÇÃO ATIVADORA DO GEOPOLÍMERO

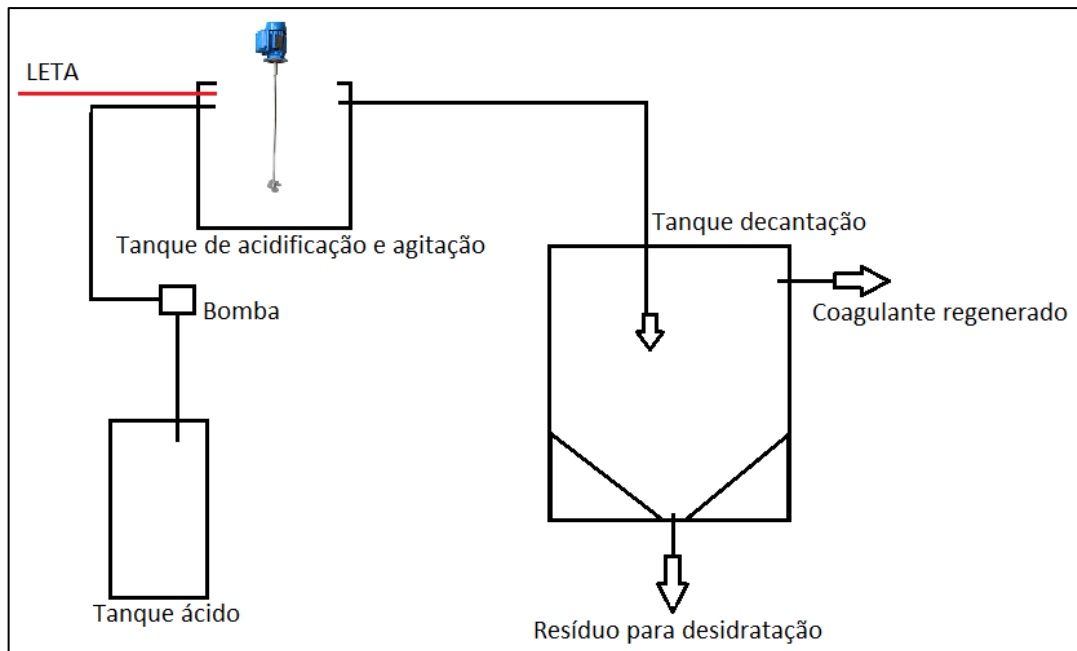
Três fatores são considerados para determinar a composição e mistura: O modulo de sílica/alumina é um parâmetro determinante na união das partículas do precursor, este parâmetro leva em conta a quantidade de sílica, ferro e alumina presente no precursor, cabe ressaltar que estes valores se alteram de acordo com o

tipo e as origens de cada material sendo básico para diferenciá-los. O módulo de sílica/sódio é a relação que defini a proporção da mistura entre os ativadores, o silicato de sódio atua como fonte de sódio e sílica solúvel já o hidróxido de sódio é uma fonte complementar de sódio, a correta dosagem providenciara as proporções básicas para a formação do aluminossilicatos de sódio (NASH). E a Razão líquido/sólido é um parâmetro que realiza a combinação do precursor que é considerado parte do sólido e o ativador que é a principal fonte do líquido, o aumento nesta razão acarreta na melhora da trabalhabilidade da pasta, mas causa um aumento na porosidade e o surgimento de eflorescência reduzindo drasticamente a resistência do material, por outro lado a redução deste parâmetro produz um material de difícil trabalhabilidade, o que dificulta o adensamento e acaba gerando defeitos na moldagem, porém ocorre um ganho na resistência a compressão e redução na formação de eflorescência. Desta forma é necessário encontrar um ponto de equilíbrio na relação (DE OLIVEIRA, 2018), baseado em (POUHET; CYR; BUCHER, 2019) que indicam em suas análises valores na faixa de 0,4 a 0,56 (ALVARENGA, 2018; LONGHI, 2015).

### 3.8 TRATAMENTO ÁCIDO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

O processo de acidificação do LETA é aplicado na recuperação do coagulante, utiliza-se em sua maioria o ácido sulfúrico como acidificante (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016; DE OLIVEIRA, A. B. *et al.*, 2017; FREITAS, J. G. De; FERREIRA FILHO; PIVELI, 2005; FREITAS, V. O. *et al.*, 2016; MARASCHIN; HEDLUND FERRARI; CARISSIMI, 2020). O processo de acidificação do LETA para recuperação do coagulante como visto na Figura 11, é utilizado na recuperação do Alumínio ( $Al_2O_3$ ) onde é possível atingir taxas de recuperação da ordem de 70 a 75 %, dependendo do tempo em que a mistura e da concentração do ácido aplicado. Este processo, além de recuperar o coagulante reduz o volume do LETA em aproximadamente 79 %, pois extrai a água que está ligada aos hidróxidos metálicos (GUTIÉRREZ-ROSETO *et al.*, 2014; WESTERHOFF; DALY, 1974).

Figura 9: Processo de acidificação do LETA para recuperação do coagulante.



Fonte: Adaptado de (WESTERHOFF; DALY, 1974)

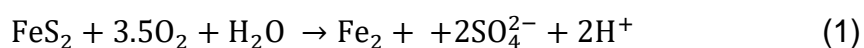
As maiores dificuldades estão no custo do ácido que é aplicado, pois para transformar 1g de Alumínio ( $Al^{3+}$ ) em hidróxido de alumínio, é necessário o uso de 5g de Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), pois o valor do ácido comercial torna quase inviável a recuperação (STENDAHL *et al.*, 2006; XU *et al.*, 2009).

### 3.9 DRENAGEM ACIDA DE MINAS

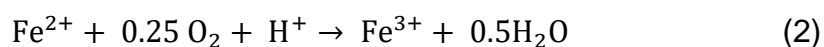
O carvão mineral é resultante de acúmulo de restos de plantas em ambiente aquático, e com o passar do tempo e o soterramento destes depósitos por materiais minerais, o aumento da pressão, a temperatura e a ação de microrganismos anaeróbios, concentrou o carbono e reduziu o nível de oxigênio e hidrogênio. Este processo consecutivo é denominado de grau de carbonificação (COLLING, 2010). O carvão mineral é integrante da matriz energética do Brasil, a maior parcela do carvão extraído está localizado no solo de Santa Catarina com um montante de 3,3 bilhões de toneladas, seguido do Rio Grande do Sul com 28 bilhões de toneladas e Paraná com 104 milhões de toneladas (ABCM, 2020). Os resíduos da extração são divididos em dois grupos: Os estéreis que é o material removido das camadas superficiais para poder ter acesso ao minério; e o rejeito este proveniente do beneficiamento do carvão, este contendo um mineral chamado pirita, composto de sulfeto de ferro ( $FeS_2$ ). É estimado que no intervalo compreendido de 1925 até 2010, o Brasil já extraiu cerca

de 550 milhões de toneladas de carvão mineral e uma massa de rejeito é estimada em 320 milhões de toneladas. Para ambos os resíduos, se forem dispostos inadequadamente poderão vir a causar danos de grande monta ao meio ambiente da região (FILHO, 2014).

A drenagem ácida de minas (DAM) é um processo que surge quando a Pirita entra em contato com a água e o oxigênio presente na atmosfera produzindo  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$  como mostra a equação 1, esta reação divide-se em duas etapas, primeiro a produção de ácido sulfúrico e sulfato ferroso e segundo a produção de sulfato férrico e mais ácido sulfúrico (DOLD, 2014; MCCARTHY, 2011; ROYCHOWDHURY; SARKAR; DATTA, 2015).



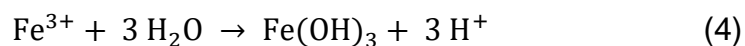
Os íons  $\text{Fe}^{2+}$  que são produzidos acabam reagindo com o  $\text{O}_2$ , e assim forma o  $\text{Fe}^{3+}$  como mostra a equação 2, esta reação começa a acelerar devido as bactérias oxidantes de enxofre (*Acidithiobacillus ferrooxidans*), isto ocorre pelo fato das bactérias utilizarem a energia que é produzida pela reação no seu metabolismo (DOLD, 2014; ROYCHOWDHURY; SARKAR; DATTA, 2015).



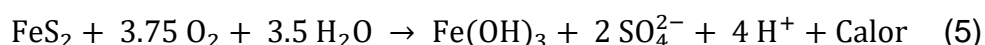
A partir do  $\text{Fe}^{3+}$ , a oxidação da Pirita é elevada para formação dos íons  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{H}^+$  como mostra a equação 3.



A taxa abiótica de oxidação da Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) é maior pelo  $\text{Fe}^{3+}$ , do que pela ação da água e do oxigênio. Com a produção do íon  $\text{H}^+$ , o pH da solução é reduzida e torna-se altamente ácida, mas se o pH estiver entre 3,5 e 4, o  $\text{Fe}^{3+}$  acaba precipitando na forma de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , como mostra a equação 4 (DOLD, 2014; ROYCHOWDHURY; SARKAR; DATTA, 2015).



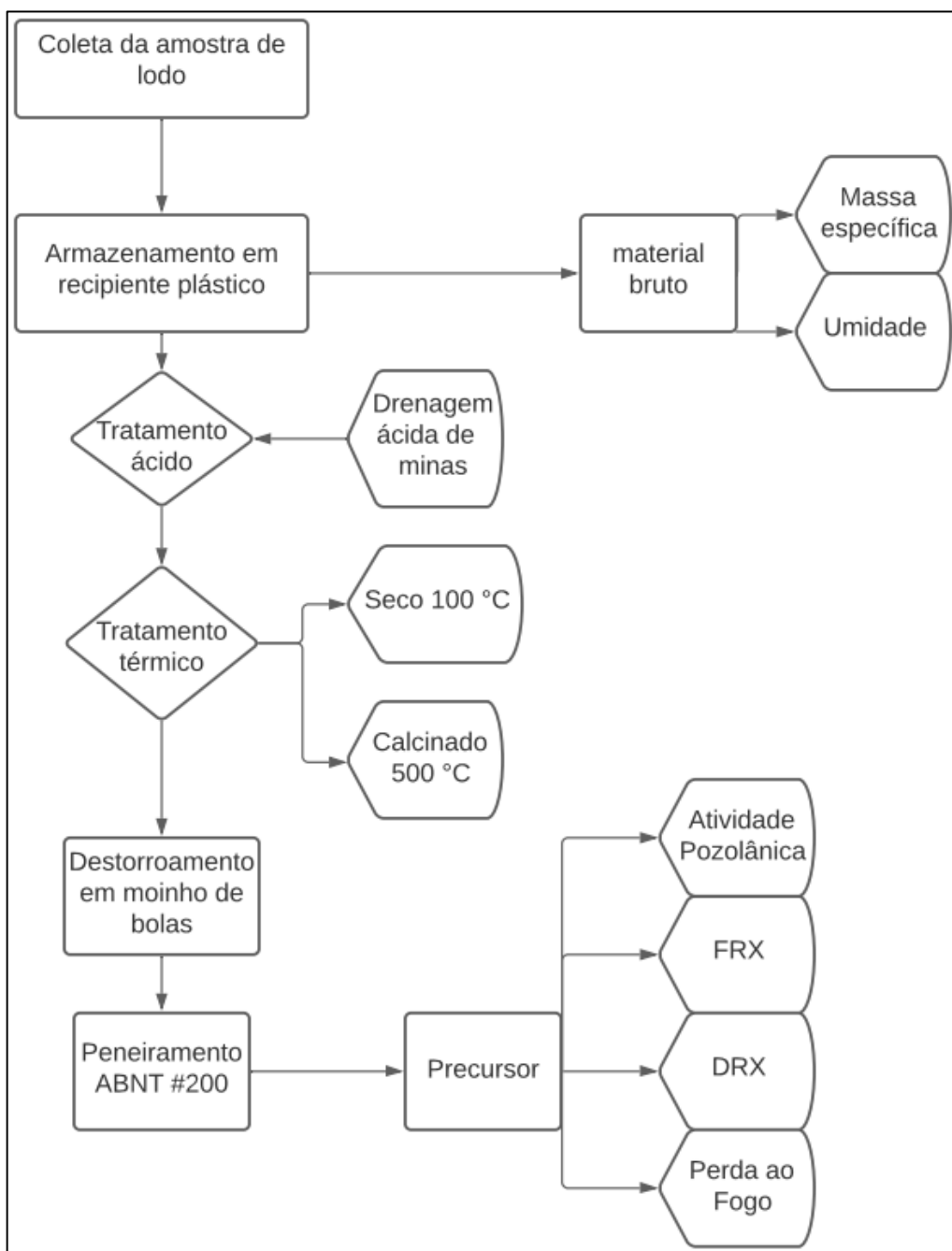
A reação da oxidação da Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) pode ser expressa como na equação 5 (DOLD, 2014; ROYCHOWDHURY; SARKAR; DATTA, 2015).



#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

O programa experimental desta pesquisa é apresentado na Figura 12, o processo foi desenvolvido para avaliar se o lodo de estação de tratamento de água (LETA) após passar por lavagem ácida e tratamento térmico nas temperaturas de 100 °C e 500 °C, pode alterar as qualidades do material possibilitando sua utilização como precursor de materiais geopoliméricos.

Figura 10:Preparação do precursor de lodo.



#### 4.1 SOLUÇÃO ATIVADORA

##### **Silicato de sódio**

Foi utilizado silicato de sódio do tipo C-112 com a densidade de 1,7 g/cm<sup>3</sup> (25 °C), 15 % de Na<sub>2</sub>O, 32,25 % de SiO<sub>2</sub> e 52,75 % é o teor de água na mistura, a relação sílica/sódio de 2,15 a 2,40 e viscosidade mínima de 900 cP, sendo utilizado para a mistura em conjunto do hidróxido de sódio para fazer a ativação do material.

##### **Hidróxido de sódio**

Foi utilizado o hidróxido de sódio comercial da marca SODABEL 99%, em escamas com densidade entre 1,5393 g/cm<sup>3</sup> (15,5 °C).

#### 4.2 PRECURSOR COMERCIAL - METACAILIM

Foi utilizado o Metacaulim HP ultra da empresa Metacaulim do Brasil, cujo propriedades físico-química são apresentadas pela própria empresa como mostra o Quadro 13.

Quadro 13: Propriedades físico-químicas metacaulim HP ultra.

Propriedades físico-química	Valores típicos							Valores limites (NBR 15.894)		
SiO <sub>2</sub>	57%							44% a 65%		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34%							32% a 46%		
CaO + MgO	<0,1%							<1,5%		
SO <sub>3</sub>	<0,1%							<1%		
Na <sub>2</sub> O	<0,1%							<0,5%		
Eq. Alcalino Na <sub>2</sub> O	<1,5%							<1,5%		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2%							-		
TiO <sub>2</sub>	1,5%							-		
Umidade	0,5%							<2%		
FRX - (KORF, 2019a)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Total
	65,57	25,77	1,49	2,14	0,01	0,51	2,13	0,03	2,35	100



### 4.3 PRECURSOR PREPARADO A PARTIR DO LETA

O LETA utilizado nesta pesquisa foi produzido pelo tratamento da água coletada em um manancial superficial, localizada na cidade de Passo Fundo/RS, e destina-se ao abastecimento público da cidade. Nesta unidade, o LETA resultante do processo de tratamento da água é disposto em leito de secagem como visto na Figura 13 sofrendo desague natural, que após secagem o material é coletado e enviado a aterro de resíduos industriais, o sistema de desague é formado por dois leitos de secagem com capacidade de 2.830 m<sup>3</sup> de resíduo em cada tanque, o ciclo de desague do lodo até seu descarte leva, aproximadamente, 60 dias.

Figura 11:Leito de secagem



Fonte: Autor, (2020).

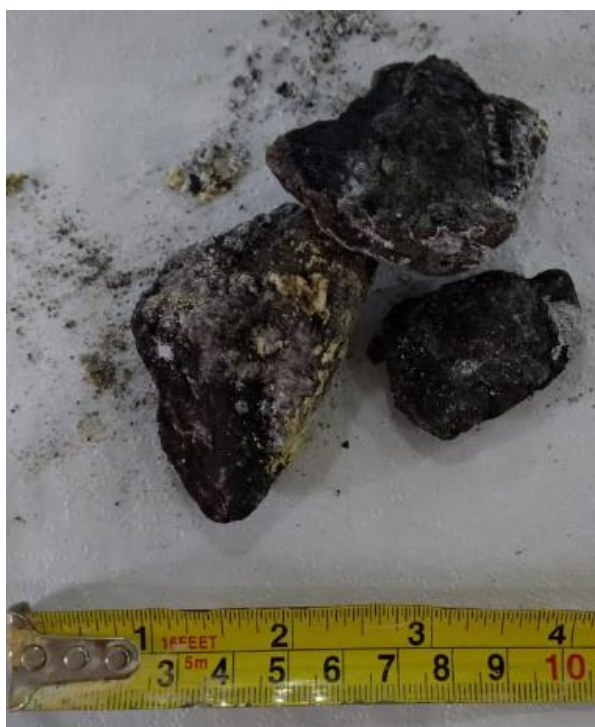
O leito de secagem é construído em concreto, com as paredes inclinadas para que o excesso de água seja direcionado para o centro, e desta forma é onde tem-se o maior nível de umidade, há uma rampa para facilitar seu manuseio para limpeza.

O resíduo foi coletado no leito de secagem da ETA III, de sistema de tratamento automatizado, de ciclo completo operada pela Companhia Riograndense de Saneamento – CORSAN/RS, sendo retirado uma porção de 120 kg, após armazenado em sacos plásticos duplos e posterior acondicionados em baldes de PVC hermeticamente fechados, para manter as características. O material foi estocado no laboratório da IMED protegido de sofrer com intempéries climáticas.

#### 4.4 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO ÁCIDA

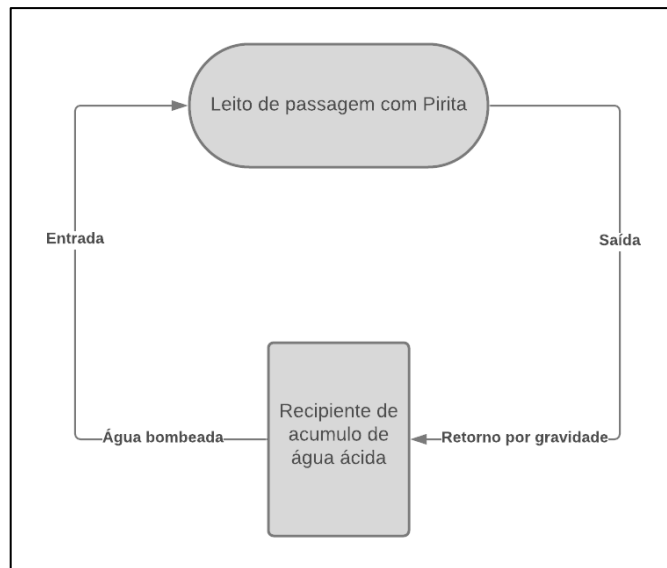
Para obtenção da solução ácida, foi utilizado rejeito piritoso proveniente de uma jazida do Paraná, a Figura 14 mostra um fragmento da Pirita utilizada, ainda no estado bruto. Para a produção da solução ácida, o material foi lavado para remoção dos resíduos de carvão aderidos no mineral.

Figura 12: Fragmentos de Pirita.



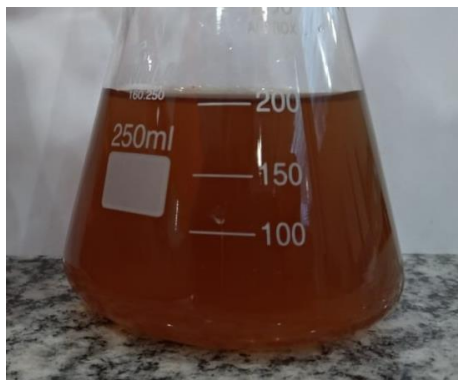
O sistema foi montado utilizando um recipiente retangular de plástico (PEAD) nas dimensões de 56 x 40 cm e altura de 15 cm, constituindo um leito com rejeito piritoso com altura de 5 cm, neste leito foi instalado uma saída, ligada a um sistema pulmão com 50 L de água, para fazer a recirculação, foi utilizado 2 bombas, Sarlo Better, modelo Mini A, com vazão de 60 a 170 L/h funcionando 24 h, o retorno acontecia por gravidade. O sistema trabalhava de forma cíclica como mostra a Figura 15, o tempo de lixiviação de cada lote de solução ácida foi estabelecido baseando-se nos estudos de (DE OLIVEIRA, L. N. *et al.*, 2019; SILVA, R. de A. *et al.*, 2017) e determinado em 4 semanas.

Figura 13: Sistema de geração da Drenagem Ácida de Minas (DAM).



Ao final de 4 semanas o pH desta solução ficou na faixa de 1,5, tornando a água de circulação uma lixívia extremamente ácida (DAM-controlada), com teores de ferro (Fe) 0,78 g/L e de alumínio (Al) de 0,24 g/L, o sistema foi projetado para produzir 22 L de solução ácida por batelada. A Figura 16 mostra o aspecto da solução preparada no sistema.

Figura 14: Amostra Drenagem Ácida de Minas.

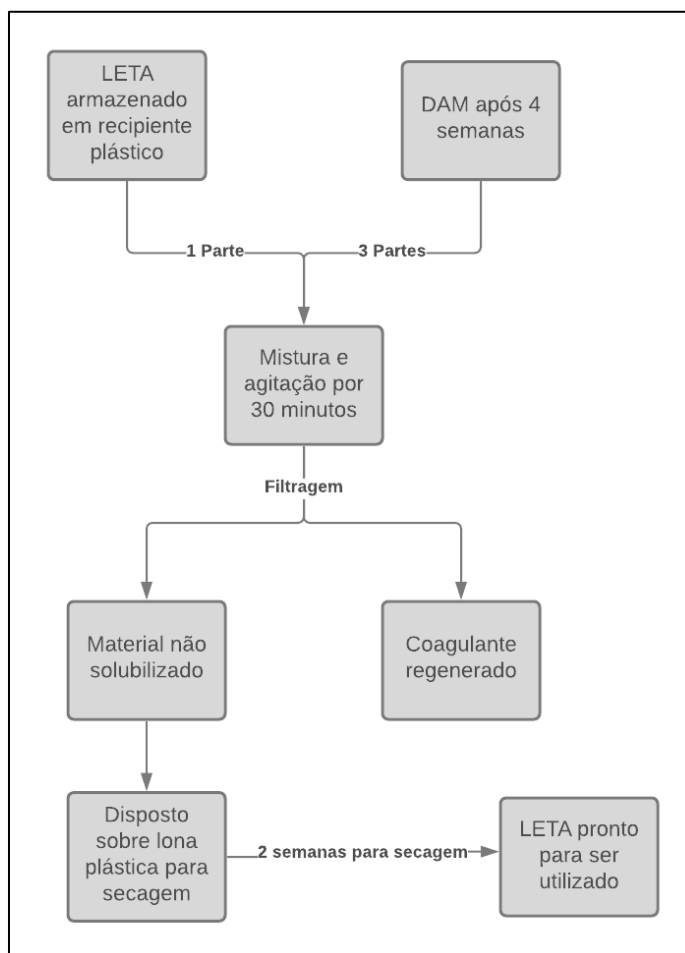


#### 4.5 PREPARAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA).

O LETA coletado passou por processo de acidificação com a drenagem ácida de minas (DAM), visando a recuperação do coagulante, onde ocorre a adição de um ácido ao resíduo para que a mistura atinja um pH menor que 3,5 dessa forma ocorre

a solubilização do coagulante (sulfato de alumínio) como mostra a Figura 17, a melhor proporção foi de 3 partes de ácido para 1 parte de lodo.

Figura 15: Diagrama de acidificação e preparo do lodo de estação de tratamento de água (LETA)



Foram recuperados 3,79 L de coagulante/ kg de lodo, e a parte insolúvel, foco do trabalho removido por filtração para posterior processamento.

Para acelerar a desidratação do LETA recuperado foi espalhado sobre uma lona plástica como mostra a Figura 18, para secagem, que após foi destorrado e cominuído em moinho de bolas para reduzir a granulometria das partículas, abaixo da malha 0,075mm (ABNT #200).

Figura 16:Leito de secagem do lodo não solubilizado.



#### 4.6 PREPARO DO PRECURSOR DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) ACIDIFICADO.

Para determinar o melhor tratamento térmico foi realizado um experimento com 4 níveis de temperatura, onde a variável resposta analisada foi a atividade pozolânica, avaliada pelo ensaio de Chappelle modificado seguindo a norma ABNT 15.895/2010. Os resultados indicaram a maior reatividade para amostras calcinadas na temperatura de 500° C, e assim obtendo-se resultados com uma temperatura abaixo do que a literatura indica (DA COSTA, 2014; GOYAL *et al.*, 2019; PAIXÃO, L. C. C. *et al.*, 2008; PAIXÃO, Luiz Carlos Cardoso, 2005; SANTOS, G Z B; FILHO; MANZATO, 2018; VIEIRA, C.M.F., MARGEM, J.I., MONTEIRO, 2008), entretanto cabe salientar que o lodo aqui testado foi acidificado com a solução ácida da DAM-controlada.

Após a definição das temperaturas a serem testadas, o material seco ao ambiente foi classificado passante na peneira 0,075 mm e dividido, uma foi seca a 100

°C, e outra foi calcinada na temperatura de 500 °C, após o sólido foi armazenado para os testes de caracterização e preparação do material geopolimérico.

#### 4.7 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL PRECURSOR

Devido ao material ter características de grande variabilidade decorrente do manancial em que ocorre a captação da água, foi necessário caracterizar o LETA gerado. Para isto foi realizado os ensaios descritos no Quadro 14, no material Bruto, seco a 100 °C e calcinado a 500 °C. Devido ao alto teor de matéria orgânica a análise de fluorescência de raios X (FRX) para determinação da composição química foi realizada na amostra tratada a 500°C.

Quadro 14: Matrix experimental para a caracterização do lodo de estação de tratamento de água (LETA)

Análises	Lodo		
	Solubilizado com DAM		
	Úmido	100 °C	500 °C
Massa específica	x		
Umidade	x		
Atividade pozolânica		x	x
FRX			x
DRX		x	x

O ensaio de massa específica seguiu os procedimentos estabelecidos na NBR 6458 (ABNT, 2016) e consiste na utilização de um picnômetro com volume aferido, a quantificação baseia-se na diferença de massa em comparação com a água, em temperatura controlada que relaciona sua massa com seu volume (DAER, 2001).

A umidade do LETA também foi determinada por gravimetria em relação a massa de água evaporada por aquecimento em estufa, o teor de umidade foi determinado pelo método 2540 B Standard Methods, (Eaton et al 2005), onde a amostra é colocada em um recipiente previamente pesado, a mostra é desidratada em temperatura de 103 a 105 °C, até massa constante. O incremento do peso sobre o peso do recipiente vazio representa o teor de sólidos da amostra.

A identificação das fases mineralógicas formadas foi através da técnica de Difração de raios X (DRX), com base na norma americana E1621 (ASTM, 2013). O resultado foi obtido através das observações dos ângulos e intensidade de difração do feixe pelos átomos presentes no cristal e foi utilizado para identificar as fases de

um material cristalino. A análise será feita pelo laboratório localizado na Universidade Regional Integrada – URI Erechim/RS, com um equipamento da marca Rigaku modelo Mini flex II. O Difratoograma foi interpretado com auxílio do Software HighScorePlus.

A composição química do LETA foi determinada pela técnica de Fluorescência de raios X (FRX), a técnica seguiu as determinações da normativa E 1621 (ASTM, 2013) e D5381 (ASTM, 2014) (ASTM, 2014). Para o ensaio foi utilizado um equipamento da marca Panalytical modelo MiniPal 4, realizado no Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica (CPGq) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Para determinação da Atividade Pozolânica, baseou-se no ensaio descrito pela norma NBR 15895 (ABNT, 2010), em que foi colocado a amostra do material junto com óxido de cálcio (CaO) em Erlenmeyer e adicionar água destilada. Colocar em banho-maria na temperatura de 90 °C pelo período de 16 h. Após resfriado é adicionado de solução de sacarose, e agitado pelo período de 15 min. Por fim é filtrado o material e titulado com solução de ácido clorídrico (HCl), como indicador é usado solução fenolftaleína.

As frações solúveis de Ferro (Fe) e Alumínio (Al) na amostra foram quantificadas através da digestão com ácido clorídrico, em que colocou-se o LETA calcinado e a solução de ácido clorídrico em Erlenmeyer, sendo deixado em banho-maria por 1 hora a 90°C. Após o material foi resfriado e realizada a filtração em papel filtro. O material passante pelo filtro foi colocado em balão volumétrico e completado com água destilada. A leitura foi feita em aparelho de espectrofotometria da marca Merck modelo SQ118 para a leitura, os reagentes utilizados foram da marca Alfacit, para ferro total e alumínio. Desta forma, é possível quantificar os teores de alumina presente na amostra é solúvel.

#### 4.8 PREPARAÇÃO DA DOSAGEM

Para a elaboração do ativador foi utilizado uma mistura de dois compostos alcalinos, o silicato de sódio e o hidróxido de sódio, o uso destes dois componentes para elaboração da solução ativadora é recomendada pela literatura (DE OLIVEIRA, 2018; SANTA, 2012; LONGHI, 2015). O hidróxido de sódio utilizado é em escamas com 99% de pureza, este material foi dissolvido em água, formando uma solução 12

molares, a fim de garantir a completa reação, a mistura foi mantida em descanso por 30 minutos antes da mistura com o silicato de sódio.

#### 4.9 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do trabalho foi feito um planejamento experimental Quadro 15, utilizando o software Minitab 16, onde foram escolhidos três fatores: O primeiro é taxa de substituição, em massa de metacaulim/LETA com 4 níveis de variação. O segundo fator é o tratamento térmico nas temperaturas de 100 e 500 °C, mostrados no Quadro 8, e o terceiro fator é o tempo de cura que foi em 7, 14 e 28 dias, salienta-se que todos os testes foram executados em triplicata, totalizando 72 Corpos de Prova (CPs). As temperaturas do tratamento térmico foram estipuladas experimentalmente, como descritos no item 4.6

Quadro 15: Variáveis do programa experimental.

Ordem	Substituição (%)		Tratamento ácido	Tratamento térmico (°C)
	Precursor	Metacaulim		
1	0	100	sim	100
2	0	100	sim	500
3	25	75	sim	100
4	25	75	sim	500
5	50	50	sim	100
6	50	50	sim	500
7	75	25	sim	100
8	75	25	sim	500

Para parâmetros de resposta foram avaliados a resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, a densidade, índice de vazios e absorção de água foram avaliados aos 28 dias. Após preparados os CPs foram acondicionados em potes plásticos até as idades estabelecidas para posterior ensaio.

Para estabelecer qual a melhor razão líquido/sólido foi realizado um estudo experimental para as substituições de LETA pelo metacaulim 0, 25, 50, 75%, levando em consideração a formação ou não da pasta na mistura, avaliando a qual mistura apresentava melhor característica plástica para o módulo de sílica de 0,5 e para a razão líquido/sólido 0,31, 0,4 e 0,45, como mostra o Quadro 16. A partir do experimento pode-se determinar que a melhor razão líquido/sólido foi de 0,4, onde consegue-se a formação da pasta com um volume menor de água, pois quantidades



excessiva podem estar relacionadas com surgimento da eflorescência e até redução na resistência do material, por este motivo não foi considerado o uso da relação com valor de 0,45.

Quadro 16: Teste para determinação do modulo de sílica e a razão líquido/sólido.

Experimento	Modulo de sílica (Ms)	Razão Líquido/sólido (L/S)	Substituição metacaulim (%)	Formação da pasta	
				100 °C	500 °C
1	0,5	0,31	0	Sim	
2	0,5	0,31	25	Não	Não
3	0,5	0,31	50	Não	Não
4	0,5	0,31	75	Não	Não
5	0,5	0,40	0	Sim	
6	0,5	0,40	25	Sim	Sim
7	0,5	0,40	50	Não	Sim
8	0,5	0,40	75	Não	Sim
9	0,5	0,45	0	Sim	
10	0,5	0,45	25	Sim	Sim
11	0,5	0,45	50	Não	Sim
12	0,5	0,45	75	Não	Sim

A quantidade de material necessário a formulação dos CPs, bem como sua proporção mássica estão descritos no Quadro 17, tendo fixado o Ms em 0,5 e a relação líquido/sólido em 0,4.

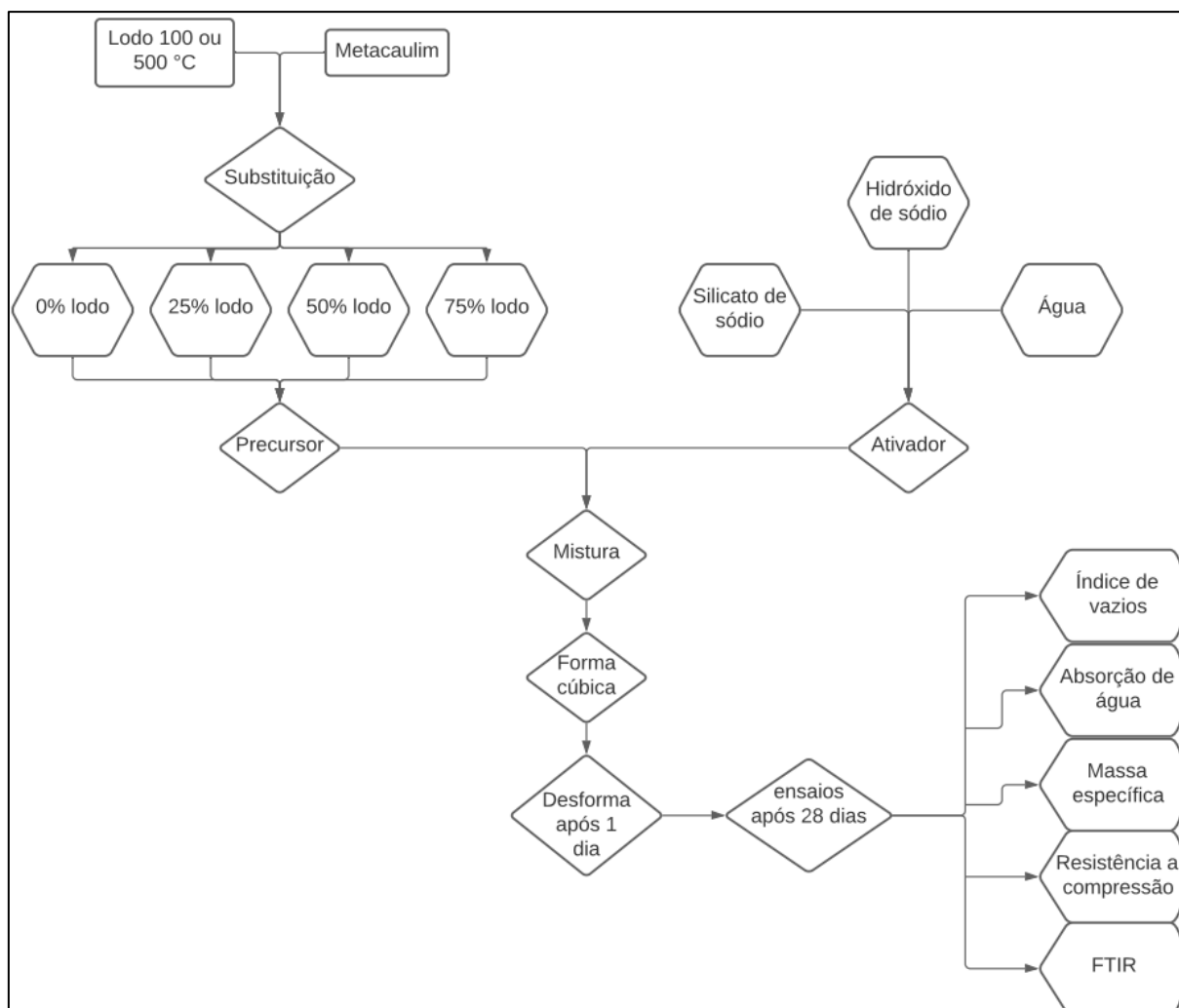
Quadro 17: Proporção de material.

Substituição LETA (%)	Modulo de sílica (Ms)	Razão Líquido/sólido (L/S)	Precursor (g)		Silicato de sódio (g)	Hidróxido de sódio (g)	Água
			LETA	Metacaulim	Na <sub>2</sub> O(SiO <sub>2</sub> )	NaOH	H <sub>2</sub> O
0	0,5	0,4	0	70	8,62	12,46	35,76
25	0,5	0,4	17,5	52,5	8,62	12,46	35,76
50	0,5	0,4	35	35	8,62	12,46	35,76
75	0,5	0,4	52,5	17,5	8,62	12,46	35,76

#### 4.10 PREPARO DO GEOPOLÍMERO

Foi utilizada 4 variações para a mistura do precursor (LETA 100 e 500 °C), onde a proporção de substituição foi em relação a massa de metacaulim, como mostra a Figura 19.

Figura 17: Roteiro da mistura do geopolímero.



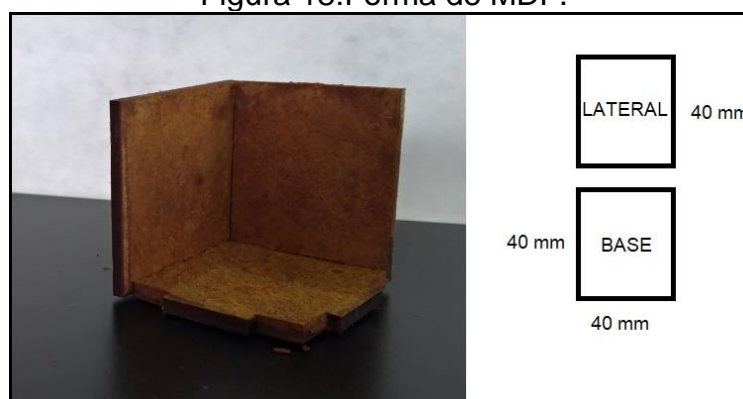
A preparação do ativador foi modulada para a razão líquido/sólido (L/S) de 0,4 e o módulo de sílica/alumina (MS) será de 0,5. A literatura (CONCEIÇÃO, 2019; CRIADO; PALOMO; FERNANDEZJIMENEZ, 2005; LONGHI, 2015) indica valores utilizáveis de MS na faixa de 0,19 a 1,17 e da razão L/S na faixa de 0,35 a 0,45. O ativador alcalino foi composto pela mistura do Hidróxido de sódio (NaOH), o Silicato de Sódio comercial do tipo C-112 e água. Todos os materiais foram preparados em capela de exaustão em banho gelado devido ao aquecimento e liberação de gases e vapores tóxicos, após a mistura permaneceu em repouso até que atingisse a temperatura ambiente.

O sistema líquido (silicato de sódio + solução de hidróxido de sódio) foi mensurado e reservado em recipiente plástico, esta mistura compõem o ativador do processo.

O sistema chamado de precursor, composto de Metacaulim/LETA acidificado, nas suas variadas proporções também foram mensurados e reservados em recipiente próprio, para posterior preparação da pasta. A pasta foi preparada por agitação manual. Após a pasta formada foi colocada em moldes para formação dos corpos de prova (CP). Chama-se a atenção para o rápido endurecimento da mistura, onde já ganha resistência mecânica após 5 minutos de repouso.

Inicialmente foi projetado a confecção do corpos de prova segundo a NBR 5738 (ABNT,2015), contudo, optou-se por seguir os trabalhos de (MATOS, 2018; TORRAL; JALALI, 2010; YUNSHENG *et al.*, 2007), que adotaram as medidas de 40x40x40 mm como mostra a Figura 20, em função do número de CPs e com a dificuldade na preparação dos materiais. As formas foram confeccionadas em painéis MDF, com espessura 4 mm. A desforma dos CPs foram realizadas após 24 de cura.

Figura 18: Forma de MDF.



#### 4.11 CARACTERIZAÇÃO DO GEOPOLÍMERO

Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica seguiram as orientações da NBR 9778 (ABNT, 2005) , o ensaio consiste em imersão do corpo de prova, previamente seco e pesado, em água, para que ocorra o preenchimento dos poros do material. Assim são determinados a massa seca ( $M_s$ ) e a massa saturada ( $M_{sat}$ ), as quais por relações matemáticas permitem a quantificações da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

A Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier – FTIR, é uma técnica utilizada para identificar compostos orgânicos, em uma ampla faixa de materiais sejam eles sólidos, líquidos, pós ou géis. É uma técnica que se baseia nas

frequências de vibrações que ocorrem nas ligações do interior de uma molécula, isto ocorre através da passagem de um feixe de radiação infravermelha em uma amostra, determinando a fração de radiação que é absorvida em determinada faixa de comprimento de onda, a maioria dos materiais tem esta faixa de absorção entre 400 e 4.000  $\text{cm}^{-1}$  (SCHERER, 2011; THOMPSON; GAUTHIER; ISLAM, 2009).

O ensaio de resistência a compressão seguiu como referência as normas NBR 5738 (ABNT, 2015), NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7215 (ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2019). A técnica consiste em moldar o corpo de prova, após o período de cura, é realizado o ensaio de resistência a compressão com uso de uma prensa hidráulica, o resultado é expresso em Mega Pascal (MPa).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

#### 5.1.1 Massa específica

O resultado do ensaio de caracterização para massa específica do LETA está consolidado no Quadro 18, para a temperatura de 100 e 500 °C, com e sem acidificação, os valores são referentes a médias de triplicatas.

Quadro 18: Massa específica das amostras do lodo de estação de tratamento de água (LETA).

Amostras	Temperatura (°C)	Massa específica média (g/cm <sup>3</sup> )
LETA in natura	100	1,95
	500	2,43
LETA lixiviado com DAM	100	2,31
	500	2,39
Metacaulim HP ULTRA	700	2,60

Para avaliar o uso da DAM nas características físicas do LETA foram comparados os valores das massas específicas nas temperaturas de 100 e 500°C. Desta forma foi possível verificar que a lavagem ácida com DAM na temperatura de 100 °C acarretou um acréscimo de 15%, como a DAM melhora a remoção da água intersticial aderida nas partículas do LETA, e acrescentou cerca de 57% Ferro (Fe) no material, além da remoção de parte da matéria orgânica, sendo assim justificado esse aumento. Já quando comparado as temperaturas de 500 °C houve um decréscimo desprezível de 0,02%, estando dentro da variabilidade da análise. Os valores obtidos no ensaio ficam dentro do intervalo de resultados obtidos na literatura (BUSELATTO *et al.*, 2019; COELHO, R. V. *et al.*, 2015; FERNANDEZ *et al.*, 2018; GONÇALVES *et al.*, 2017; TAFAREL *et al.*, 2016) com que variam entre 0,85 até 2,75 para o lodo de estação de tratamento de água, de mesma forma as amostras de LETA estão abaixo da massa específica do metacaulim de 2,60, resultado fornecido pela (METACAULIM

DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, 2011) na ficha de informação e segurança de produto químico (FISPQ).

### 5.1.2 Umidade

Os resultados de umidade obtidos dos ensaios ficam próximos em ambas as parcelas. Salienta-se aqui que a amostra do LETA *in natura* tem a umidade média de 74,9 %, para o lodo coletado no leito de secagem. Já para a amostra solubilizada com a DAM, o lodo foi filtrado em papel filtro e estabelecido o critério de 24 horas após o final da filtração para a coleta da amostra e verificação da umidade residual, este valor médio foi de 79,9 %, os resultados brutos são mostrados no Apêndice C, a literatura (BUSELATTO *et al.*, 2019; FERNANDEZ *et al.*, 2018; TAFAREL *et al.*, 2016) traz valores de umidade para o LETA na faixa de 76,37% até 87,4%, após o leito de secagem.

### 5.1.3 Perda ao fogo

Após avaliar o resultado do ensaio de perda ao fogo, foi possível comparar os resultados entre o LETA *in natura* e solubilizado com DAM. A perda ao fogo de 40,9% para o lodo Acidificado e 34,6% para o lodo *in natura*. A partir do resultado encontrado é possível afirmar que o tratamento ácido, altera a composição do LETA, adicionando substâncias que degradam em temperatura mais elevada, possivelmente o sulfato, porém a literatura (FERNANDEZ; MIKOWSKI, 2016; SILVA *et al.*, 2019) tem apontado que a perda ao fogo para lodo de ETA encontra-se entre 20 a 50%, dependendo da característica da água de entrada. Os efeitos esperados que o ácido produz no LETA baseia-se na destruição da rede de coagulação, solubilização do Alumínio e liberando água como produto desta reação. As mudanças também podem estar associadas a um novo equilíbrio na composição pela solubilização e precipitação das espécies Al, Fe, sulfato entre outros, o Quadro 19 apresenta os resultados das análises de perda ao fogo, juntamente com informações da literatura que reforçam a discussão apresentada.

Quadro 19: Resultado ensaio de perda ao fogo do lodo de estação de tratamento de água (LETA) acidificado.

Origem do resultado	Perda ao fogo (%)
LETA in natura	34,56
LETA acidificado	40,86
(TARTARI <i>et al.</i> , 2011)	20,04
(WOLFF <i>et al.</i> , 2007)	17,1
(LAURINDO <i>et al.</i> , 2020)	28,50
(PORTELA <i>et al.</i> , 2003)	50,06

#### 5.1.4 Fluorescência de raio – X (FRX)

Ao analisar o efeito na mudança da composição no LETA, pela acidificação com a DAM, as mudanças são mais pronunciadas para Óxido de Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o Óxido de Alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Óxido de Silício ( $\text{SiO}_2$ ), devido a remoção do alumínio, e inclusão do ferro na parte insolúvel, invertendo a relação mássica (ALEXANDRE; LUZ, 2020; FERNANDEZ *et al.*, 2018; LAURINDO *et al.*, 2020; MONTALVAN, 2016; PETTERLE *et al.*, 2018; RUVIARO *et al.*, 2020; SANTOS; SILVA; SILVA, 2016; SANTOS; MELO FILHO; MANZATO, 2018; SILVA; MACIEL, 2019), esta inversão pode influenciar na formação do material geopolimérico, pois alterou módulo de Si/Al uma vez que esta relação é dada por  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ , de 1,11 para 0,63, deixando este valor ainda mais distante do valor para o Metacaulim HP Ultra de 2,34. O Quadro 20, apresenta as composições dos lodos sem e com acidificação, e a comparação dos valores da literatura.

Quadro 20: Resultado Fluorescência de Raio - X (FRX)

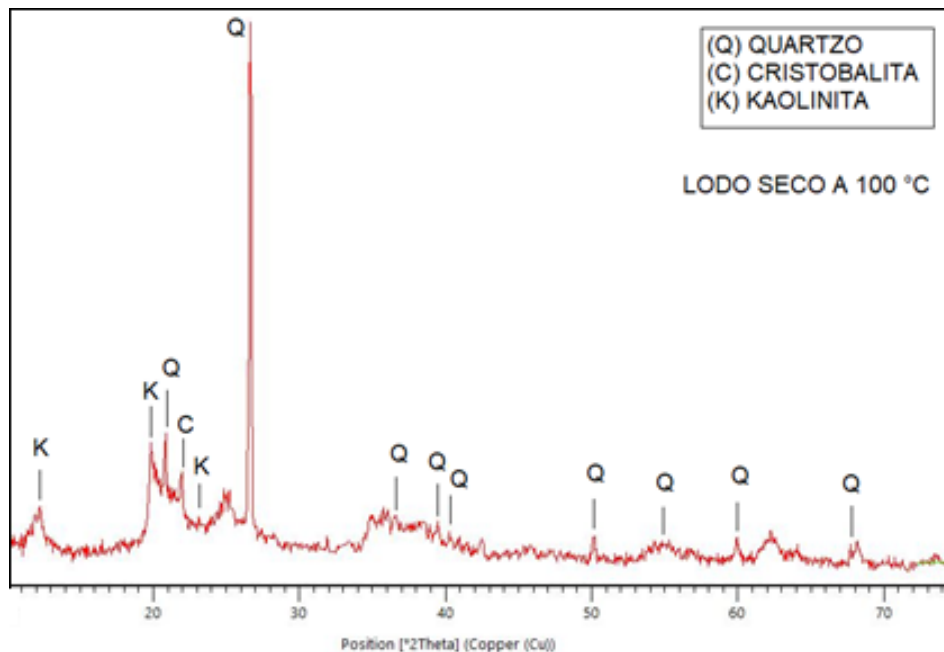
Amostra	Componentes (%)								Razão molar Si <sub>2</sub> O/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Outros	
Metacaulim (KORF, 2019a)	65,57	2,14	25,77	1,49	0	2,13	0,03	2,87	2,34
Lodo calcinado 500°C não Acidificado	50,26	14,47	30,66	1,37	0,41	0,38	0,57	1,88	1,11
Lodo calcinado 500°C Acidificado	36,08	33,66	23,01	1,59	1,16	0,38	0,31	3,81	0,63
(ALEXANDRE; LUZ, 2020)	24,2	19,3	25,8	2,9	0,6	0,2	0,4	26,6	0,53
(SILVA <i>et al.</i> , 2019)	27,67	12,06	22,75	0,65	0,27	1,11	0,62	34,47	0,79
(WAIJAREAN; ASAVAPISIT; SOMBATSOMPOP, 2014)	53,70	9,56	30,10	0,87	0,98	2,49	0,35	1,95	1,35

### 5.1.5 Difração de raio – X (DRX)

No Difratoograma do LETA seco a 100°C mostrado na Figura 21, é possível ver uma predominância do mineral Quartzo (Q) na banda entre 30 e 70°, com um grande pico em 26°. Outras recorrências menores do mineral Kaolinita (K) entre 12 e 22°. A literatura (SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO; MANZATO, 2018) apresenta fases cristalinas do LETA seco, sendo detectado o Quartzo, o Rutilo, a Caulinita e a Cristobalita, em bandas muito próximas as apresentadas na Figura 21.

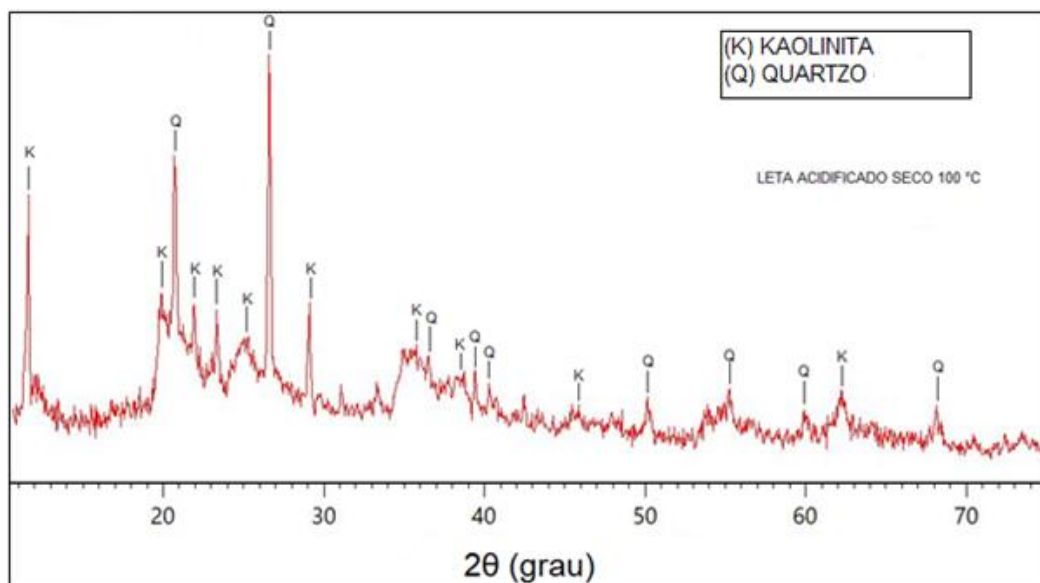


Figura 19: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água seco a 100 °C.



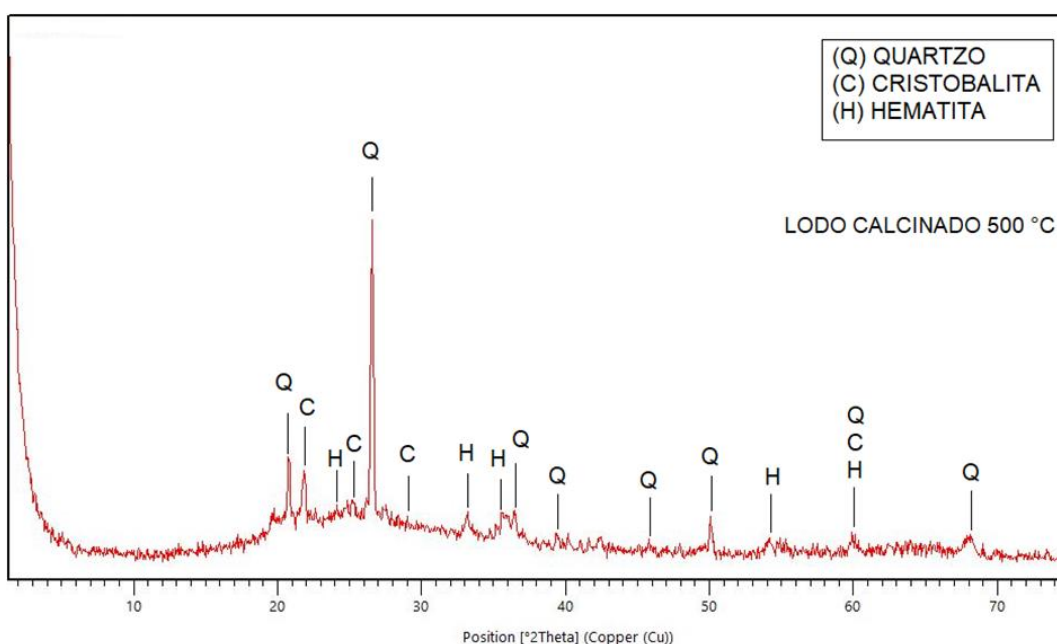
No resultado da DRX da amostra de LETA em que foi feita a acidificação e seco na temperatura de 100 °C, como mostra a Figura 22, o Quartzo (Q) traz dois picos de intensidade em 21° e 26°, e a Kaolinita (K) passou a apresentar uma maior intensidade ao longo da banda analisada, salienta-se a faixa de banda entre 1 e 30° onde há uma maior recorrência se comparado com a DRX da Figura 21, ou seja o ácido foi responsável pelas alterações nas fases cristalográficas encontradas através da DRX nas amostras.

Figura 20: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água acidificado e seco a 100 °C.



Após a calcinação do lodo na temperatura de 500 °C (resultados na Figura 23), as fases cristalinas são compostas pelos minerais Quartzo (Q) com pico de intensidade na banda 26°, mesma banda do LETA seco Figura 21, mas com uma intensidade menor. A Cristobalita (C) de menor recorrência aparecendo na banda entre 22 e 25°, e a Hematita (H) com algumas recorrências de pequena intensidade ao longa banda analisada.

Figura 21: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água calcinado a 500 °C

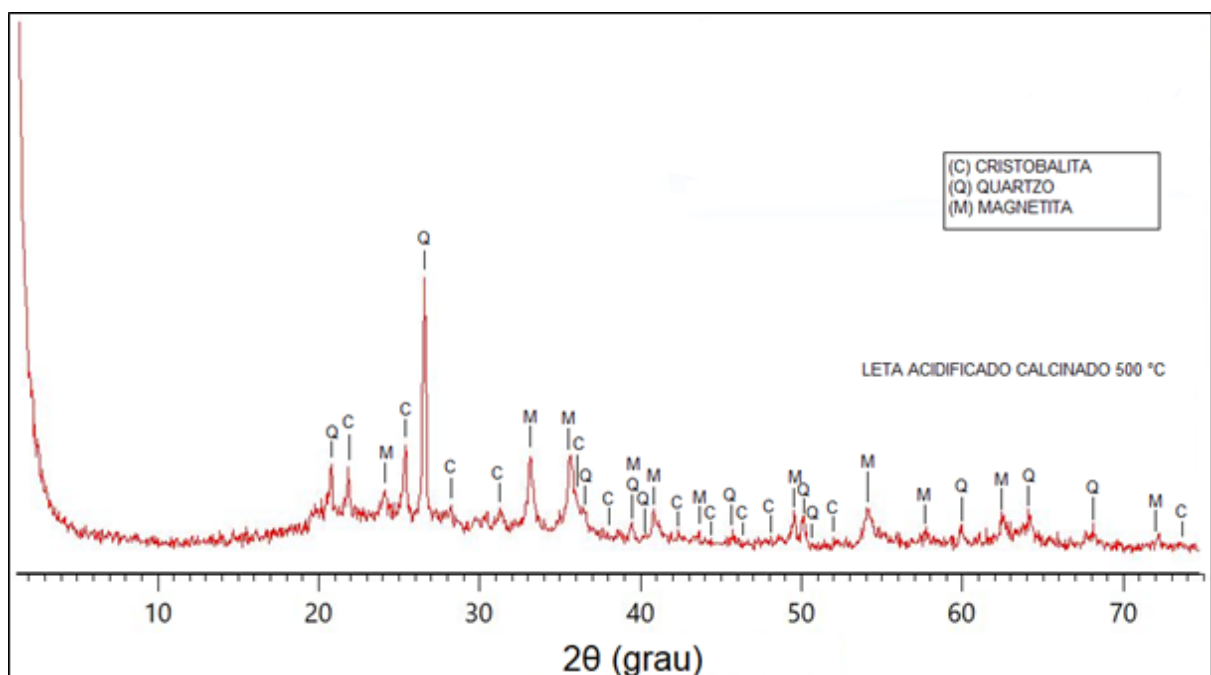


Após a calcinação a 500 °C, as fases cristalinas do LETA acidificado como mostra a Figura 24, trazem os minerais Quartzo (Q) com o pico de intensidade na banda de 26°, similar a DRX da Figura 23 em que o LETA calcinado também apresentou um pico na banda de 26°. A Magnetita (M) apresentou dois picos de intensidade na banda entre 30 e 40°, e a Cristobalita (C) trouxe dois picos na banda entre 20 e 30°, mas com maior intensidade se comparado com a amostra de lodo sem acidificação e calcinado na mesma temperatura.

Uma alteração importante ocorreu no mineral Kaolinita (K), que estava presente nas amostras secas a 100°C, e após a calcinação não foi mais identificada, está ausência é atribuída a desidroxilação e formação da metacaulinita que é um material amorfo e assim não sendo mais contabilizada, pois a DRX só identifica minerais cristalinos. A literatura (MENEZES *et al.*, 2009; SANTOS, S. C. A. *et al.*, 2013) indica a desidroxilação da caulinita com formação da metacaulinita a uma temperatura de queima na faixa de 500 a 600 °C para que ocorra a transformação em um material não cristalino.

A fração de magnetita ( $Fe_3O_4$ ), ocorreu em decorrência do uso da drenagem acida de minas (DAM) para acidificar o LETA, pois a DAM incorporou Ferro (Fe) ao sistema, que possivelmente nas condições da calcinação, se converteu na fase óxido.

Figura 22: Difração de raios - X do lodo de estação de tratamento de água acidificado calcinado a 500 °C.



## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO GEOPOLÍMERO COM LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) ACIDIFICADO.

### 5.2.1 Formação da pasta para o LETA tratado em 100 °C

No estudo estava previsto a utilização do material tratado na temperatura de 100 °C, sendo realizado um teste preliminar com as relações líquido/sólido (0,31; 0,40 e 0,45), e com os teores de substituição do MK, pelo LETA (25%, 50% e 75%), conforme descrito no Item 4.9, contudo como mostram a Figura 25, apenas as amostras com 25% de LETA nas relações líquido/sólido de 0,40 e 0,45, formaram uma pasta, que se transformou em uma “lama”, não sendo possível a moldagem do CP. A partir destes resultados, o uso deste material para estas condições de trabalho, optou-se por prosseguir com os ensaios do LETA tratado na temperatura de 500°.

Figura 23: Experimento com o lodo de estação de tratamento de água acidificado tratado na temperatura de 100 °C.



### 5.2.2 Formação da pasta para o LETA tratado em 500 °C

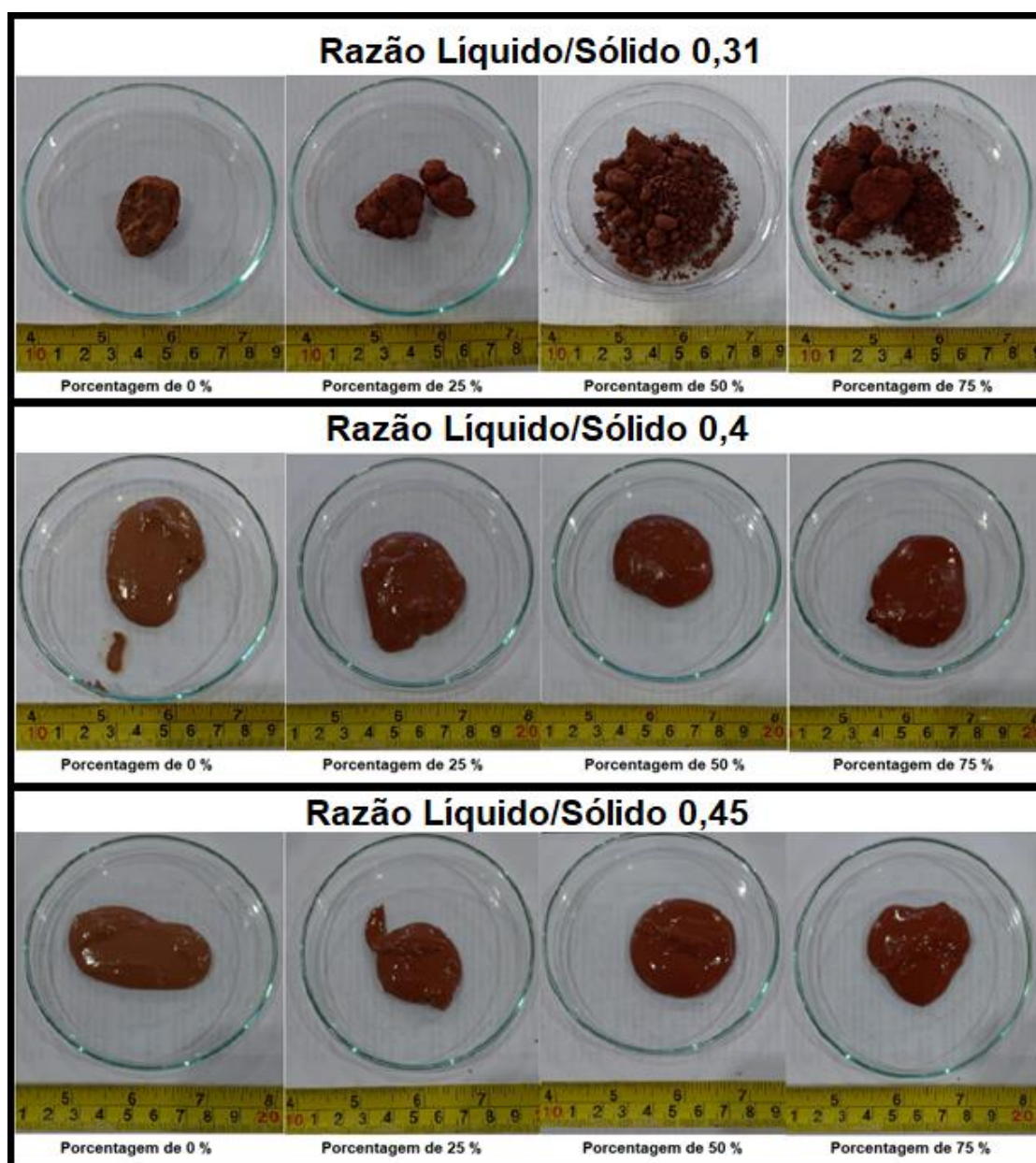
A partir do experimento delineado no item 4.9, foram realizados os testes de formação da pasta nas porcentagens de 0, 25, 50 e 75 %, na Figura 26, é possível identificar que do total de 12 amostras testadas 10 formaram a pasta, e apenas duas não formaram com a razão líquido/sólido de 0,31.

Ao analisar o comportamento das amostras com razão líquido/sólido de 0,4, foi possível constatar que o material formado apresentava características não fluida, similar ao comportamento de um fluido Não Newtoniano, que é aquele que não tem um valor de viscosidade constante, ou seja, quando se aplica vibração a viscosidade do material se altera. Este resultado conduziu a escolha desta composição dos ensaios físicos de caracterização, visto que foi de fácil preparação, moldagem e mistura para todas as quatro variações.

Não foi utilizado a relação líquido/sólido de 0,45, devido ao excesso de água na composição do geopolímero é prejudicial, fazendo com que baixe a resistência a compressão, ocorra o aparecimento da eflorescência e o aumento da porosidade. Em relações mais baixas ocorre uma redução na trabalhabilidade, mas uma elevação na resistência a compressão, assim como a economia no uso de insumos (HU *et al.*, 2018; KUMAR; KUMAR, 2013).

O LETA sem acidificação não foi empregado, pois é difundido na literatura (DOS SANTOS, Gessica Zila Batista; MELO FILHO; MANZATO, 2018; GERALDO, Rodrigo Henrique, 2016; ROSSETTO, 2017; WAIJAREAN *et al.*, 2014), que o emprego de tal material seja in natura ou calcinado, traz inúmeros problemas ao geopolímero, como a baixa resistência a compressão, o aumento da absorção de água, aumento da porosidade, entre outras.

Figura 24: Experimento com lodo de estação de tratamento de água acidificado e tratado na temperatura de 500 °C.



### 5.2.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR foi realizada nos CPs referência e com teor de substituição (25%). A análise dos resultados da Figura 27 foi realizada por comparação entre as bandas. A banda entre 2800 a 3700, são identificados pela presença de água, sendo que para a amostra com 25% LETA ocorreu em  $3.352\text{ cm}^{-1}$ , já para amostra com 100% de MK ocorreu em  $2.921\text{ cm}^{-1}$ . Por outro (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2017)

afirmam que esta banda também pode ocorrer em função da formação do gel de hidróxido de alumínio na amostra.

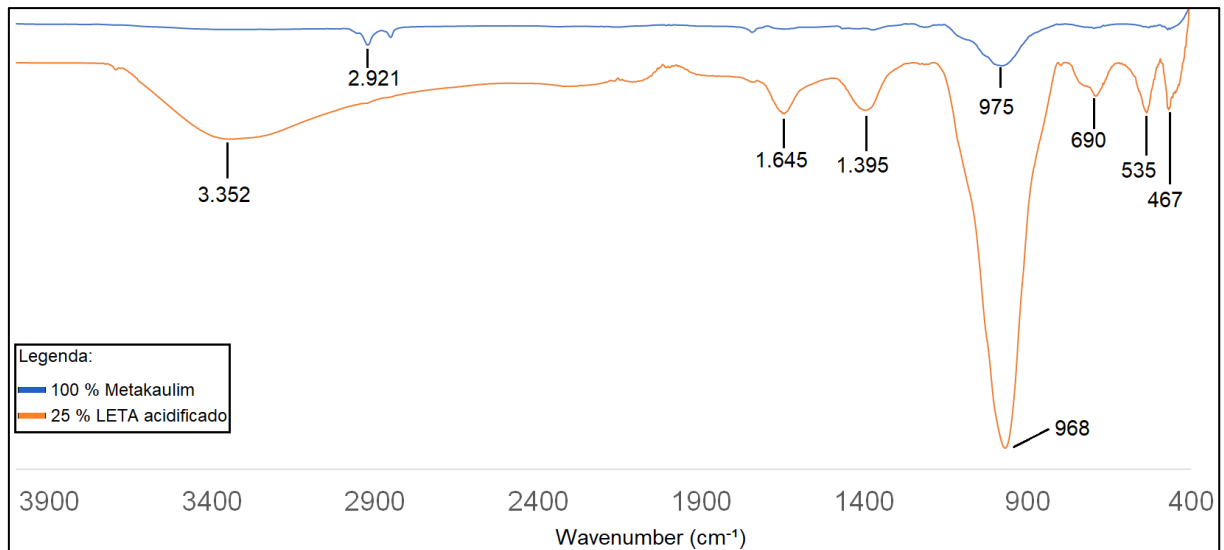
A amostra de LETA tem novamente uma alteração na banda de  $1.645\text{ cm}^{-1}$  que é determinada pela influência da água, a (BAKRI et al., 2013; BARBOSA; MACKENZIE; THAUMATURGO, 2000; GUO; SHI; DICK, 2010) tratam esta como vibração de alongamento(-OH) e flexão (H-O-H) relacionada as moléculas de água aderidas na superfície ou aprisionadas nos poros da estrutura geopolimérica. Na banda de  $1.395\text{ cm}^{-1}$  refere-se a formação da carbonatação (eflorescência), a literatura (OZER; SOYER-UZUN, 2015) indica banda de  $1.400\text{ cm}^{-1}$  em que ocorre a vibração de alongamento na ligação O-C-O, o que indica a carbonatação atmosférica, decorrente do excesso de sódio na mistura do geopolímero, que acaba reagindo com o  $\text{CO}_2$  resultando na formação de bicarbonato de sódio, como mostra a Figura 27.

A banda em  $968\text{ cm}^{-1}$  para o LETA acidificado e tratamento térmico de  $500\text{ }^\circ\text{C}$  e  $975\text{ cm}^{-1}$  para o metacaulim, podem ser considerados como geopolímeros, pois a literatura (HAJIMOHAMMADI; NGO; MENDIS, 2017; WAIJAREAN; ASAVAPISIT; SOMBATSOMPOP, 2014) indica um valor próximo a  $960\text{ cm}^{-1}$  como sendo vibrações de flexão em Al-OH, que são próximas ao números da banda de Si-O-T (T= Si ou Al) em redes de formação de geopolímeros.

Neste caso, sendo um material rico em sílica (Si), independentemente da fase cristalina ou amorfa, este pode apresentar propriedades adequadas a geopolimerização (VASSALO; AGUILAR; GUMIERI, 2014; ZHANG *et al.*, 2012). Os resultados indicam que o material calcinado a  $500\text{ }^\circ\text{C}$  é reativo a ativação alcalina e pode ser utilizado como substituição parcial para geopolímeros.



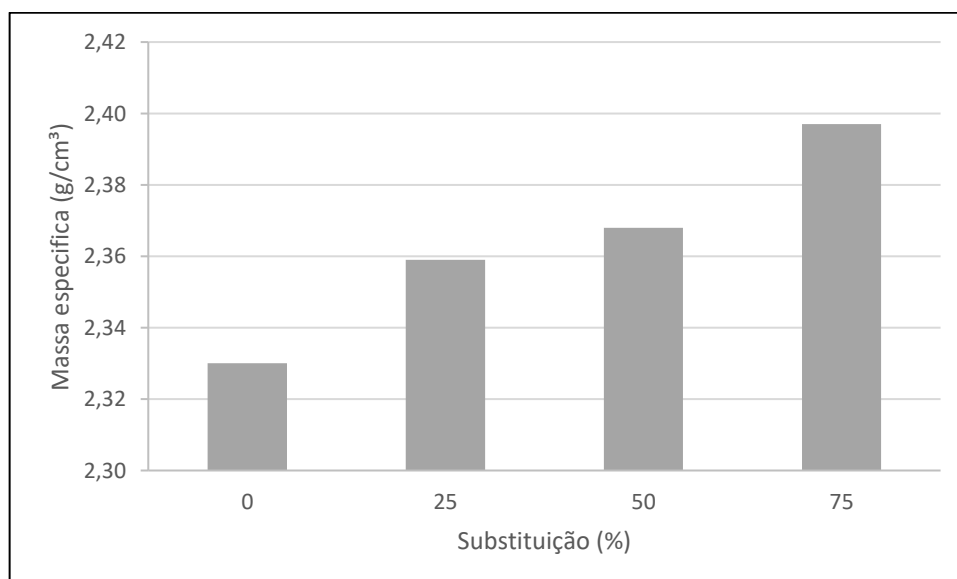
Figura 25: Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).



#### 5.2.4 Propriedades físicas: Massa específica, absorção de água e índice de vazios

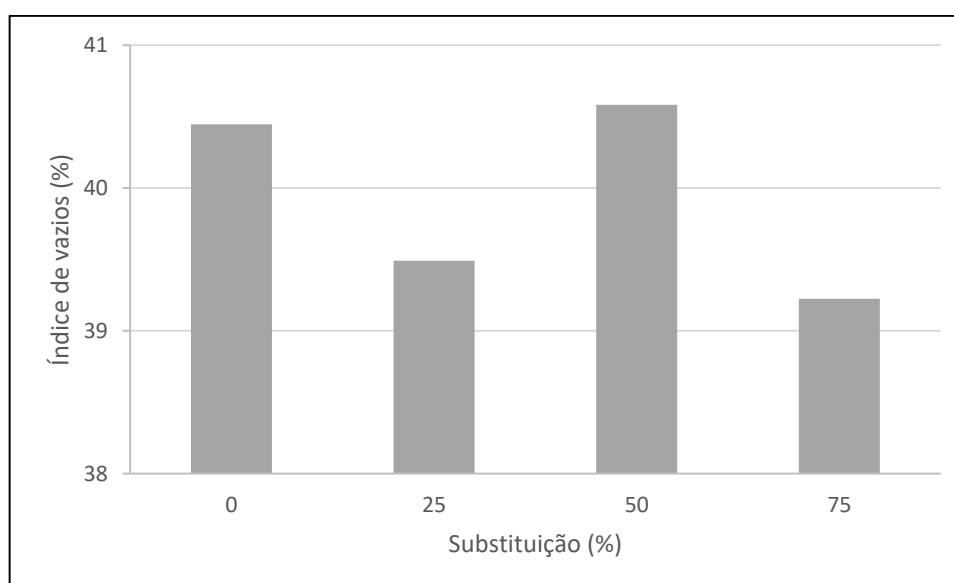
Denota-se ao avaliar a Figura 28, de que quanto maior for a parcela substituída de metacaulim por LETA acidificado e com tratamento térmico de 500 °C, faz com que a massa específica seja gradativamente aumentada. Este aumento na massa específica é resultando da incorporação de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no LETA após a acidificação.

Figura 26: Massa específica do geopolímero



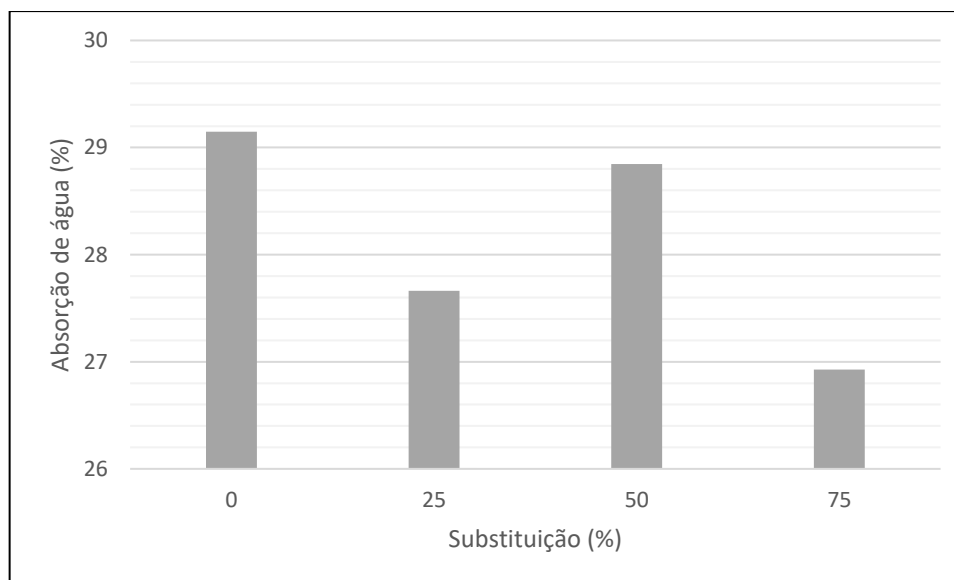
O número elevado de poros nos teores (0 e 50%), é devido a água que ficou adsorvida no interior do geopolímero, e devido não ter sido utilizada proteção no período de cura do material, esta parcela de água foi induzida ao exterior ao longo do período de cura do geopolímero e através disto abrindo caminhos preferenciais, o que explica a elevada porcentagem de vazios. O que corrobora isto é que a literatura traz para valores elevados de massa específica como ocorreu no estudo, o número de poros é pequeno, como ocorre nos teores (25 e 75%).

Figura 27:Índice vazios do geopolímero



A propriedade de absorção de água está diretamente relacionada a capacidade do material acomodar a água em seus poros, ao analisar a Figura 29 e 30, consegue-se ver que os resultados são correlacionados, pois estas têm um comportamento muito semelhante, ou seja, as duas propriedades aumentam ou diminuem na mesma proporção. Contudo a amostra referência e a amostra com 25% de LETA também seguem uma tendência ambígua ao esperado. A literatura (MARTINS, 2001; PAVÍA; TREACY, 2007) indicam que poros com tamanho maior ou igual a 10  $\mu\text{m}$ , só contribuem no período inicial de absorção, em seguida esta contribuição é feita por poros menores, outro fator que interfere é o grau de interconexão entre os poros, ou seja os teores de (0 e 50 %) traz um maior número de poros interligados e de tamanho menores, em comparação aos demais teores testados.

Figura 28: Absorção de água do geopolímero



O teor de substituição de 0 % tem o menor valor de massa específica dentre as amostras e maior valor para índice de vazio e absorção de água, ou seja, esses ensaios corroboram o que afirma a literatura (JESUS, 2018) que correlaciona o aumento da massa específica com a redução do índice de vazios e da absorção de água em geopolímeros com o uso de LETA.

### 5.2.5 Resistência à compressão axial

O aumento no teor de Alumínio ( $Al_2O_3$ ) e Ferro ( $Fe_2O_3$ ), fez com que a relação molar  $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  diminua, e segundo a literatura (DOS SANTOS, F. A., 2017; DUXSON, Peter *et al.*, 2005; KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007; SILVA, P. De; SAGOE-CRENTIL; SIRIVIVATNANON, 2007) isso resulta em produtos com baixa resistência mecânica, pois o Alumínio desempenha o papel de regulador de tempo de pega, a Sílica é responsável pela resistência dos geopolímeros, com isto é possível afirmar que o teor de sílica do LETA não é capaz de suprir a necessidade exigida pelo geopolímero.

O ensaio de resistência a compressão axial para o LETA-acidificado/ 500°C, na idade de 7, 14 e 28 dias, foi identificado que o teor de substituição influencia negativamente nos resultados de resistência, como mostra a Figura 31.

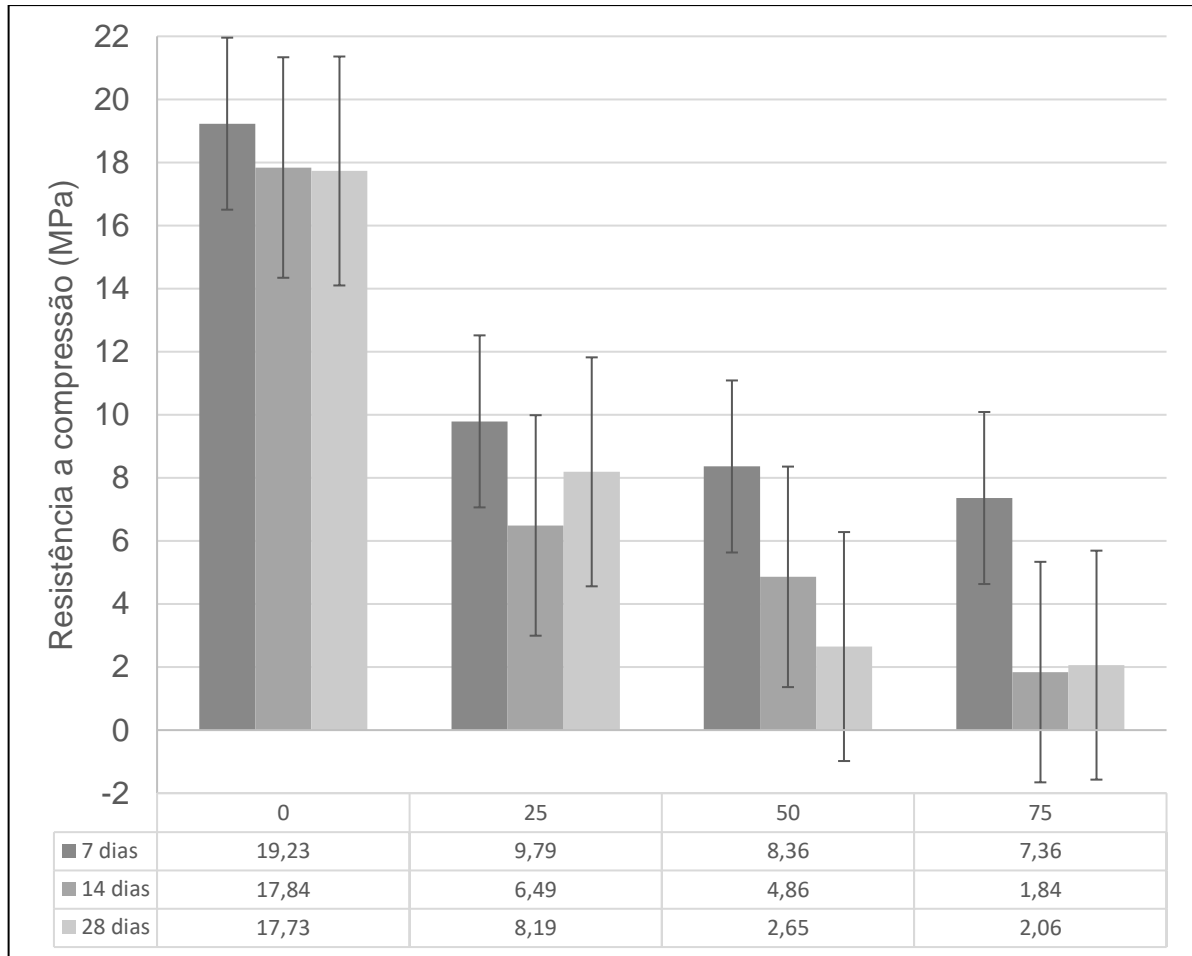
A resistência a compressão axial (MPa) após os 28 dias de cura, como mostra a Figura 31, é percebido um decréscimo contínuo na resistência a compressão em função dos teores de substituição, provavelmente isso esteja relacionado com as

reações de formação e cura do geopolímero, em função da composição do lodo de estação de tratamento de água (LETA), (resultado clássico da literatura) que também se verificou quando aplicado a acidificação do LETA, seguido da calcinação em 500 °C.

Para o resultado de resistência a compressão axial (MPa) para 28 dias, podendo verificar que a parcela utilizada somente de metacaulim (0%) teve um decréscimo de 7,8 % de resistência comparado com o período de 7 dias, ou seja, o período de cura para atingir a máxima resistência é 7 dias. O teor de substituição (25%) teve um decréscimo de 16,34 % de resistência comparado com o CP de 7 dias, desta forma o período de cura quando da utilização da substituição de 25% do material por LETA acidificado calcinado a 500 °C, é de 28 dias. O teor de substituição (50 %) foi o que apresentou a maior redução de resistência cerca de 68,30 % ao longo dos 28 dias de cura do material. Por fim o teor de substituição (75%) tal qual o teor de substituição (50%), apresentou uma redução de 72,01 % ao longo dos 28 dias.

Está redução na resistência a compressão, as reações pelo uso do LETA na mistura, isto é explicado olhando a Figura 31 onde a queda de resistência aumenta na mesma proporção em que se aumenta o teor de substituição de LETA, estas reações estão envolvidas com as características mineralógicas do material, pois o precursor de LETA apresentou elevado teor de óxidos de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Figura 29: Resistência a compressão



## 6 ESTIMATIVA DOS CUSTOS PARA PRODUÇÃO DO PRECURSOR GEOPOLIMÉRICO A PARTIR DO LODO DE ETA COM TRATAMENTO ÁCIDO

Considerando o processo de acidificação como parte importante na recuperação do sólido para uso em materiais construídos, visando uma maior liberação da água ligada aos hidróxidos alcalinos gerados, e agregando valor ao líquido resultante como coagulante, foi explorado superficialmente as questões econômicas do processo. Para o processo é possível utilizar o ácido Sulfúrico e o ácido Clorídrico. O valor do ácido Sulfúrico 98% comercial é de R\$ 50,00/L e do ácido Clorídrico 37% comercial é de R\$ 33,33/L.

Para a extração do coagulante e preparação do sólido foi necessário 10 g de ácido sulfúrico para cada Kg de LETA. Sendo assim o custo se utilizado o ácido sulfúrico será de R\$ 1,50/Kg de LETA.

A geração natural de ácido sulfúrico pelo rejeito de carvão contendo pirita está bem consolidado na literatura, porém não com uso comercial deste sistema. Como estimativa de custo para geração do ácido teria um custo para a primeira rodada, em período de 4 a 6 semanas, além do valor do transporte do rejeito Piritoso. Sendo assim o custo final se utilizado o ácido sulfúrico a partir do rejeito piritoso seriam gastos R\$ 0,48/Kg de LETA.

## 7 CONCLUSÕES

A partir do presente trabalho pode-se verificar que a acidificação do lodo de estação de tratamento de água (LETA) utilizando a drenagem ácida de minas (DAM), trouxe a alteração nas características mineralógicas mais significativo nos teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) que reduziu, alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que reduziu e o Ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que elevou em comparação com o material bruto.

O uso do LETA Seco na temperatura de 100 °C, não foi possível moldar o corpo de prova (CP), tendo que ser descartado a utilização, cabe ressaltar que o material seco a 100 °C não funcionou para os critérios adotados.

Para o LETA calcinado a 500 °C foram moldado os CPs, obtendo-se o melhor resultado no teor de substituição de 25 % (9,02 MPa) aos 28 dias. A comprovação da formação de um geopolímero foi feita através da FTIR, com um pico de 698  $\text{cm}^{-1}$  faixa está determinante da formação do gel de aluminossilicatos.

O material produzido pela substituição do metacaulim pelo LETA acidificado e calcinado apresentou um decréscimo na resistência a compressão ao longo das idades, indicando que a substituição traz prejuízos a resistência do material.

A estimativa do custo para a utilização do ácido clorídrico extraído do rejeito piritoso, mostrou ser uma alternativa viável para o processo de acidificação do LETA, pois foi possível dar um destino para dois resíduos (LETA e a Pirita), além do rejeito ter o poder de produzir ácido por um longo período com uma economia de R\$ 1,00/Kg de LETA.

## **8 RECOMENDAÇÃO TRABALHO FUTUROS**

Avaliação do LETA calcinado a 500°C, nas propriedades mecânicas do geopolímero;

Estudos do LETA acidificado para produção de materiais cimentícios;

Avaliar a economicidade da produção de coagulante utilizando o LETA e a DAM.

## 9 REFERÊNCIAS

ABCM, Associação Brasileira do Carvão Mineral. **História do Carvão no Brasil**. [S. l.], 2020. Disponível em: [http://www.carvaomineral.com.br/interna\\_conteudo.php?i\\_subarea=8&i\\_area=4](http://www.carvaomineral.com.br/interna_conteudo.php?i_subarea=8&i_area=4). Acesso em: 24 jun. 2020.

ABDELAAL, Ahmed; ABDELMAWLA, Mohammed; BEHEARY, Mokhtar; ABDULLAH, Nabil; RAZEK, Taha *et al.* IMMOBILIZATION OF SOME HEAVY METALS IN GEOPOLYMER BASED ON WATER TREATMENT SLUDGE AND ALUM INDUSTRY SOLID WASTE. **Alfarama Journal of Basic & Applied Sciences**, [s. l.], p. 0–0, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21608/ajbas.2020.28829.1014>

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

\_\_\_\_\_. **NBR N° 5.738 Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. [S. l.: s. n.], 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR N° 5.739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. [S. l.: s. n.], 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR N° 7.215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. [S. l.: s. n.], 2019.

\_\_\_\_\_. **NRB N° 9.778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. [S. l.: s. n.], 2005.

ACHON, Cali Laguna; BARROSO, Marcelo Melo; CORDEIRO, João Sérgio. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 115–122, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200003>

ACHON, Cali Laguna; CORDEIRO, João Sérgio. Destinação e Disposição Final De Lodo Gerado Em Eta - Lei 12.305/2010. **XIX Exposição de Experiências Municipais em Saneamento**, [s. l.], n. 21, p. 1–8, 2015.

AHMAD, Tarique; AHMAD, Kafeel; ALAM, Mehtab. Characterization of Water Treatment Plant's Sludge and its Safe Disposal Options. **Procedia Environmental Sciences**, [s. l.], v. 35, n. August, p. 950–955, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>

ALEXANDRE, Elisandro; LUZ, Caroline Angulski da. Substituição parcial do cimento CPV-ARI por lodo de estação de tratamento de água (ETA). **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0912>

ALTOÉ, Silvia Paula Sossai; MARTINS, Carlos Humberto; BELLINI, Jusmar Valentin; LONGEN, Fábio Rogério. Análise Da Pozolanidade De Cinza Do Bagaço De Cana-De-. [s. l.], p. 1–10, 2012.



ALVARENGA, Cristiane Bom Conselho Sales. **Síntese E Caracterização De Geopolímeros À Base Metacaulim E Micropartículas De Vidro Soda-Cal.** Belo Horizonte - MG: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2018.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA (BRASIL). Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água: Resultados por Estado. **Ana**, [s. l.], v. 2, p. 1–92, 2010.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). Atlas Brasil: Abastecimento Urbano de Água. **Ana**, [s. l.], v. 1, p. 1–72, 2010.

ARAUJO, Franciulli da Silva Dantas de. Influência do lodo de ETE na massa para fabricação de cerâmica vermelha. [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, p. 91, 2008. Disponível em: <http://repositorio.ufrn.br:8080/jspui/handle/123456789/12670>

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5381-93(2014), Standard Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders.** West Conshohocken, PA: [s. n.], 2014.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E1621-13, Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry.** West Conshohocken, PA: [s. n.], 2013.

AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de cinza volante usando soluções ativadoras com diferentes composições de Na<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. **Cerâmica**, [s. l.], v. 63, n. 366, p. 143–151, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662078>

AZEVEDO, A. G. de S.; STRECKER, K.; LOMBARDI, C. T. Produção de geopolímeros à base de metacaulim e cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s. l.], v. 64, n. 371, p. 388–396, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643712420>

BAKRI, Abdullah Mohd Mustafaal; KAMARUDIN, Hussin; NIZAR, Ismail Khairul; SANDU, Andrei Victor; BINHUSSAIN, Mohamed; ZARINA, Yahya; RAFIZA, Abdul Razak. Design, processing and characterization of fly ash-based geopolymers for lightweight concrete application. **Revista de Chimie**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 382–387, 2013.

BARBOSA, Valeria F.F.; MACKENZIE, Kenneth J.D.; THAUMATURGO, Clelio. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers. **International Journal of Inorganic Materials**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 309–317, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6)

BOTERO, Wander Gustavo; SANTOS, Ademir dos; OLIVEIRA, Luciana Camargo de; ROCHA, Julio Cesar. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**, [s. l.], v. 32, n. 8, p. 2018–2022, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000800007>

BUSELATTO, Denis Meira; WENZEL, Matheus Chirardia; ROCHA, Gabriela Holsbach da; WEBBER, Jeferson; SILVA, Sérgio Roberto da; ANDRADE, Jairo José

de Oliveira. Incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) como agregado miúdo em concretos: avaliação das propriedades físico-mecânicas. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 24, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190001.0645>

BUSELATTO, Denis Meira; WENZEL, Matheus Chirardia; ROCHA, Gabriela Holsbach da; WEBBER, Jeferson; SILVA, Sérgio Roberto da; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Use of water treatment sludge (Wts) as fine aggregate in concretes: Evaluation of physical-mechanical properties. **Revista Materia**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0604>

CABALLERO, Liuski Roger. **Comportamento físico-mecânico de matrizes geopoliméricas à base de metacaulim reforçadas com fibras de aço**. Rio de Janeiro - RJ: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2017.

CANCINO, Nathalia Silva; VARGAS, Maria Alejandra Vargas. **Metodología para el dimensionamiento de la unidad de espesamiento de lodos en las plantas de tratamiento de agua potable**. Bogotá: [s. n.], 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/ERR2015>

CASTÃO, Edvan Silva; DE CASTRO, Amanda Lima; FILHO, Arnaldo Mesquita; DA ROCHA, Gercivania Avelina; DOS SANTOS, Samuel Ricardo. Reuso de lodo de estação de tratamento de água (E.T.A.) na fabricação de tijolos cerâmicos. **Congresso ABES FENASAN 2017**, [s. l.], n. 1, p. 1–10, 2017.

CHALHOUB, Ayda Samih; LOURENÇO, Edneia Santos de Oliveira; FILLA, Julio Cesar; JUNIOR, Edi Faria; MADALOZZO, Ledo Lourenço. Incorporação do lodo de eta na fabricação de tijolos. **2º Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, [s. l.], p. 1–6, 2019.

CHÁVEZ PORRAS, Álvaro; DE LIMA ISAAC, Ricardo; MORITA, Dione. Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria - tijolos estabilizados com cimento. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 5–28, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.18359/rcin.1486>

COELHO, Maria Antonina Magalhães; SILVA, Maristela Gomes da; SOUZA, Fernando Lordêllo dos Santos; SARMENTO, Robson; ZANDONADE, Eliana; MORIMOTO, Tsutomu; HELMER, José Luiz. BLOCO DE CONCRETO TIPO QUEBRA-MAR COM ESCÓRIA DE ALTO-FORNO ATIVADA QUIMICAMENTE. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 186–191, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/tmm.00503011>

COELHO, Rodrigo Vaz; TAHIRA, Fernando Shigueu; FERNANDES, Fernando; FONTENELE, Heliana Barbosa; TEIXEIRA, Raquel Souza. USO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s. l.], v. 10, n. 2, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v10i2.33134>

COLLING, Angéli Viviani. **Oxidação da pirita por via bacteriana em rejeitos de carvão para a produção de sulfato férrico**. Porto Alegre/RS: [s. n.] **Dissertação**

(Mestrado), 2010.

CONCEIÇÃO, Luís Cláudio Staudt. **Avaliação de parâmetros físico-químicos na produção de geopolímeros constituídos por vidro vulcânico e silicato de sódio alternativo**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM\\_PEMBETUNGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)

CRIADO, M; PALOMO, A; FERNANDEZ JIMENEZ, A. Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. **Fuel**, [s. l.], v. 84, n. 16, p. 2048–2054, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>

CUNHA, Geremias Dourado da; LIMA, Jerri Adriano Vieira; STACHIW, Rosalvo; TRONCO, Kênia Michele de Quadros. Caracterização e destinação ambientalmente corretas do lodo gerado pelas estações de tratamento de água. **Nature and Conservation**, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 19–30, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2019.002.0003>

DA COSTA, Felipe Murilo Silva. Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento Portland. [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, p. 122, 2014.

DA SILVA, Flávio Pires; CARVALHO, Carlos Vitor de Alencar; CARDOSO, Alexander Machado. GESTÃO DA ÁGUA: A Importância de Políticas Públicas para a Implementação do Reuso de Água no Brasil. **Episteme Transversalis**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 309–322, 2019.

DAER, Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **MANUAL DE ENSAIOS**. [S. l.: s. n.], 2001.

DANDOLINI, Ivana. Reciclagem do lodo de estação de tratamento de água - produção de coagulante por lixiviação ácida. [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, p. 1–74, 2014.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. **Journal of Ceramic Science and Technology**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 335–350, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00038>

DAVIDOVITS, J. Geopolymers. **Journal of Thermal Analysis**, [s. l.], v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01912193>

DAVIDOVITS, Joseph. Properties of Geopolymer Cements. **First International Conference on Alkaline Cements and Concretes**, [s. l.], p. 131–149, 1994.

DAVIDOVITS, Prof Joseph. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . **Geopolymer 2002 Conference**, [s. l.], p. 1–16, 2002.

DE ARAÚJO, Everton Henrique Agrade. Estudo da amorfização do caulim para

aplicação como material pozolânico. [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, p. 104, 2016.

DE OLIVEIRA, André Barbosa; DA SILVA, Hugo Raphael Mendes; CAVALLINI, Grasielle Soares; QUEIROZ, Sérgio Carlos Bernardo. Pós-tratamento de efluente sanitário por coagulação com íons de alumínio recuperados de lodo de eta. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 257, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v6e22017257-271>

DE OLIVEIRA ANDRADE, Jairo José; DA SILVA, Hugo Raphael Mendes; CAVALLINI, Grasielle Soares; QUEIROZ, Sérgio Carlos Bernardo. Performance of rendering mortars containing sludge from water treatment plants as fine recycled aggregate. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 192, p. 159–168, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.246>

DE OLIVEIRA, Leonel Nadal; DE OLIVEIRA, Ricardo Nadal; NETO, Djalmo Dutra dos Santos; JÚNIOR, Rogério Ferreira; LERMEN, Richard Thomas; SILVA, Rodrigo de Almeida. RECUPERAÇÃO DE COAGULANTE DE LODO INDUSTRIAL POR VIA ÁCIDA ALTERNATIVA E DESTINAÇÃO PARA O MATERIAL NÃO SOLUBILIZADO. **Anais do 5º Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis**, [s. l.], v. 5, n. December, p. 9, 2019.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química Nova**, [s. l.], v. 24, n. 6, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422001000600013>

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg.; HOTZA, Dachamir. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 22–25, 2005.

DOLD, Bernhard. Evolution of Acid Mine Drainage Formation in Sulphidic Mine Tailings. **Minerals**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 621–641, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min4030621>

DOS SANTOS, Fábio Astrogildo. **Estudo da variação da relação SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na produção de geopolímeros para imobilizar contaminantes**. [S. l.: s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2017.

DOS SANTOS, Gessica Zila Batista; MELO FILHO, João de Almeida; MANZATO, Lizandro. Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0501>

DUXSON, P; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PROVIS, J. L; LUKEY, G. C; PALOMO, A; VAN DEVENTER, J. S.J. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>

DUXSON, Peter; PROVIS, John L; LUKEY, Grant C; SEPAROVIC, Frances; VAN DEVENTER, Jannie S. J. 29 Si NMR Study of Structural Ordering in Aluminosilicate Geopolymer Gels. **Langmuir**, [s. l.], v. 21, n. 7, p. 3028–3036, 2005.

Disponível em: <https://doi.org/10.1021/la047336x>

FERNANDES, I. J; CALHEIRO, D; SANTOS, E. C. A. dos; OLIVEIRA, R; ROCHA, T. L. A. C; MORAES, C. A. M. COMPARAÇÃO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ E SÍLICA COMERCIAL COMO CARGA EM COMPÓSITOS POLIMÉRICOS I. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, [s. l.], p. 2665–2672, 2014. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/104-010.pdf>

FERNANDES, Iara Janaína; CALHEIRO, Daiane; SANTOS, Emanuele Caroline Araújo dos; MORAES, Carlos Alberto Mendes; ROCHA, Tatiana Louise Avila de Campos; KIELING, Amanda Gonçalves; BREHM, Feliciane Andrade. TRATAMENTO DE CINZA DE CASCA DE ARROZ POR LIXIVIAÇÃO ÁCIDA. *In:* , 2018, São Paulo. **ABM Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 2209–2216. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/1516-392X-27067>

FERNANDEZ, Lucas Plattner; MIKOWSKI, Paula Cristina Buss; MACIOSKI, Gustavo; NAGALLI, André; FREIRE, Flavio Bentes. Avaliação da incorporação do lodo de Estação de Tratamento de Água em peças de concreto intertravado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 23, n. 3, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0490>

FERNANDEZ, LUCAS PLATTNER; MIKOWSKI, PAULA CRISTINA BUSS. Avaliação Da Viabilidade Da Utilização De Lodo De Estação De Tratamento De Água Em Peças De Concreto Para Pavimentação Intertravada. [s. l.], p. 90, 2016.

FERONE, Claudio; CAPASSO, Ilaria; BONATI, Antonio; ROVIELLO, Giuseppina; MONTAGNARO, Fabio; SANTORO, Luciano; TURCO, Rosa; CIOFFI, Raffaele. Sustainable management of water potabilization sludge by means of geopolymers production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 229, p. 1–9, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.299>

FIGUEIREDO, Flavio Fernando; NUVOLARI, Ariovaldo. **Uso do lodo de estação de tratamento de água na fabricação de tijolos cerâmicos maciços**. Florianópolis - SC: [s. n.], 2004.

FILHO, Juarez Ramos do Amaral. **Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil**. Porto Alegre/RS: [s. n.] **Tese (Doutorado)**, 2014.

FORNASA, Bianca Loch. **Utilização de concreto reciclado para a produção de geopolímero**. [S. l.: s. n.] **Monografia (Graduação)**, 2017.

FRANCISCO, Aa; POHLMANN, Phm; FERREIRA, Ma. Tratamento Convencional de Águas para Abastecimento Humano: Uma Abordagem Teórica dos Processos Envolvidos e dos Indicadores de Referência. **II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, [s. l.], n. 1, p. 1–9, 2011. Disponível em: <http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/IX-005.pdf>

FRARE, Andreza; LUZ, Caroline Angulski da. Cimentos álcali ativados: efeito da cura térmica no desenvolvimento da resistência mecânica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [s. l.], v. 25, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0872>

FRASSON, Bruna Juvêncio. **Aproveitamento de subprodutos da mineração de carvão para produção de cimentos álcali ativados**. Florianópolis - SC: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2018.

FREITAS, Juliana Gardenalli de; FERREIRA FILHO, Sidney Seckler; PIVELI, Roque Passos. Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 137–145, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000200007>

FREITAS, V.O; VIEIRA, M.S; ROSA, G.S; SOUZA, T.R. Proposta De Tratamento Para O Lodo Gerado No Processo Da Eta De Bagé. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 2–3, 2016.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, [s. l.], v. 61, n. 358, p. 251–258, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581847>

GARDENALLI, Juliana; FILHO, Sidney Seckler Ferreira; PIVELI, Roque Passos. **Viabilidade técnica e econômica da regeneração de coagulantes a partir de lodos de estações de tratamento de água technical and economical feasibility of coagulant recovery from water treatment plant sludges roque passos piveli**. [S. l.: s. n.], 2005.

GERALDO, Rodrigo H.; FERNANDES, Luiz F.R.; CAMARINI, Gladis. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 149, p. 146–155, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076>

GERALDO, Rodrigo Henrique. **Aglomerante álcali-ativado contendo lodo de eta e cinza de casca de arroz**. Campinas - SP: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2016.

GODOY, Luis Gabriel Graupner de; ROHDEN, Abrahão Bernardo; GARCEZ, Mônica Regina; COSTA, Eugênio Bastos da; DA DALT, Silvana; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. Valorization of water treatment sludge waste by application as supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 223, p. 939–950, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.333>

GOMES, Samuel De Carvalho; ZHOU, John L.; LI, Wengui; LONG, Guangcheng. Progress in manufacture and properties of construction materials incorporating water treatment sludge: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 145, n. February, p. 148–159, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.032>

GONÇALVES, Flávia; SOUZA, Caio Henrique Ubukata de; TAHIRA, Fernando Shigueu; FERNANDES, Fernando; TEIXEIRA, Raquel Souza. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista DAE**, [s. l.], v. 65, n. 205, p. 5–14, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/dae.2016.018>

GOUNY, F.; FOUCHAL, F.; MAILLARD, P.; ROSSIGNOL, S. A geopolymer

mortar for wood and earth structures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 36, p. 188–195, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.009>

GOYAL, Shweta; SIDDIQUE, Rafat; JHA, Sujant; SHARMA, Devender. Utilization of textile sludge in cement mortar and paste. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 214, p. 169–177, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.023>

GRUTZECK, M.W.; PUERTAS, F.; BLANCO-VARELA, M.T.; GRANIZO, M.L.; VAZQUEZ, T.; PALOMO, A. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 29, n. 7, p. 997–1004, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00074-5)

GUO, Xiaolu; SHI, Huisheng; DICK, Warren A. Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 142–147, 2010a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>

GUO, Xiaolu; SHI, Huisheng; DICK, Warren. Use of Heat-Treated Water Treatment Residuals in Fly Ash-Based Geopolymers. **Journal of the American Ceramic Society**, [s. l.], v. 93, n. 1, p. 272–278, 2010b. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03331.x>

GUTIÉRREZ-ROSERO, Johnatan Alberto; RAMÍREZ-FAJARDO, Álvaro Ignacio; RIVAS, Rodrigo; LINARES, Balmes; PAREDES, Diego. Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. **Revista Ingenierías Universidad de Medellín**, [s. l.], v. 13, n. 25, p. 13–27, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.22395/rium.v13n25a1>

HAGEMANN, S.E.; GASTALDINI, A. L.G.; COCCO, M.; JAHN, S. L.; TERRA, L. M. Synergic effects of the substitution of Portland cement for water treatment plant sludge ash and ground limestone: Technical and economic evaluation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 214, p. 916–926, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.324>

HAJIMOHAMMADI, Ailar; NGO, Tuan; MENDIS, Priyan. How does aluminium foaming agent impact the geopolymer formation mechanism? **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 80, p. 277–286, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.03.022>

HE, Peigang; JIA, Dechang. Low-temperature sintered pollucite ceramic from geopolymer precursor using synthetic metakaolin. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 1812–1818, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-012-6944-7>

HENDGES, Letiane Thomas; CRISTINA, Roselaine Rejei Reinher; LEICHTWEIS, Jandira; FERNANDES, Édina Jaíne; TONES, Aline Raquel Muller. Disposição final de lodo de estação de tratamento de água e de esgoto: uma revisão. [s. l.], 2017.

HOPPEN, C.; PORTELLA, K. F.; JOUKOSKI, A.; BARON, O.; FRANCK, R.;

SALES, A.; ANDREOLI, C. V.; PAULON, V. A. Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental. **Cerâmica**, [s. l.], v. 51, n. 318, p. 85–95, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000200003>

HOPPEN, Cinthya; PORTELLA, Kleber F.; JOUKOSKI, Alex; TRINDADE, Eduardo M.; ANDREÓLI, Cléverson V. The use of centrifuged sludge from a water treatment plant (WTP) in Portland cement concrete matrices for reducing the environmental impact. **Química Nova**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 79–84, 2006b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000100016>

HU, Wei; NIE, Qingke; HUANG, Baoshan; SHU, Xiang; HE, Qiang. Mechanical and microstructural characterization of geopolymers derived from red mud and fly ashes. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 186, p. 799–806, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.086>

ISTUQUE, D. B.; SORIANO, L.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L.P.; BORRACHERO, M. V.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M. M. Effect of sewage sludge ash on mechanical and microstructural properties of geopolymers based on metakaolin. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 203, p. 95–103, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.093>

JESUS, Aedjota Matos de. **Utilização de lodo de estação de tratamento de água para produção de geopolímeros**. Manaus/AM: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2018.

JESUS, Aedjota Matos de; VIEIRA, Raimundo Kennedy; VIEIRA, Adalena Kennedy. Use of sludge from water treatment station to produce Geopolymer cement. **Brazilian Applied Science Review**, [s. l.], v. 4, n. 6, p. 3367–3378, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34115/basrv4n6-006>

JULIO, Marcelo de; OROSKI, Fabiano Icker; SANTOS, Murilo Noslen Oliveira dos; JULIO, Tatiane Sakamoto De. Reúso do Coagulante Recuperado do Lodo de ETA no Tratamento Terciário do Efluente de Lagoa de Polimento Precedida de Reator RALF. **Revista DAE**, [s. l.], v. 59, n. 185, p. 4–9, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/dae.2014.072>. Acesso em: 7 mar. 2020.

JULIO, Marcelo de; SANTOS, Murilo Noslen Oliveira dos; OROSKI, Fabiano Icker. Regeneração Por Via Ácida Do Coagulante Presente No Lodo Da Estação De Tratamento De Água Pitangui Operada Pela Sanepar De Ponta Grossa/Pr. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. Páginas 13-28, 2009.

KEELEY, James; JARVIS, Peter; SMITH, Andrea D; JUDD, Simon J. Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. **Water Research**, [s. l.], v. 88, p. 502–509, 2016. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.038>

KOMNITSAS, Kostas; ZAHARAKI, Dimitra. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 14, p. 1261–1277, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.07.011>

KORF, Edgar Munaretto. Avaliação Das Propriedades De Um Material Geopolimérico Espumígeno Desenvolvido Com Diferentes Tipos De Metacaulim. [s.



.l.] **Dissertação (Mestrado)**, p. 1–88, 2019b.

KUMAR, Anuj; KUMAR, Sanjay. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 38, p. 865–871, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013>

LACERDA, Charles Siervi. Estudo da Influência da Substituição de Cimento Portland por Metacaulim em Concretos Dissertação. **Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, [s. l.], p. 230, 2005.

LAURINDO, Sibebe Silveira; ANTUNES, Elaine Guglielmi Pavei; SAVI, Aline Eyng; SPECK, Jaison Araújo; PIVA, Jorge Henrique. ESTUDO DA ADIÇÃO DO LODO DE ETA - ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO. **MIX Sustentável**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 19–28, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.19-28>

LEMOUGNA, Patrick N.; WANG, Kai-tuo; TANG, Qing; MELO, U. Chinje; CUI, Xue-min. Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. **Ceramics International**, [s. l.], v. 42, n. 14, p. 15142–15159, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.027>

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 40, n. 9, p. 1341–1349, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>

LIVI, Carolina Noda; REPETTE, Wellington Longuini. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 7–18, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212015000300022>

LONGHI, M. A. Álcali-Ativação De Lodo De Caulim Calcinado E Cinza Pesada Com Ativadores Convencionais E Silicato De Sódio Alternativo. [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, p. 182, 2015.

LOT, Ana Virgínia; MELCHIADES, Fábio Gomes; BOSCHI, Anselmo Ortega. Influência das Características de Metacaulins no Desempenho de Geopolímeros. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 35–41, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2015.017>

LUCCA, Alexsandro. **Extração, caracterização e aplicação do biopolímero da planta pereskia aculeata miller como auxiliar coagulante/floculante no processo de tratamento de água**. [S. l.: s. n.], 2017.

LUDUVICE, M. **Uso e disposição final de lodos orgânicos**. Brasília: [s. n.], 1996.

MARASCHIN, Manoel; HEDLUND FERRARI, Keila Fernanda; CARISSIMI, Elvis. Acidification and flocculation of sludge from a water treatment plant: New action mechanisms. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], v. 252, p. 117417, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117417>

MARTINS, Aline Rosa. **Efeito da cura termica e de cimentos com escoria granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobrimento.** [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, v. 2001, p. 169, 2001.

MATOS, Samile Raiza Carvalho. Desenvolvimento de argamassa álcali-ativada para utilização em sistemas de reparo com incorporação de cinza agroindustrial. Salvador - BA: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2018.

MAZZA, Silvio de Cerqueira. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento portland.** Salvador - BA: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2010.

MCCARTHY, Terence S. The impact of acid mine drainage in South Africa. **South African Journal of Science**, [s. l.], v. 107, n. 5/6, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4102/sajs.v107i5/6.712>

MENEZES, Romualdo R.; NEVES, Gelmires A.; SOUZA, Jozilene; MELO, Weyne A.; FERREIRA, Heber S.; FERREIRA, Heber C. Atividade pozolânica dos resíduos do beneficiamento do caulim para uso em argamassas para alvenaria. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 795–801, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000600019>

MESSINA, F.; FERONE, C.; MOLINO, A.; ROVIELLO, G.; COLANGELO, F.; MOLINO, B.; CIOFFI, R. Synergistic recycling of calcined clayey sediments and water potabilization sludge as geopolymer precursors: Upscaling from binders to precast paving cement-free bricks. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 133, p. 14–26, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.039>

METACAULIM DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ. [s. l.], p. 4, 2011.

MINISTERIO DA SAÚDE. PORTARIA Nº- 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: [https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html). Acesso em: 27 abr. 2020.

MONTALVAN, Edy Lenin Tejada. Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão. 2016. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. **Dissertação (Mestrado)** Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2016.tde-02122016-091816>

NASCIMENTO, Guilherme Colle; DOMINGUINI, Lucas; MELLO, Josiane Maria Muneron; DAL MAGRO, Jacir; RIELLA, Humberto Gracher; FIORI, Márcio Antônio. Caracterização físico-química da cinza de casca de arroz oriunda do processo termelétrico do sul de Santa Catarina - Brasil. **Ciência e Natura**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 634–640, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X15262>

NATASHA, Érica; MORENO, Diego; FERNANDES, André. Importância Da Preservação E Conservação Das Águas Superficiais E Subterrâneas: Um Panorama Sobre a Escassez Da Água No Brasil the Importance of Preservation and Conservation of Surface Water and Underground: Na Overview on the Water Shortage

in Brazil. [s. l.], v. 11, n. 6, p. 235–249, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/19800827>

NIMWINYA, Ekkasit; ARJHARN, Weerachai; HORPIBULSUK, Suksun; PHOONGERNKHAM, Tanakorn; POOWANCUM, Anurat. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 119, p. 128–134, 2016a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>

NUERNBERG, Natassia Bratti da Silva. **Desenvolvimento e caracterização de geopolímeros a partir da cinza de casca de arroz e do lodo de anodização de alumínio**. Criciúma/SC: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2018.

OLIVEIRA, Eliza Anik de; LEITE, Jandecy Cabral. Use of Clay Sludge Water Treatment Plant Sludge to Produce Ceramic Brick. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 281–293, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22161/ijaers.5.12.39>

OLIVEIRA, Isadora Yule Queiroz de; RONDON, Odilar Costa. Diagnóstico da gestão de lodo de estação de tratamento de água em Mato Grosso do Sul. **Interações (Campo Grande)**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 687–698, 2016. Disponível em: [https://doi.org/10.20435/1984-042x-2016-v.17-n.4\(11\)](https://doi.org/10.20435/1984-042x-2016-v.17-n.4(11))

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s. l.], v. 50, n. 316, p. 324–330, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132004000400007>

OZER, Isil; SOYER-UZUN, Sezen. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. **Ceramics International**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 10192–10198, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.125>

PAIXÃO, L. C. C.; YOSHIMURA, H. N.; ESPINOSA, D. C. R.; TENORIO, J. A. S. Efeito da incorporação de lodo de ETA contendo alto teor de ferro em cerâmica argilosa. **Cerâmica**, [s. l.], v. 54, n. 329, p. 63–76, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0366-69132008000100010>

PAIXÃO, Luiz Carlos Cardoso. Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de água em cerâmica vermelha. **Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT)**, [s. l.] **Dissertação (Mestrado)**, 2005.

PALOMO, A.; KRIVENKO, P.; GARCIA-LODEIRO, I.; KAVALEROVA, E.; Maltseva, O.; JIMÉNEZ, A. Fernández. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. **Materiales de Construcción**, [s. l.], v. 64, n. 315, p. e022, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>

PALOMO, Ángel; JIMÉNEZ, Ana Fernández; HOMBRADOS, Cecilio López; LLEYDA, José Luis. Railway sleepers made of alkali activated fly ash concrete. **Revista ingeniería de construcción**, [s. l.], v. 22, n. 2, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732007000200001>

PAVÍA, S.; TREACY, E. A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 39, n. 3, p. 391–398, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9033-4>

PETTERLE, Antônio; SANTIAGO, Gustavo; CHONG, Wang; SOMENSI, Luciani; TAMBORIM, Sílvia. Placas cerâmicas contendo lodo de eta e cinza de casca de arroz: correlação de suas propriedades físico-químicas com sua microestrutura. **Química Nova**, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170288>

PIMENTEL, Maurílio Gomes; VASCONCELOS, Adriano Luiz Roma; PICANÇO, Marcelo de Souza; DE SOUZA, José Victor Brasil; MACÊDO, Alcebíades Negrão. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. **Brazilian Applied Science Review**, [s. l.], v. 3, p. 895–907, 2019.

PORTELA, K. F; ANDREOLI, C. V; HOPPEN, C; SALES, A; ARON, A. Caracterização Físico-Química Do Lodo Centrifugado Da Estação De Tratamento De Água Passaúna – Curitiba-PR. **22º Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária Ambiental**, [s. l.], p. 10, 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)

RAMOS, Giovanni Antonio. **Cimento geopolimérico contendo resíduo do polimento de placas cerâmicas**. [S. l.: s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2017.

RICHTER, Carlos A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

RICHTER, Carlos A.; NETTO, Jose M. de Azevedo. **Tratamento de água: tecnologia atualizada**. 1ªed. [S. l.]: Blucher, 1991.

ROCHA, THAIS DA SILVA. **Argamassas geopoliméricas com diferentes ativadores e seus comportamentos frente à elevação da temperatura**. CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2017.

ROCHA, Guilherme Gallo Neves. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. [S. l.: s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2005.

ROCHA JUNIOR, C. A. F.; SANTOS, S. C. A.; SOUZA, C. A. G.; ANGÉLICA, R. S.; NEVES, R. F. Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica. **Cerâmica**, [s. l.], v. 58, n. 345, p. 43–52, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000100008>

RODRIGUES, FERNANDO NERIS; AMÂNCIO, Diego Vipa. Avaliação da eficiência do leito de secagem no processo de desidratação de lodo gerado nos decantadores da estação de tratamento de água. **Sustentare**, [s. l.], v. 2, n. 2, p. 183–196, 2018.

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. **Cerâmica**, [s. l.], v. 59, n. 352, p. 551–556, 2013. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/s0366-69132013000400010>

ROSARIO, Carlos Gonzalo Alvarez. **Avaliação da disposição de lodo gerado numa estação de tratamento de água em reator anaeróbio de fluxo ascendente e manto de lodo (UASB)**. São Paulo/SP: [s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2007.

ROSSA JR., J.; PORTELLA, K. F. Adição de escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I. **Cerâmica**, [s. l.], v. 58, n. 348, p. 542–548, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000400021>

ROSSETTO, Matheus. **Desenvolvimento de geopolímeros com a adição do lodo de estações de tratamento de água**. [S. l.: s. n.] **Monografia (Graduação)**, 2017.

ROSSETTO, Matheus; SENFF, Luciano; MALUTTA, Simone; MEERT, Rubia Lana Britenbach; GENTIL, Bruno Borges. Desenvolvimento de geopolímeros com a incorporação do lodo de estações de tratamento de água. *In*: ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA: INTERFACES DO CONHECIMENTO 2. [S. l.]: Atena Editora, 2019. p. 180–193. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.94219091015>

ROWLES, Matthew; O'CONNOR, Brian. Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. **Journal of Materials Chemistry**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1161–1165, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1039/b212629j>

ROYCHOWDHURY, Abhishek; SARKAR, Dibyendu; DATTA, Rupali. Remediation of Acid Mine Drainage-Impacted Water. **Current Pollution Reports**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 131–141, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0011-3>

RUVIARO, Artur Spat; SILVESTRO, Laura; SCOLARO, Taylana Piccinini; PELISSER, Fernando; GLEIZE, Philippe Jean Paul. Incorporação de lodo calcinado de estação de tratamento de água como material cimentício suplementar. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 243–260, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400470>

SAAE, Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Aracruz. **Sistemas de Tratamento de Água**. Aracruz/ES: [s. n.], 2006. Disponível em: [https://www.saaeara.com.br/arquivos/outros/Tratamento\\_de\\_Agua.pdf](https://www.saaeara.com.br/arquivos/outros/Tratamento_de_Agua.pdf)

SAIKIA, N J; SENGUPTA, P; GOGOI, P K; BORTHAKUR, P C. Cementitious properties of metakaolin – normal Portland cement mixture in the presence of petroleum effluent treatment plant sludge. [s. l.], v. 32, p. 1717–1724, 2002.

SALAZAR, Yanira Paola Chire; GUTIERREZ, Gianfranco Bryan Rondán. **Uso de lodos generados en los decantadores de una planta de tratamiento de agua potable como materia prima para la elaboración de ladrillos de construcción**. Arequipa - Perú: [s. n.], 2014.

SAMAE, Serviço de autônomo municipal de água e esgoto de Caxias dos Sul /RS. **Samae projeta reforma para dobrar volume de água tratada na ETA Celeste**

**Gobbato.** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.samaecaxias.com.br/Noticia/Exibir/43513/samae-projeta-reforma-para-dobrar-volume-de-agua-tratada-na-eta-celeste-gobbato>. Acesso em: 24 jun. 2020.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **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.** [S. l.: s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2012.

SANTOS, Ailton Dias dos. De Reciclagem Dos Resíduos. [s. l.], p. 265, 2003. Disponível em: <https://doi.org/DOI 10.1016/j.adhoc.2011.11.001>

SANTOS, Fernanda Pasini dos. **Estudo da incorporação do lodo de eta em argamassa.** [S. l.: s. n.] **Monografia (Graduação)**, 2016.

SANTOS, Fernanda Pasini dos; SILVA, Luana Dias da; SILVA, Mateus Guimarães da. **Análise físico-química do lodo gerado na eta de Caçapava do Sul-RS.** [S. l.: s. n.], 2016.

SANTOS, Sâmara Ferreira dos; MOREIRA, Luana de Almeida; GOMES, Camila Lacerda; OLIVEIRA, Rudinei Martins de; SALLES, Pedro Valle; SILVA JUNIOR, Ladir Antonio. Caracterização da cinza de casca de arroz como adição mineral ao concreto. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. e2083727, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i3.727>

SANTOS, G. Z. B.; MELO FILHO, J. A.; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado. **Cerâmica**, [s. l.], v. 64, n. 370, p. 276–283, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132018643702353>

SANTOS, G Z B; FILHO, J A Melo; MANZATO, L. Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado ( Proposal of a ceramic obtained by geopolymerization of calcined. **Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Revista Cerâmica 276-283**, [s. l.], v. 64, p. 276–283, 2018.

SANTOS, Géssica Z.B.; MELO FILHO, João A.; PINHEIRO, Mauricio; MANZATO, Lizandro. Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 249, p. 109328, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>

SANTOS, João Paulo de Oliveira; DA SILVA, Rodrigo Candido Passos; DE MELLO, Daniel Pernambucano; EL-DEIR, Soraya Giovanetti. **Resíduos sólidos: Impactos Socioeconômicos e Ambientais.** 1. ed. Recife/PE: [s. n.], 2014. v. 8769

SANTOS, S.C.A.; TORRES, P.W.T.S.; MERCURY, J.M.R.; ANGÉLICA, R.S.; Neves, R.F. Estudo cinético do processo de desidroxilação da caulinita. **Anais 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, [s. l.], v. 57, p. 1775–1787, 2013.

SCHERER, Marisa Daniele. **Caracterização óptica do diesel, biodiesel, óleo e suas misturas: Desenvolvimento de uma metodologia alternativa para a quantificação do teor de biodiesel na mistura diesel/biodiesel.** Dourados - MS: [s.

n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2011.

SHI, Caijun; JIMÉNEZ, A. Fernández; PALOMO, Angel. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>

SILVA, J S; CHOQUE FERNANDEZ, O J; COSTA, J H B; FIGUEIRA, B A; LUZ, P T S; NOGUEIRA, M H P. Caracterização Físico-Química De Lodo De Estação De Tratamento De Água (Eta) Com Tratamento Térmico a 650 C, E Suas Aplicações. **Anais do XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa**, [s. l.], v. XXVIII, p. 1–6, 2019. Disponível em: <http://www.entmme2019.entmme.org/trabalhos/072.pdf>

SILVA, Alan Rodrigo Palheta; MONTEIRO, Sergio Neves; SILVA, Alisson Clay Rios da; CÂNDIDO, Verônica Scarpini. Estudo das propriedades térmicas de geopolímeros à base de caulins e escória de alto forno. *In:* , 2019, São Paulo. **ABM Proceedings**. São Paulo: Editora Blucher, 2019. p. 1494–1502. Disponível em: <https://doi.org/10.5151/1516-392X-31688>

SILVA, E. L. G. da; MACIEL, A. P. Uso de resíduos sólidos de estação de tratamento de água como carga em blocos cerâmicos. **Cerâmica industrial**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 29–36, 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.021>

SILVA, Juliana Oliveira da; BARROS, Sâmea Valensca Alves; DANTAS, Gerbeson Carlos Batista; PIMENTEL, Patrícia Mendonça. Caracterização da cinza da casca de arroz visando aplicação na confecção de materiais alternativos para construção civil. **Revista de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18316/rca.v14i1.5296>

SILVA, N. I. Warpechowski da; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMANN, J. E.; ZWONOK, O. Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico. **Cerâmica**, [s. l.], v. 45, n. 296, p. 184–187, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69131999000600004>

SILVA, P. De; SAGOE-CRENTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 512–518, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>

SILVA, Juliane Valadares e. **Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrogênio**. [S. l.: s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2019.

SILVA, Rodrigo de Almeida; BINOTO, Julia; SOARES, Aline; MENEZES, Jean C S S.; CARISSIMI, Elvis. Regeneração de coagulante de lodo de eta por solubilização com água ácida gerada por lixiviação de rejeito de carvão. *In:* , 2017, CRICIÚMA. **V Congresso brasileiro de carvão mineral**. CRICIÚMA: [s. n.], 2017. p. 1–8.

SILVEIRA, Cristiane; KURODA, Emília Kiyomi; ABE, Camila Hiromi; YOSHIKI, Leonardo; HIROOKA, Elisa Yoko. Desaguamento do lodo de estações de tratamento de água por leito de drenagem/secagem. **Engenharia Sanitaria e**

**Ambiental**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 297–306, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000082264>

SMIDERLE, Juliana Jerônimo. **Estudo De Viabilidade Para Destinação Final Do Lodo Da Eta Laranjal / RJ**. [S. l.: s. n.] **Monografia (Graduação)**, 2016.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução á qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: [s. n.], 1996.

STEIN, Ronei Tiago. **Características de pastas de cimento portland com adição de cinza de lodo de ETA**. [S. l.: s. n.] **Dissertação (Mestrado)**, 2016.

STENDAHL, K.; FÄRM, C.; FRITZDORF, I.; ULMERT, H. The REAL process – a process for recycling sludge from water works. **Water Science and Technology**, [s. l.], v. 54, n. 5, p. 235–242, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wst.2006.567>

TAFAREL, Nathann Francisco; MACIOSKI, Gustavo; DE CARVALHO, Karina Querne; NAGALLI, André; DE FREITAS, Daiane Cristina; PASSIG, Fernando Hermes. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Revista Materia**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 974–986, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160004.0090>

TARTARI, R.; MÓDENES, A. N.; PIANARO, S. A.; DÍAZ-MORA, N. Lodo gerado na estação de tratamento de água Tamanduá, Foz do Iguaçu, PR, como aditivo em argilas para cerâmica vermelha: Parte II: incorporação do lodo em mistura de argilas para produção de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, [s. l.], v. 57, n. 344, p. 387–394, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132011000400003>

TEIXEIRA, Saulo Felício; DE MELO, Vanessa Rodrigues; SILVA, Allyson Sullyvan Rodrigues; VILELA, Delmo Roncarati; DE PÁDUA, Valter Lúcio. **Solução alternativa individual de abastecimento de água para consumo humano: tratamento de água com elevada turbidez por batelada**. [S. l.: s. n.], 2018.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Cerâmica**, [s. l.], v. 52, n. 323, p. 215–220, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132006000300016>

TEMUUJIN, Jadambaa; MINJIGMAA, Amgalan; RICKARD, William; LEE, Melissa; WILLIAMS, Iestyn; VAN RIESSEN, Arie. Preparation of metakaolin based geopolymer coatings on metal substrates as thermal barriers. **Applied Clay Science**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 265–270, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.08.015>

THOMPSON, T.J.U.; GAUTHIER, Marie; ISLAM, Meez. The application of a new method of Fourier Transform Infrared Spectroscopy to the analysis of burned bone. **Journal of Archaeological Science**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 910–914, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2008.11.013>

TORGAL, Fernando; JALALI, Said. Resistência ao ataque por ácido sulfúrico de argamassas modificadas e impregnadas com polímeros. **Revista Internacional Construlink**, [s. l.], v. 24, p. 15–24, 2010.



VASSALO, Érica Antunes de S.; AGUILAR, Maria Teresa P.; GUMIERI, Adriana Guerra. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09 a 13 de Novembro de 2014, Cuiabá, MT, Brasil**. Belo Horizonte - MG: [s. n.], 2014. Disponível em: <http://www.metallum.com.br/21cbecimat/CD/PDF/104-010.pdf>

VIEIRA, C.M.F., MARGEM, J.I., MONTEIRO, S.N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com lodo de ETA Microstructural changes of clayey ceramic incorporated with filter sludge from water treatment plant. [s. l.], p. 275–281, 2008.

VILELA, Ruan Larisson Toninato. **Avaliação do desempenho de coagulantes recuperados de lodo de eta por extração via alcalina-ácida**. Ilha Solteira - SP: [s. n.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

WAGNER, Luiz Fernando; PEDROSO, Keylla. Disposição de resíduos das estações de tratamento de água disposal of residuals from water treatment plans. [s. l.], v. 1, 2014.

WAIJAREAN, Naprarath; ASAVAPISIT, Suwimol; SOMBATSOMPOP, Kwannate; MACKENZIE, Kenneth J.D. The Effect of the Si/Al Ratio on the Properties of Water Treatment Residue (WTR)-Based Geopolymers. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 608, p. 289–294, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.608.289>

WAIJAREAN, Naprarath; ASAVAPISIT, Suwimol; SOMBATSOMPOP, Kwannate. Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 50, p. 486–491, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.047>

WESTERHOFF, Garret P.; DALY, Martin P. Water-Treatment-Plant Wastes Disposal-Part 2. **Journal - American Water Works Association**, [s. l.], v. 66, n. 6, p. 379–384, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1974.tb02050.x>

WOLFF, E.; SCHAWABE, W.K.; LANDIM, A.B.; VITORINO, M.D.; DOS SANTOS, W.L. **A substituição da argila por lodo de eta na produção de cerâmica vermelha**. Salvador - BA: [s. n.], 2007.

XU, G.R.; YAN, Z.C.; WANG, Y.C.; WANG, N. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 161, n. 2–3, p. 663–669, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.008>

YUNSHENG, Zhang; WEI, Sun; QIANLI, Chen; LIN, Chen. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 143, n. 1–2, p. 206–213, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.09.033>

ZHANG, Zuhua; WANG, Hao; PROVIS, John L.; BULLEN, Frank; REID, Andrew; ZHU, Yingcan. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 1. The activation of metakaolin with sodium hydroxide. **Thermochimica Acta**, [s. l.],

*l.*], v. 539, p. 23–33, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.03.021>

ZHAO, R.; SANJAYAN, J. G. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. **Magazine of Concrete Research**, [*s. l.*], v. 63, n. 3, p. 163–173, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/macr.9.00110>

## APÊNDICES

### APÊNDICE A: ATIVIDADE POZOLÂNICA ENSAIO DE CHAPPELLE MODIFICADO

A literatura traz limites mínimo de 436 mg de  $\text{Ca(OH)}_{2/g}$  (ALTOÉ *et al.*, 2012; GARCIA *et al.*, 2015), e assim é possível determinar ao analisar o Quadro 18, que o melhor resultado foi na temperatura de 500°C para o lodo não tratado (639,90 mg de  $\text{Ca(OH)}_{2/g}$ ) obteve-se resultado superior ao disposto na literatura e para o lodo não solubilizado (416,86 mg de  $\text{Ca(OH)}_{2/g}$ ), apresentou valor muito próximo, onde o Gráfico 1 mostra um pico aos 500°C, e depois ocorre a redução significativa, a linha de tendência do lodo não solubilizado indica que os teores tendem a reduzir com o aumento da temperatura.

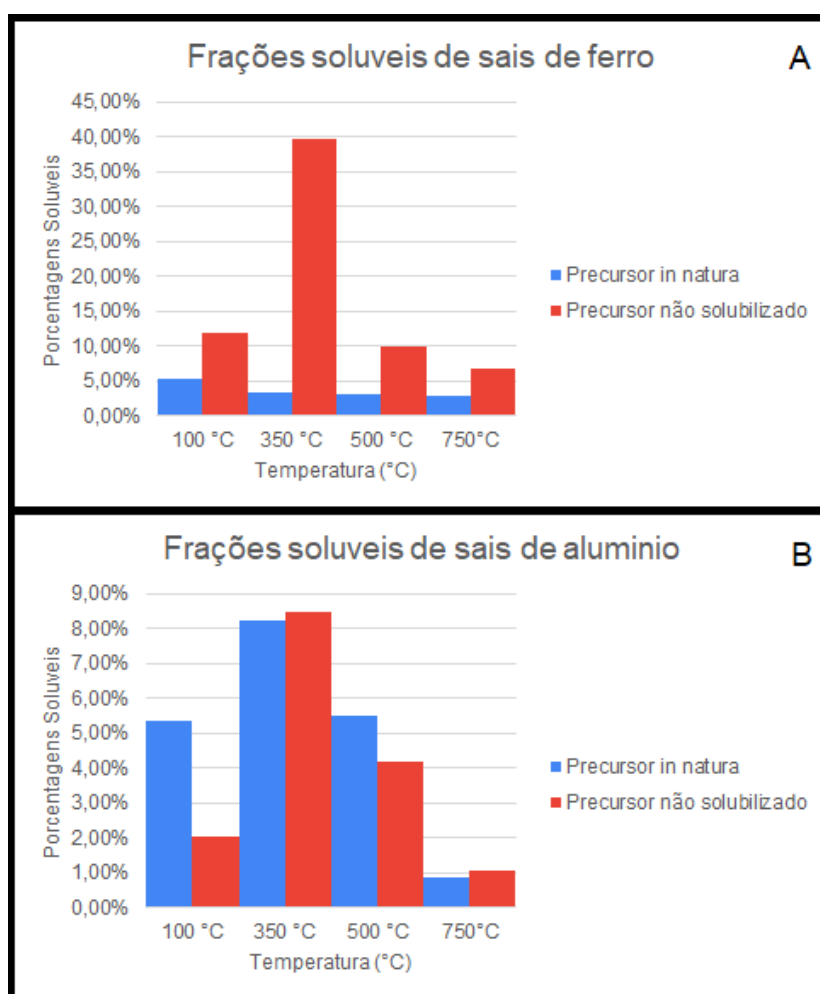
Quadro 21: Determinação da atividade pozolânica. Título completo

Resíduo		Atividade pozolânica do Chappelle ( $\text{Ca(OH)}_2$ )
Precursor in natura	100 °C	254,9
	350 °C	305,34
	500 °C	639,9
	750 °C	276,14
Precursor não solubilizado	100 °C	302,69
	350 °C	292,07
	500 °C	416,86
	750 °C	244,28
Metacaulim		493,86

## APÊNDICE B: FRAÇÕES SOLÚVEIS

O teor de ferro na amostra do precursor não solubilizado, está interligado com o ácido rico em sais de ferro ( $\text{Fe}^{+2}$  e  $\text{Fe}^{+3}$ ) utilizado para lixiviar a amostra do lodo, e assim acabou resultando na absorção de ferro pelo precursor. Isto é comprovado ao analisar a Figura 34.a, pois a amostra do precursor *in natura* apresentou teores de ferro no máximo de 5%, em quanto o precursor não solubilizado traz um pico de 39%. Com o teor de alumínio Figura 34.b, ocorre o contrario o precursor não solubilizado apresentou na temperatura de calcinação de 350°C praticamente o mesmo teor de alumínio contido no precursor *in natura*, isto indicando que nesta temperatura o alumínio tem do teor solúvel na amostra. Denotou-se também que após o pico em 350°C, ocorre o decaimento gradativo no teores de alumínio e ferro na amostra, isto indica que com o aumento da temperatura ocorre que os teores antes solúveis, passam a ser insolúveis.

Figura 30: Frações solúveis:(a) sais de ferro. (b) sais de alumínio.



APÊNDICE C: UMIDADE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA)

Quadro 22: Umidade lodo estação de tratamento de água (LETA).

LETA	Temperatura (°C)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Umidade (%)
	100	37,79	9,09	75,95
	500	99,33	26,58	73,24
LETA lixiviado com a DAM	Temperatura (°C)	Peso úmido (g)	Peso seco (g)	Umidade (%)
	100	77,29	15,48	79,97
	500	89,55	18,06	79,83