

**FACULDADE IMED  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM  
ENGENHARIA CIVIL**

**RAFAELA FONTANA CASANOVA**

**ANÁLISE DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS PRODUZIDAS COM  
CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO PRECURSOR  
ALTERNATIVO**

**Passo Fundo  
2021**

**RAFAELA FONTANA CASANOVA**

**ANÁLISE DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS PRODUZIDAS COM CINZA DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO PRECURSOR ALTERNATIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, como requisito para à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade IMED.

Orientador (a): Prof. (a) Dra. Aline Zanchet

**Passo Fundo**

**2021**

C335 CASANOVA, Rafaela Fontana  
Análise de pastas geopoliméricas produzidas com cinza de bagaço  
de cana-de-açúcar como precursor alternativo / Rafaela Fontana  
Casanova. – Passo Fundo, 2021.  
84 f.

Orientadora: Prof. Dra. Aline Zanchet.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED,  
Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia civil,  
2021.

1. Engenharia civil. 2. Geopolímeros. 3. Cana-de-açúcar. i. Zanchet,  
Aline, orientadora. ii. Título.

---

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-  
7/6283.

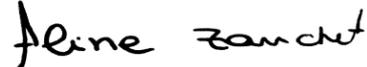
**RAFAELA FONTANA CASANOVA**

**ANÁLISE DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS PRODUZIDAS COM CINZA DE  
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO PRECURSOR ALTERNATIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-Graduação Stricto Sensu – Mestrado em Engenharia Civil – da IMED, como requisito para obtenção do grau de Mestre no curso de Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Stricto Sensu em Engenharia Civil da Faculdade IMED.

Passo Fundo, 01 de Junho de 2021.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof (ª). Dra. Aline Zanchet – Presidente



---

Prof. Dr. Márlon Augusto Longhi – Membro



---

Prof. Dr. Richard Thomas Lermen – Membro



*Aos meus pais, Jocelaine e Mauro, por sempre acreditarem em mim e por terem abdicado de seus sonhos em prol das realizações e da felicidade de suas filhas.*

*À minha irmã Daiane, por sua preocupação, orações, carinho e incentivo.*

*Aos meus sobrinhos (as) por serem meu motivo de alegria em dias em que a preocupação e o medo se faziam presentes.*

*Ao meu amado noivo Taigor por todo amor, incentivo, apoio e compreensão.*

*Nada disso teria sentido se vocês não existissem em  
minha vida!*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ser autor do meu destino. A minha família, meu pai Mauro, por ser minha referência na busca e persistência de meus sonhos. Minha mãe Jocelaine, pela constante presença, carinho e orações. Minha irmã Daiane, por todo o incentivo. Aos meus sobrinhos (as), Bernardo, Isabella e Giovanna, por serem meu motivo de alegria em dias difíceis. Meu noivo e companheiro Taigor, por todo carinho, compreensão, incentivo e paciência. A vocês a minha eterna gratidão.

A minha orientadora, Aline Zanchet, agradecê-la pelo afincamento com o trabalho, sua colaboração foi vital para a realização desta pesquisa. Agradecê-la também pela amizade e por todas as palavras de encorajamento no decorrer deste trabalho.

Aos professores Richard Lermen e Rodrigo Almeida, pelas valiosas contribuições e por sanar dúvidas que se fizeram presentes.

As minhas amigas Marinês, Lara, Jéssica, Louise e Pietra, por serem meu ponto de apoio nessa trajetória. Sem vocês essa caminhada se tornaria ainda mais difícil. Serei eternamente grata por esta amizade.

Aos funcionários do laboratório de Arquitetura e Engenharia Civil – IMED, que durante o período de moldagem e ensaios se fizeram presente.

A Faculdade IMED e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

**“Só os que se arriscam a ir longe demais  
são capazes de descobrir o quão longe se  
pode ir.”**

**Thomas S. Eliot**

## RESUMO

Geopolímeros, são uma nova classe de ligantes cimentícios que vem ganhando espaço na construção civil nos tempos atuais. Este material é formado a partir de uma reação química entre aluminossilicatos amorfos e um ativador com características alcalinas. Diversas pesquisas tem estudado este material devido a sua capacidade de minimizar os efeitos negativos ocasionados pelo processo de produção do cimento Portland, sua elevada resistência quando exposto a ambientes ácido e também devido ao potencial de incorporação de resíduos. Esta pesquisa tem como principal objetivo desenvolver um geopolímero utilizando em sua composição a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, como precursor alternativo ao metacaulim em diferentes proporções. O bagaço da cana-de-açúcar utilizado nessa pesquisa foi calcinado a uma temperatura controlada de 500°C por um período de uma hora, com a finalidade de remover a matéria orgânica encontrada no resíduo. O ativador utilizado na composição da pasta foi o silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), combinado com o hidróxido de sódio (NaOH). A pasta geopolimérica foi composta utilizando as seguintes proporções de precursores: 100/0, 75/25, 50/50 e 25/75 (metacaulim/cinza do bagaço de cana-de-açúcar). As amostras também foram ativadas com diferentes concentrações de ativador, sendo 20% e 15% de álcalis. A quantidade de silicato de sódio se manteve igual para todas concentrações, (1,0). Primeiramente o resíduo foi caracterizado através das análises de fluorescência de raio-X (FRX), difração de raio-X (DRX), granulometria a laser, análise termogravimétrica (TGA) e atividade pozolânica. Posteriormente analisou-se a pasta utilizando o ensaio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com objetivo de verificar o processo geopolimerização do material. A resistência a compressão axial dos corpos de prova foi verificada nas idades de 7, 14, 28 e 90 dias. Foi comprovado pela análise de FTIR a ocorrência da reação de geopolimerização. Observou-se que concentrações de CBC acima de 50% na mistura ocasionaram uma perda de resistência mecânica. As amostras produzidas com maiores quantidades de álcalis (20%) apresentaram melhores resultados de resistência à compressão. Os resultados obtidos mostraram que a CBC pode ser utilizada, quando em certas concentrações e condições como vistas nesse trabalho, como fonte alternativa de aluminossilicatos (precursor) na produção de geopolímeros.

**Palavras-chave:** Geopolímero. Cana-de-açúcar. Metacaulim. Resistência à Compressão axial.

## ABSTRACT

Geopolymers are a new class of cementitious binders that have been gaining ground in civil construction nowadays. This material is formed from a chemical reaction between amorphous aluminosilicates and an activator with alkaline characteristics. Several researches have studied this material due to its ability to minimize the negative effects caused by the Portland cement production process, its high resistance when exposed to acidic environments and also due to the potential of waste incorporation. The main objective of this research is to develop a geopolymer using in its composition a sugarcane bagasse ash, as an alternative precursor to metakaolin in different proportions. The sugarcane bagasse used in this research was calcined at a controlled temperature of 500 °C for a period of one hour, with a residue-free organic matter remover product. The activator used in the composition of the mass was alkaline sodium silicate ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), combined with sodium hydroxide (NaOH). The geopolymer paste was composed of the following proportions of precursors: 100/0, 75/25, 50/50 and 25/75 (metakaolin / sugarcane bagasse ash). They were also activated with different activator options, 20% and 15% alkalis. The amount of sodium silicate remained the same for all standards, (1.0). Firstly, the residue was used from the analysis of X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (XRD), laser particle size, thermogravimetric analysis (TGA) and pozzolanic activity. Subsequently, the paste was analyzed using the Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) test, in order to verify the geopolymerization process of the material. The axial compressive strength of the specimens was verified at the ages of 7, 14, 28 and 90 days. The occurrence of the geopolymerization reaction was confirmed by the FTIR analysis. Note that the CBC is above 50% in the mix will result in a loss of mechanical strength. As produced with greater amounts of alkalis (20%) better compressive strength results. The results sought that CBC can be used, when in certain steps and conditions as seen in this work, as an alternative source of aluminosilicates (precursor) in the production of geopolymers.

**Keywords:** Geopolymer. Sugarcane. Metakaolin. Resistance to Axial Compression.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Produção de geopolímeros. ....	16
Figura 2 – Fluxograma do mecanismo de geopolimerização. ....	23
Figura 3 – Bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i> . ....	31
Figura 4 - Tonalidades da cinza de cana-de-açúcar em função da temperatura de calcinação. ....	33
Figura 5 – Fluxograma experimental da pesquisa. ....	42
Figura 6 – Metacaulim (MetaMax-Basf). ....	43
Figura 7 – Bagaço de cana-de-açúcar, A) “ <i>in natura</i> ” e B) calcinada a uma temperatura controlada de 500 °C. ....	44
Figura 8 – Corpos de prova, A) 100% Metacaulim, B) 75% Metacaulim, C) 50% Metacaulim e D) 25% Metacaulim. ....	49
Figura 9 – Difratoograma da CBC. ....	53
Figura 10 – Difratoograma do Metacaulim (MetaMax – Basf). ....	53
Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica CBC. ....	55
Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica Metacaulim - Basf. ....	55
Figura 13 – Curva termogravimétrica da Cana-de-açúcar <i>in natura</i> e após a calcinação. ....	57
Figura 14 – FTIR para a concentração de álcalis de 15% e módulo de sílica 1,0. ....	59
Figura 15 – FTIR para a concentração de álcalis de 20% e módulo de sílica 1,0. ....	59
Figura 16 – Valores de resistência à compressão aos 7 dias de cura. ....	64
Figura 17 – Valores de resistência à compressão aos 14 dias de cura. ....	64
Figura 18 – Valores de resistência à compressão aos 28 dias de cura. ....	65
Figura 19 – Valores de resistência à compressão aos 90 dias de cura. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicabilidade do geopolímero de acordo com a relação Si:Al. ....	25
Tabela 2 – Comparação da composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. ....	35
Tabela 3 – Trabalhos realizados utilizando cinza de bagaço de cana-de-açúcar na composição. ....	37
Tabela 4 – Formulação empregada na pasta geopolimérica. ....	48
Tabela 5 – Composição química dos precursores. ....	51
Tabela 6 – Índice de atividade pozolânica. ....	56
Tabela 7 – Vibrações características das reações de geopolimerização. ....	58
Tabela 8 – Resistência à compressão para a concentração de álcalis de 15% e módulo de sílica 1,0. ....	61
Tabela 9 – Resistência à compressão para a concentração de álcalis de 20% e módulo de sílica 1,0. ....	62
Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão. ....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Normas Brasileiras de Regulação
CBC	Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar
CV	Cinza Volante
DRX	Difração de raios-X
DTA	Análise térmica diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
EDS	Analisador dispersivo em energia
FRX	Fluorescência de Raio X
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
M	Molaridade ou Mol/L
MK	Metacaulim
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
TGA	Análise Termogravimétrica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	14
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE GEOPOLÍMEROS .....	15
2.2 MATERIAIS ATIVADORES E PRECURSORES .....	16
<b>2.2.1 Ativador</b> .....	<b>16</b>
2.2.1.1 Silicato de sódio .....	17
2.2.1.2 Hidróxido de sódio .....	18
<b>2.2.2 Precursor</b> .....	<b>18</b>
2.2.2.1 Metacaulim .....	19
2.2.2.2 Escória de Alto Forno .....	20
2.2.2.3 Cinza Volante .....	21
2.3 PROCESSO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO .....	22
<b>2.3.1 Parâmetros que influenciam no processo de geopolimerização</b> .....	<b>24</b>
2.3.1.1 Dosagem .....	24
2.3.1.2 Quantidade de água na mistura .....	25
2.3.1.3 Processo de cura .....	26
2.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS GEOPOLÍMEROS .....	28
<b>3 CANA DE AÇÚCAR</b> .....	<b>31</b>
3.1 CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR .....	32
<b>3.1.1 Influência da temperatura de calcinação nas propriedades da cinza</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1.2 Composição química</b> .....	<b>35</b>
<b>3.1.3 Índice de Atividade Pozolânica da CBC</b> .....	<b>36</b>
3.2 ESTUDOS COM CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR .....	37
<b>3.2.1 Emprego da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em matrizes geopoliméricas</b> .....	<b>39</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	41
4.2 MATERIAIS .....	42
<b>4.2.1 Precursor</b> .....	<b>43</b>
4.2.1.1 Metacaulim .....	43
4.2.1.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar .....	43

<b>4.2.2 Ativador</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3 MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
<b>4.3.1 Caracterização dos precursores</b> .....	<b>45</b>
4.3.1.1 Fluorescência de raio-X.....	45
4.3.1.2 Difração de raio-X .....	46
4.3.1.3 Granulometria a laser .....	46
4.3.1.4 Análise termogravimétrica .....	46
4.3.1.5 Atividade Pozolânica .....	47
<b>4.3.2 Dosagem da pasta</b> .....	<b>47</b>
<b>4.3.3 Moldagem dos corpos de provas</b> .....	<b>48</b>
<b>4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS</b> .....	<b>49</b>
<b>4.4.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier</b> .....	<b>49</b>
<b>4.4.2 Resistência à compressão</b> .....	<b>50</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRECURSORES</b> .....	<b>51</b>
5.1.1 Fluorescência de raio-X.....	51
5.1.2 Difração de raio-X.....	52
5.1.3 Granulometria a laser.....	54
5.1.4 Análise termogravimétrica .....	56
<b>5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS GEOPOLÍMERICAS</b> .....	<b>58</b>
<b>5.2.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier</b> .....	<b>58</b>
<b>5.2.2 Resistência à compressão</b> .....	<b>60</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>67</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto produzido com cimento Portland se destaca por ser o principal material e o mais utilizado em canteiro de obras em todo o mundo. Nas grandes construções da antiguidade, já se encontrava misturas compostas por água, agregados e materiais aglomerantes nas estruturas. Esta mistura entre aglomerado e aglomerante combinavam de tal forma, que mesmo após séculos, algumas construções ainda resistem as ações das intempéries. A resistência mecânica aliada com a versatilidade, rapidez e o baixo custo, fazem com que a aplicação do concreto seja ampla, podendo abranger construções de pequeno porte (casa, edificação residencial, entre outras), como também construções mais robustas (viadutos, barragens e túneis) (CORDEIRO, 2006).

No primeiro trimestre do ano de 2020 a produção de cimento Portland alcançou 15,3 milhões de toneladas (CIMENTO. ORG, 2021). Em virtude desta demanda, preocupações com as questões relacionadas a sustentabilidade se fazem presentes. Os efeitos negativos ocasionados pela produção de cimento decorrem da elevada emissão de gases poluentes como gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e gás metano ( $\text{CH}_4$ ), lançados na atmosfera durante o processo de calcinação do clínquer. Também pode ser considerado um efeito negativo, o elevado consumo de energia ocasionado no processo de calcinação e a demanda excessiva de matéria-prima de fonte não renovável (MEHTA, 2010).

De acordo com Teixeira *et al.* (2020) para a produção de uma tonelada de cimento são gerados aproximadamente 600 kg de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Estima-se ainda, que no processo de calcinação do clínquer são emitidos outros gases poluentes como o dióxido de metano, dióxido de nitrogênio, entre outros.

Em virtude do exposto, a sustentabilidade das atividades voltadas a construção civil é um dos principais desafios enfrentados nos últimos tempos. A busca por desenvolvimentos de novos produtos e novas técnicas construtivas, voltadas para o uso racional dos recursos naturais ou a recuperação do meio ambiente, é urgente e necessária (PAULA, 2006). Dentro deste contexto, estudos visando a redução da produção de clínquer ou até mesmo buscando alternativas para substituição parcial e/ou total deste produto, atrelados a uma melhor resistência mecânica, vem se intensificando nos últimos anos (APOLONIO, 2017; CASTALDELLI, 2013; CORDEIRO, 2006; DUXSON *et al.*, 2007).

Uma alternativa que vem se difundindo para complementar os materiais da construção civil, com a finalidade de reduzir os efeitos negativos ocasionados pela produção do cimento Portland, são os Geopolímeros. Os geopolímeros são materiais alternativos, compostos por matérias primas, como escórias e cinzas volantes (DAVIDOVITS, 2002). Uma das principais vantagens destes ligantes ativados por álcali sobre o cimento Portland, é a sua baixa emissão de gases poluente e elevada resistência frente a agentes químicos (APOLONIO, 2017; DUXSON *et al.*, 2007). Outro ponto positivo dos geopolímeros é o fato de poder utilizar matérias primas (metacaulim, escória de alto forno e cinzas volantes), para a sua produção.

Tashima *et al.* (2012) relata que o geopolímero pode ser produzido com qualquer matéria prima inorgânica que se apresente como uma fonte de aluminossilicato e que esteja em estado amorfo. O autor ressalva ainda, que esta matéria prima pode ser de fonte agrícola, industrial ou também materiais sintéticos e naturais como é o caso das escórias de alto-forno, metacaulim e cinzas volantes.

De acordo com Vassalo (2013) e Shi, He e Angel (2012), o metacaulim é oriundo de um processo industrial de ativação a elevadas temperaturas (600 °C à 850 °C) de argilas, caulins e caulinitas. Davidovits, em suas pesquisas, utilizava esta matéria prima como fonte de aluminossilicato para produção de pastas geopoliméricas, isto porque, o metacaulim apresenta em sua composição elevadas concentrações de elementos essenciais para o processo de geopolimerização como dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Assim como o metacaulim, outros resíduos estão sendo pesquisados para utilização em pastas geopoliméricas, como é o caso dos resíduos agrícolas, representada pela cinza do bagaço de cana-de-açúcar. As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, são oriundas de um processo de queima do bagaço de cana utilizado para geração de energia. Cerca de 10% do total do bagaço queimado se torna cinza (FREITAS *et al.*, 1998). Devido às características químicas e físicas, este material vem sendo estudado para utilização em matrizes cimentícias. De acordo com Paula (2006), a utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBC) é, sem dúvida, uma forma de cooperar com a preservação do meio ambiente, dando a esta uma destinação correta, reduzindo as deposições das cinzas em locais impróprios na natureza.

Neste contexto, este estudo se justifica pela importância de analisar e entender as vantagens ocasionadas na utilização de um resíduo produzido em

grande escala no país (cinza do bagaço de cana-de-açúcar) combinado com o metacaulim, para produção de pastas geopoliméricas. Desta maneira, visando buscar uma alternativa para atenuar os impactos negativos ocasionados na produção do cimento Portland, propiciando também uma destinação ecologicamente correta para o resíduo (cinza da cana-de-açúcar). A pesquisa foi realizada a partir da caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar previamente feita por Cruz *et al.* (2019, no prelo).

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa teve como objetivo principal produzir e caracterizar pastas geopoliméricas desenvolvidas a partir da utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar como precursor substituto ao metacaulim, em diferentes proporções.

Como objetivos específicos têm-se:

- a) Verificar por meio da análise de espectroscopia de infravermelho (FTIR), a reação de geopolimerização nas amostras produzidas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar;
- b) Analisar a influência da relação de ativador alcalino utilizado, nas propriedades mecânicas da pasta;
- c) Identificar qual proporção de substituição, dentre as analisadas, apresenta melhor desempenho quanto a resistência a compressão axial.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 BREVE HISTÓRICO SOBRE GEOPOLÍMEROS

O conceito de geopolímero surgiu em 1972 através de um estudo realizado pelo professor francês Joseph Davidovits, que tinha como objetivo analisar a ativação alcalina de uma argila que apresentasse características caulínica (DAVIDOVITS, 2002). Devido aos incidentes ocasionados por incêndios na França, o pesquisador buscava desenvolver novos materiais cerâmicos compostos por materiais inorgânicos, que apresentassem uma melhor resistência ao fogo. Davidovits juntamente com um grupo de pesquisadores criaram então um material silício-aluminoso, composto por caulim e ativado alcalinamente e o denominaram geopolímero (DAVIDOVITS, 2002).

Os geopolímeros são agentes ligantes produzidos a partir de um aluminossilicato, que se consolida à temperatura ambiente em um curto período (2 a 48 horas) e apresentam baixo impacto ambiental quando comparados com o cimento Portland. Em seu processo de produção, a baixa emissão de gases poluentes como (CO<sub>2</sub>) apresenta-se com uma vantagem significativa, visto que, reduz 80 a 90% a emissão de gases poluentes na atmosfera (DAVIDOVITS, 2002).

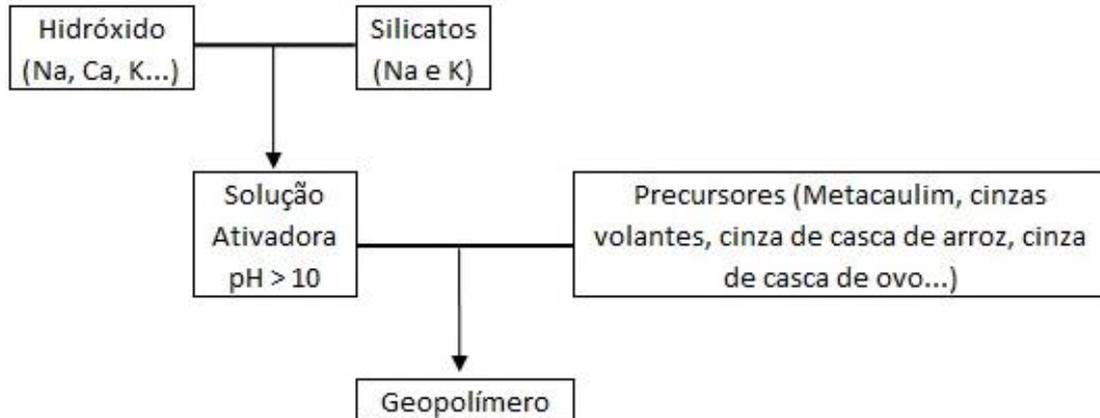
Outros fatores que tornam o geopolímero um material competitivo com os concretos e argamassas produzidas com o cimento Portland, é o fato de apresentar resultados expressivos de resistência à compressão, baixa permeabilidade (por ser um material denso), baixa fissuração e maior resistência ao ataque de agentes com caráter agressivo (LIVI, 2013).

Entretanto, a tecnologia de ativação dos materiais geopoliméricos leva em consideração mais variáveis a serem analisadas no processo de dosagem. Diferente das misturas compostas por cimento Portland, onde os únicos parâmetros a serem analisados são a relação água/aglomerante, as variáveis analisadas na dosagem do geopolímero analisam: o teor da solução de ativação, os silicatos solúveis presentes, a concentração de álcalis, a quantidade de água e as características químicas e físicas dos precursores utilizados (DUXSON *et al*, 2007; PROVIS; BERNAL, 2014).

Os geopolímeros são normalmente produzidos pela combinação de um material denominado precursor, com um reagente químico altamente alcalino chamado de ativador (BELL; DRIEMEYER; KRIVEN, 2009). Segundo Provis e Van

Deventer (2009), esta mistura entre o ativador e o precursor promove o processo de geopolimerização. Apolônio (2017) ilustra de maneira simplificada o processo de obtenção de um geopolímero, como é visto na Figura 1.

Figura 1- Produção de geopolímeros.



Fonte: APOLONIO (2017).

Os produtos de reação dos geopolímeros são formados por uma estrutura tridimensional em fase amorfa e sua microestrutura dependerá das características (físicas e químicas) do precursor utilizado (metacaulim, escória de alto forno, cinzas volantes, entre outros), da concentração de álcalis e cura (temperatura e tempo) (PROVIS, BERNAL 2014; YAO, ZHANG, ZHU E CHEN 2009 E LONGHI 2015). Longhi (2015) ressalva ainda que, o produto de reação N-A-S-H (N= Na<sub>2</sub>O, A= Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S= SiO<sub>2</sub>, H= H<sub>2</sub>O) ocorre entre o álcali ativador e a fonte de aluminossilicato presentes na mistura.

## 2.2 MATERIAIS ATIVADORES E PRECURSORES

### 2.2.1 Ativador

Davidovits (1982 e 2002), explica que a ativação alcalina é originada por um processo químico de polimerização oriundo da combinação de uma fonte rica em aluminossilicato e uma solução com pH de valor alto, produzida através de um metal alcalino. A união desses componentes gera um material cimentante, o geopolímero.

As propriedades mecânicas dos geopolímeros são influenciadas diretamente pela natureza e concentração dos ativadores utilizados. Desta forma, a dosagem do

ativador utilizado não poderá estar em excesso e nem em falta na composição da mistura, visto que a resistência do geopolímero estará comprometida, necessitando assim de mais temperatura ou tempo para a evaporação da água encontrada em excesso na mistura, em virtude da maior viscosidade da solução (LIVI, 2013).

Dentre os ativadores tradicionalmente empregados, pode-se citar os hidróxidos alcalinos ( $\text{Ca (OH)}_2$ , KOH, NaOH) e também os silicatos ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Os silicatos e hidróxidos podem ser empregados a mistura separadamente ou combinados (LONGHI, 2015). Por serem materiais de fácil acesso e amplamente utilizados na composição dos geopolímeros, serão utilizados dois ativadores combinados na presente pesquisa, o hidróxido de sódio e o silicato de sódio.

#### 2.2.1.1 Silicato de sódio

Os silicatos mais comumente encontrados são a base de potássio e sódio. No entanto, devido ao processo de fabricação do silicato de sódio ser simplificado, o custo para aquisição deste material torna-se mais acessível quando comparado com materiais a base de potássio (LONGHI, 2015).

Quando comparado com os demais materiais utilizados na composição dos geopolímeros, o silicato de sódio é o material que mais agrega custo. Sua produção se dá a partir da calcinação de um carbonato oriundo da sílica em uma temperatura de 1400 e 1500°C (PROVIS; BERNAL, 2014). Os silicatos de sódio apresentam uma boa solubilidade em água e sua viscosidade se dá em função do pH encontrado na mistura. Quanto maior o pH, maior será sua viscosidade (LONGHI, 2015).

A utilização de silicato de sódio na composição das pastas geopoliméricas resulta em benefícios a mistura, isto porque este material proporciona uma reatividade maior durante o processo de geopolimerização, formando uma pasta mais compacta. Esta reatividade acontece devido aos silicatos solúveis encontrados na mistura ( $\text{SiOH}_4$ ). Estes silicatos solúveis facilitam a formação das reações deixando o material mais denso e melhorando as características de resistência mecânica dos geopolímeros (ZHANG *et al.*, 2013).

### 2.2.1.2 Hidróxido de sódio

Os hidróxidos de sódio são produzidos a partir de um processo de eletrólise aquosa do cloreto de sódio. O consumo energético necessário para a produção do NaOH é relativamente baixo, desta forma o volume de CO<sub>2</sub> lançado na atmosfera é reduzido (PROVIS; BERNAL, 2014).

A ampla utilização de hidróxidos de sódio na composição das pastas geopoliméricas, deve-se ao custo relativamente inferior aos demais hidróxidos e devido à facilidade para aquisição (LONGHI, 2015). Segundo Provis e Bernal (2014), uma das desvantagens encontradas no ativador NaOH é a tendência em formar patologias como a eflorescência. Este fenômeno é devido à reatividade do material antes do endurecimento, ocasionando uma solução com excesso de álcalis. Em função do excesso de álcalis, o geopolímero torna-se susceptível a lixiviação com a água e a formação de eflorescência na superfície.

### 2.2.2 Precursor

Os precursores são materiais aluminossilicatos, geralmente em fase amorfa, altamente reativos e solúveis em solução alcalina. Estes aglomerantes podem ser separados em dois grupos: com baixo teor de cálcio e com alto teor de cálcio. São denominados geopolímeros os materiais cujo precursor apresenta baixo teor de cálcio, já os aglomerantes provenientes de um mineral amorfo são comumente nomeados álcali ativados (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009).

De acordo com Shi *et al.* (2012), todo material aluminossilicato pode ser alcalinamente ativado. Para isso, o autor ressalta que é necessário o material apresentar uma alta solubilidade em meios básicos e também uma disponibilidade de elementos, como o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), em sua composição. Apolonio (2017) também ressalva que, para ocorrer uma reação geopolimérica, é necessário que o precursor apresente a soma percentual de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 80% em peso.

Tashima *et al.* (2012) em sua pesquisa, relata que qualquer material inorgânico, o qual se apresente como uma fonte de aluminossilicato no estado amorfo, pode ser empregado como precursor (matéria-prima) no processo de ativação alcalina. Esses materiais podem ser oriundos de resíduo agrícola e/ou

industrial (cinza de casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, cinza de casca de arroz, entre outros), como também, materiais de origem natural ou sintética (metacaulim, cinza volante e escória de alto-forno). Na presente pesquisa, será utilizado o metacaulim como precursor referência, em virtude disso, o mesmo será abordado com maior ênfase neste trabalho.

#### 2.2.2.1 Metacaulim

O metacaulim é um aglomerante aluminossilicato oriundo de um processo de calcinação controlada de uma argila caulínica (VASSALO, 2013). O Brasil possui a segunda maior reserva de caulim do mundo, sendo 28% de um total de 15 bilhões de toneladas existentes. A maior concentração localiza-se nos Estados Unidos, que possui uma reserva de aproximadamente 53% desta matéria prima. Responsável por 6,4% da produção de metacaulim, o Brasil encontra-se na quinta posição mundial. Os principais consumidores desta matéria prima são os setores de produção de cerâmica, tintas e papel (LONGHI, 2015).

Para a transformação de caulim para metacaulim, é necessário que o mesmo passe por um processo de calcinação a elevadas temperaturas (500°C a 850°C). Davidovits (1994b) ressalva que a transformação proporciona ao material maior reatividade com melhores propriedades pozolânicas. O autor relata ainda que o metacaulim pode apresentar diferentes propriedades físicas e químicas, como: granulometria variada, superfícies específicas, colorações variadas devido à concentração de ferro, entre outros. O principal mineral encontrado na composição do metacaulim é a caulinita, mas pode-se encontrar também traços de cristobalita, quartzo, e outros minerais como ferro (VASSALO, 2013).

Segundo Monte *et al.* (2003), a composição de óxidos presentes no metacaulim corresponde a cerca de 45,54% SiO<sub>2</sub>, 39,50% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13,96% H<sub>2</sub>O, respectivamente. Os demais elementos se encontram em menores quantidades. De acordo com Rocha e Vasconcelos (2006), os teores de dióxido silício e óxido alumínio variam entre 52 a 58% e 34 a 39%, respectivamente. Os resultados foram obtidos após a análise de três amostras de matérias-primas diferentes (Metacaulim do Brasil, Advanced Cement Technologies e Engelhard).

Devido à elevada quantidade de caulinita disponível no país, o uso deste aglomerante como matéria prima para a produção de um novo material ligante é

potencializado, desta forma, impulsionando as industriais que exploram as jazidas a aprimorarem as técnicas de exploração, reduzindo os custos de produção e, conseqüentemente o custo de comercialização do metacaulim (DUXSON *et al.*, 2007).

O metacaulim atualmente é um dos precursores mais utilizados na produção de geopolímeros. Isso ocorre devido às vantagens apresentadas por este aglomerante quando comparados com os demais. Dentre as principais vantagens, destacam-se sua elevada reatividade, características físicas e químicas satisfatórias (SHI; HE; ANGEL, 2012; PROVIS e BERNAL, 2014).

#### 2.2.2.2 Escória de Alto Forno

A escória granulada de alto forno (EGAF) é considerada um subproduto oriundo do processo de produção de ferro. Este aglomerante faz parte do grupo de precursores que apresentam em sua composição uma elevada quantidade de cálcio. Em sua composição, pode-se encontrar silicatos e sílico aluminatos de cálcio com características amorfas. A EGAF é obtida por meio da combinação entre o minério de ferro, do calcário, do coque e do dolomito empregados no alto forno durante o processo de redução do óxido de ferro (LOTHENBACH; SCRIVENER; HOOTON, 2011).

Por se tratar de subproduto proveniente de um processo de produção industrial, este material apresenta um custo reduzido quando comparado com outros tipos de precursores, como por exemplo o metacaulim. Outro ponto positivo da reutilização de material seria referente a questão ambiental. A fabricação de ferro gusa no Brasil, em 2007, alcançou a marca de 35 milhões de toneladas produzidas. A cada tonelada de ferro gusa produzido, estimasse que seja gerado aproximadamente 300kg de escória, desta forma, durante o ano de 2007 gerou-se cerca de 10,5 milhões de toneladas de escória de alto forno (MAGALHÃES, 2007).

Ainda segundo o autor supracitado, a escória de alto forno é uma matéria prima muito apreciada pelas indústrias cimenteiras, isto porque ela apresenta hidráulidade latente (capacidade de endurecer na presença de água). Em virtude desta característica, é possível substituir uma parcela relativamente grande de clínquer na composição do cimento, fazendo com que o custo de comercialização do cimento seja reduzido. De acordo com a ABNT NBR 16697: 2018, os cimentos CII-

E podem conter 35% de escória de alto forno em sua composição, já o cimento CIII contém em sua composição 70% de EGAF.

### 2.2.2.3 Cinza Volante

Assim como a escória de alto forno, a cinza volante também é considerada um subproduto proveniente de um processo de produção de eletricidade por meio da calcinação do carvão mineral. Para que a energia seja gerada, o material é submetido a um processo de calcinação a elevadas temperaturas, resultando então em materiais denominados como cinza volante (MARTINS; ARAUJO; PELLIZZARO, 2009).

As cinzas volantes (FA), do mesmo modo que a escória de alto forno (EGAF), também são utilizadas na composição do cimento Portland, podendo ser encontrada nos cimentos CII-Z, com 25% de adição, e o CP IV, que contém adição de até 50% deste material (NBR 16697:2018). A reutilização deste subproduto decorre da sua composição química, da sua finura, que se assemelha aos grãos do cimento, e da sua atividade pozolânica, visto que, na presença de moléculas de água, ela reage com os hidróxidos de cálcio formando silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) e/ou sílico aluminatos de cálcio hidratado (S-A-C-H) (GIERGICZNY, 2019).

As cinzas volantes apresentam em sua composição dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e, em algumas situações pode apresentar óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) (LIVI, 2013). De acordo com a norma ASTM C618 (2019) a porcentagem de cálcio presente na composição da cinza volante, tem influência direta na pozolanicidade do material.

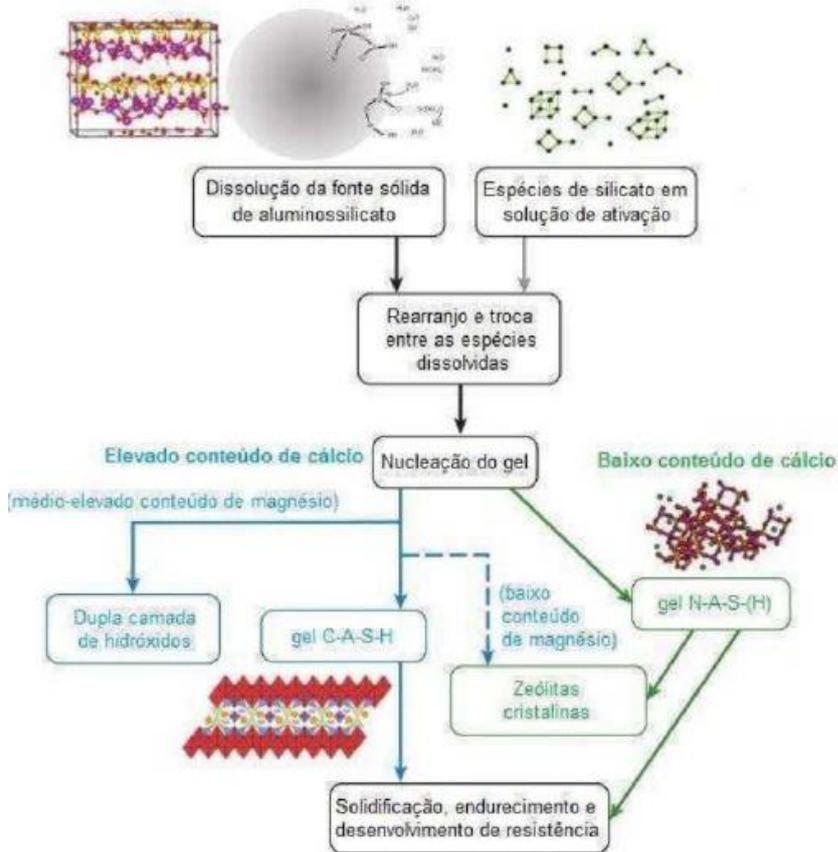
Assim como as cinzas volantes, outros materiais com características pozolânica vem sendo estudados pelos pesquisadores (cinza de casca de arroz, cinza do bagaço de cana-de-açúcar, entre outros). Pesquisas voltadas a utilização de resíduos de origem agrícola estão se intensificando devido as suas características físicas e químicas (pozolanicidade e granulometria), que se assemelham ao cimento Portland. Pode-se citar também como vantagem de substituição do agregado/aglomerante, o fato da utilização de um subproduto oriundo de um processo de produção, o que contribui para mitigar problemas de armazenagem em aterros impróprios que ocasionam na contaminação do solo (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011).

### 2.3 PROCESSO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO

O processo de geopolimerização é complexo, no entanto, com a evolução das pesquisas feitas com geopolímeros, especialmente no que se refere as técnicas de caracterização do material, o entendimento sobre o processo de geopolimerização tornou-se mais compressível (LIVI, 2013). Para que seja possível ocorrer o processo chamado de geopolimerização, é necessário que o precursor entre em contato direto com um meio aquoso altamente alcalino. Esta mistura aquosa pode ser obtida através de uma solução alcalina única ou também composta por duas substâncias combinadas, denominadas ativadores (GÖRHAN; KÜRKLÜ, 2014).

Segundo Provis e Van Deventer (2009), o processo de geopolimerização pode ser dividido em três fases: destruição-coagulação, coagulação-condensação e condensação-cristalização. No entanto, Provis e Bernal (2014) afirmam que o processo de geopolimerização consiste em quatro etapas: dissolução, precipitação de espécies ativas, condensação e ressolidificação. De acordo com a literatura, este processo de geopolimerização descrito pelos pesquisadores supracitados, é o mais aceito pelos pesquisadores. Para facilitar o entendimento do mecanismo, os autores ilustram um fluxograma das etapas, sendo este ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma do mecanismo de geopolimerização.



Fonte: PROVIS E BERNAL (2014).

Como mostra Figura 2, a primeira fase é representada pela dissolução do aluminossilicato (precursor), quando em contato direto com a solução alcalina (ativador). Por meio desta combinação, as substâncias sólidas e os componentes presentes no precursor (Si e Al) são dissolvidos e passam para a fase aquosa, ocorrendo a ruptura das ligações presentes no precursor (PROVIS; BERNAL, 2014).

A dissolução do precursor cria uma solução supersaturada de aluminossilicatos, que propicia a formação de uma cadeia por meio do rearranjo das ligações ( $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), desta forma gerando um gel polimérico (SCOPEL, 2016; LONGHI, 2015; DUXSON *et al.*, 2007; LIVI, 2013).

De acordo com Provis e Bernal (2014), a formação do gel é a etapa mais crítica no processo de geopolimerização. Na produção de geopolímeros, cujo precursor apresenta em sua composição baixo teor de cálcio, o produto gerado é o gel de aluminossilicato alcalino composto por: sílica, alumínio, sódio e água quimicamente ligados, denominado como (N-A-S-H).

A ressolidificação presente na etapa final da geopolimerização consiste na fase em que o gel, o qual estava em uma forma totalmente desordenada, forma estruturas tridimensionais por meio do processo de condensação do precursor durante a sua dissolução (PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Vale salientar que as estruturas tridimensionais são responsáveis por desenvolver as microestruturas e propiciar aos geopolímeros resistência mecânica (GARTNER; MACPHEE, 2011).

### **2.3.1 Parâmetros que influenciam no processo de geopolimerização**

#### **2.3.1.1 Dosagem**

Um dos parâmetros de crucial importância para a produção de um geopolímero, é a dosagem. Devido ao fato de não se ter, até o atual momento, uma norma específica para a produção de geopolímeros, as formas de dosagem dos mesmos são variadas. Diversos fatores podem intervir no processo de reação como: origem do precursor e ativador (reatividade e índice de amorfismo), as condições de cura (ambiente ou a elevadas temperaturas), o tempo de cura e a quantidade de água incorporada à mistura (LIVI; REPETTE, 2015; NAGHIZADEH; EKOLU, 2019).

Para produzir um geopolímero, o primeiro passo a ser seguido é a caracterização do precursor e ativador. No caso dos precursores, é crucial que se tenha conhecimento da disponibilidade de sílica e alumina disponível na sua composição, visto que, esses componentes são importantes para o ganho de resistência do geopolímero (ALVARENGA, 2018). A presença de silicatos solúveis é outro fator que deve ser levado em consideração.

De acordo com as pesquisas realizadas por Duxson *et al.* (2007), em sistemas geopoliméricos, cujo precursor apresente teor de cálcio baixo (metacaulim ou cinza volante), a incorporação de sílica na solução de ativação exerce um papel primordial no processo de geopolimerização do material. Em geopolímeros produzido com metacaulim como precursor, a adição de sílica na solução ativadora está correlacionada com a melhora das propriedades mecânicas.

No caso dos ativadores, é essencial que se conheça a natureza do íon alcalino (a base de sódio (Na) ou potássio (K)). A natureza do ativador pode influenciar na formação da estrutura molecular do gel e, desta forma, influenciar nas propriedades mecânicas do geopolímero (ALVARENGA, 2018). Geopolímeros

ativados a base de sódio apresentam propriedades superiores aos materiais ativados a base de potássio, isso porque, os ativadores a base de sódio têm a capacidade de dissolver melhor o precursor, e desta forma, aumentar a densidade do material (DUXSON *et al.*, 2007). A Tabela 1 ilustra a aplicabilidade do geopolímero em função da razão molar Si:Al.

Tabela 1 – Aplicabilidade do geopolímero de acordo com a relação Si:Al.

Relação Si:Al	Aplicabilidade
1:1	Blocos, materiais cerâmicos, proteção ao fogo
2:1	Cimento com baixo teor de CO <sub>2</sub> , encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos
3:1	Compósitos com alta resistência ao calor, equipamento de fundição, materiais compósitos a base de fibra de vidro
>3	Selagem para indústria
20:1 < 25:1	Materiais compósitos a base de fibras com elevada resistência ao fogo e ao calor

Fonte: Adaptado de ALVARENGA (2018).

Os critérios mais utilizados para dosagem são: molaridade, razão molar de alumina e sílica, mistura de ativadores, módulo sílica/sódio e o fator líquido sólido (NG *et al.*, 2018). Segundo Koshy *et al.* (2019), a forma de dosagem usualmente utilizada pelos pesquisadores é através da razão molar. Isto porque através desta metodologia é possível, com o mínimo de conhecimento sobre o material utilizado, determinar as proporções a serem utilizadas para a composição da pasta.

### 2.3.1.2 Quantidade de água na mistura

Segundo Livi (2013), a presença de água na composição da pasta geopolimérica não participa de um processo de formação de um produto de hidratação (C<sub>3</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>2</sub>S e C<sub>4</sub>AF), como ocorre na hidratação do cimento Portland, e desta forma não influencia nas propriedades mecânicas do produto final. No entanto, Longhi (2015) relata que a quantidade de água é crucial para a homogeneidade da mistura e, quando usada em pequenas proporções, esta pode ser afetada.

Santa (2012) explana em sua pesquisa que a incorporação de água pode alterar a performance dos geopolímeros. Quando utilizada em quantidade reduzida, a água pode aumentar o poder de ativação, fazendo com que a dissolução dos componentes presentes na reação (Si e Al) ocorram mais rápido e favorecendo também o grau de polimerização. O autor também relata que a resistência a compressão é um dos fatores que mais é afetado devido a variação de água.

Criado, Fernández-Jimenes e Palomo (2007) relataram a alteração na resistência mecânica dos geopolímeros em função da quantidade de água incorporada a mistura. De acordo com os autores, o teor elevado de água pode propiciar a geração de cristais maiores e, desta forma, diminuir a área de superfície específica, fazendo com que ocorra uma diminuição da resistência mecânica do geopolímero.

Ng *et al.* (2018), afirma que a presença de água na composição dos geopolímeros é um fator primordial quando se trata de resistência a compressão. Isto porque quando utilizada em maiores quantidades a água interage com o precursor criando assim um “bloqueio” na superfície e impedindo a ação do ativador, ocasionando uma perda de resistência pela não reatividade do material.

#### 2.3.1.3 Processo de cura

Nas décadas atuais, pesquisas relacionadas a geopolímeros vem se tornando mais frequentes nas instituições de ensino. Isso decorre da ampla gama de possíveis aplicações deste material, não somente em áreas relacionadas a construção civil, como também em ramos industriais (ROVNANÍK, 2010). Ainda de acordo com o autor, os geopolímeros pertencem ao grupo de materiais cimentícios de alta durabilidade e resistência, que se consolidam a temperaturas abaixo de 100 °C.

No entanto, um dos fatores que influenciam nas propriedades de durabilidade e resistências dos geopolímeros, ainda no processo de geopolimerização, é a cura da pasta. Sabe-se que a temperatura de cura é uma variável importante no preparo dos geopolímeros. Esta variável influencia não só nas propriedades (resistência a compressão, durabilidade, entre outras), mas também a sua microestrutura (densidade). Entretanto, esse parâmetro é pouco estudado pelos pesquisadores, isso porque, nas bibliografias publicadas, as diferentes condições (dosagem, tipo de

precursor/ativador, tempo de cura, entre outros), afetam na qualidade, durabilidade e resistência do material e impedem que seja possível analisar com clareza a influência da temperatura de cura no processo de geopolimerização (ROVNANÍK, 2010).

A temperatura de cura de acordo com Longhi (2015) pode acelerar o processo de dissolução do aluminossilicato e, desta forma, propiciar a pasta uma maior resistência em um curto período de tempo. Sendo assim, o geopolímero apresentará como resultado uma melhor resistência à compressão em curto prazo.

Mo *et al.* (2014) constatou em sua pesquisa que, quando submetido os geopolímeros a um processo de cura em temperatura de 60 °C, as resistências mecânicas melhoram, podendo-se obter até 100 MPa de resistência a compressão. Shi *et al.* (2012) relatam que os geopolímeros curados em temperatura ambiente apresentam menores resistências em idades iniciais (24 horas), quando comparados com os geopolímeros curados no processo de cura térmica.

De acordo com o estudo feito por Rovnaník (2010), a cura com temperatura elevada dos geopolímeros, acelera no processo de formação dos produtos de reação do gel (N-A-S-H ou C-A-S-H). O autor relata que, em temperaturas entre 60 e 80 °C, os geopolímeros atingem resistência a compressão de até 52 MPa nas primeiras 24 horas. No entanto, o autor ressalva que esta formação acelerada do produto de reação impede que a estrutura da matriz geopolimérica seja resistente e compacta. Já no processo de cura em temperatura ambiente, o processo ocorre de forma lenta durante o período de 28 dias, sendo assim, existe uma tendência de a matriz geopolimérica apresentar maiores quantidades de produtos de reação durante o processo de cura. Em virtude deste processo mais longo, originam-se geopolímeros com maiores densidades e, conseqüentemente, com menor permeabilidade, melhorando a durabilidade do geopolímero quando exposto a agentes agressivos.

De acordo com a pesquisa feita por Vaidya, Díaz e Allouche (2011), os geopolímeros, quando curados sob o calor gerado a partir de sua própria reação de polimerização exotérmica (sem o emprego de calor durante a cura), podem atingir resistências superiores a 40 MPa. Sendo assim, não se faz necessário aplicar calor durante a cura da matriz geopolimérica, podendo facilitar no processo de produção do material na construção civil. Em virtude do exposto, na presente pesquisa foi utilizado o processo de cura ambiente.

## 2.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS GEOPOLÍMEROS

Segundo Sarkar e Dana (2021), a resistência à compressão é uma das propriedades de maior importância para os geopolímeros, principalmente se estes forem utilizados com a finalidade estrutural. É por meio desta análise que é possível verificar quanto o geopolímero irá suportar de cargas antes de se romper, bem como, sua aplicação. Alguns pesquisadores relatam que a análise de resistência a compressão para os geopolímeros é imprescindível quando se quer compreendê-los (BELMOKHTAR *et al.*, 2017; CAI *et al.*, 2020; DA COSTA, 2013; DUXSON *et al.*, 2007; KAYA; SOYER-UZUN, 2016; LOT; MELCHIADES; BOSCHI, 2015; MUÑIZ-VILLARREAL *et al.*, 2011; RIELLA, 2012; ROBAYO-SALAZAR; MEJÍA DE GUTIÉRREZ; PUERTAS, 2016; SCHWAAB *et al.*, 2018).

Vassalo (2013), em sua pesquisa analisou, a resistência a compressão dos geopolímeros produzidos com metacaulim como precursor e hidróxido de sódio como ativador, nas concentrações de 12, 15 e 18 mol/L, respectivamente. Os ensaios foram realizados para as idades de 7 e 28 dias, usando o método de cura ambiente e também de cura térmica em estufa ( $85 \pm 3$  °C). Os resultados encontrados para a resistência à compressão dos geopolímeros produzidos com uma relação de 12 mol/L apresentaram um ganho de resistência significativo ao longo do período de cura, enquanto as demais amostras (15 e 18 mol/L), decresceram durante o período de 28 dias. O autor relata que a concentração molar do ativador é de suma importância para se obter geopolímeros com resistências elevadas.

Na pesquisa realizada por Muñiz-Villarreal *et al.* (2011) foram analisadas diferentes temperaturas de cura (entre 30 e 90 °C) no processo de geopolimerização. Os geopolímeros foram produzidos com metacaulim e hidróxido de sódio combinado com silicato de sódio. Os resultados obtidos mostraram que existe uma temperatura considerada “ótima” em que o geopolímero apresenta melhores resistências mecânicas. Esta análise foi realizada com a idade de cura de 7 dias. O autor ressalva que, após as temperaturas de 75 °C a 90 °C, as reações exotérmicas causam a perda rápida da água presente, propiciando a formação de micro cavidades que ocasionam no aumento da porosidade e diminuem a resistência mecânica. Os melhores resultados de resistência mecânica foram encontrados em temperaturas de 60 °C, sendo 17,87 MPa.

Rovnaník (2010) também analisou em sua pesquisa o efeito da temperatura de cura na resistência a compressão de geopolímeros produzidos com metacaulim. As temperaturas escolhidas foram 10, 20, 40, 60 e 80 °C e as idades de curas verificadas foram 1, 3, 7 e 28 dias. Os resultados de compressão encontrados para as amostras curadas a temperatura ambiente foram de 62 MPa aos 28 dias. O autor ressalva que quanto mais elevada for a temperatura, mais alto será o grau de geopolimerização e mais produtos de reações iram se formar. No entanto, para temperatura mais baixas, o desenvolvimento dos produtos de geopolimerização formam-se mais lentamente e então sua qualidade é melhor.

Chen *et al.* (2016), em sua pesquisa verificou a produção de geopolímeros produzidos com metacaulim e microesferas de vidros (utilizadas para fins de condutividade térmica), ativados por meio da combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio. Após serem realizadas análises para as temperaturas de cura de 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C e 100 °C, por períodos de cura de 24, 72 e 168 horas, os autores ressaltam que os melhores resultados obtidos em suas análises foram para as condições de cura a 60 °C por um período de 168 horas. A resistência a compressão das amostras foram de 52 MPa.

Longhi *et al.* (2019) também analisou geopolímeros a base de metacaulim, no entanto, foram verificados diferentes tipos de álcalis na ativação (sódio e potássio) em diferentes proporções (15%, 20% e 25%) e também diferentes teores de sílica solúvel, expressadas pela razão  $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$  (1,0 ,0,5 e 0,0). As temperaturas de cura também variam entre 25 °C e 50 °C. Os autores ressaltam que, a resistência a compressão do geopolímeros é diretamente proporcional à quantidade de gel formado no processo de geopolimerização. Para as concentrações verificadas na análise, os autores relataram que o aumento no teor de sílica solúvel resultou em um ganho significativo na resistência à compressão, sendo que, as amostras produzidas com teores de sílica igual a 1,0 apresentaram valores de resistência de até 3,3 vezes superior aos resultados encontrados com teores de sílica igual a 0,0. Esse aumento foi justificado devido a formação de uma estrutura mais compacta, propiciada pela utilização de um ativador rico em sílica solúvel, onde foi possível obter geopolímeros com resistência a compressão de aproximadamente 45 MPa. A proporção dos álcalis (15%, 20% e 25%), também apresentou ganho de resistência na medida que se aumentava a proporção, sendo observado um ganho de até 1,2 vezes quando comparado com as demais proporções (15% e 20%).

Diante do exposto, pode-se inferir que os geopolímeros apresentam resistências a compressão semelhantes as resistências encontradas em matrizes cimentícias compostas por cimento Portland. Desta maneira, pesquisa relacionadas a obtenção de geopolímeros são de suma importância para obtenção de materiais com melhores desempenhos e com um viés sustentável.

### 3 CANA DE AÇÚCAR

A cana-de-açúcar trata-se de uma planta cientificamente denominada *Saccharum L.*, pertencente a classe das monocotiledôneas e da família das *Gramineae*, representada também pelo milho, arroz, sorgo entre outras gramíneas. A cana-de-açúcar é originalmente cultivada no Sudeste Asiático, seu cultivo no Brasil ocorreu no período da colonização, em meados do século XVI e logo se tornou indispensável na economia do país (CASTALDELLI, 2013). Este fato se deu pela sua rápida adaptação com o clima tropical e devido a sua facilidade de emprego, podendo ser utilizada “*in natura*”, como ração para animais, ou também na sua forma mais refinada, através da produção de açúcar e álcool (CORDEIRO, 2006).

De acordo com a Conab (Companhia Nacional de Abastecimento), o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Nesta safra de 2019, a produção deste suprimento foi de cerca de 620,44 milhões de toneladas.

Durante o processo de moagem da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool, é gerado um subproduto, o bagaço de cana, ilustrado na Figura 3. A quantidade deste material chega em torno de 30% da cana moída nas indústrias sucroalcooleiras (SAMPAIO, 2013).

Figura 3 – Bagaço de cana-de-açúcar in natura.



Fonte: Autor (2021).

Devido à grande quantidade gerada deste subproduto, as indústrias utilizavam, como solução para o descarte, a queima do material e posteriormente a utilização em áreas de plantio (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011). Porém, durante as últimas décadas, as agroindústrias sucroalcooleiras do Brasil se diferenciaram dos outros países por trabalhar aspectos positivos e sustentáveis em conjunto. Além da fabricação do etanol, açúcar e álcool, o bagaço de cana-de-açúcar passou a ser empregado como matéria-prima nas usinas de cogeração de energia para produção de eletricidade, devido às suas características caloríficas. Desta forma, refletindo em alternativas com cunho sustentáveis e contribuindo de forma positiva com o meio ambiente, através da redução de combustíveis fósseis (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011).

O bagaço de cana-de-açúcar é composto por lignina e celulose quando “*in natura*”. Sua composição é constituída por 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, 2% a 3% sólidos solúveis em água e 2% a 3% de sólidos insolúveis. Quimicamente, a composição do bagaço seco consiste em 41% de celulose, 25% hemicelulose e 20% lignina (ZARDO, 2004).

No país, aproximadamente 90% de todo o bagaço gerado no processo de moagem é queimado em caldeiras para posteriormente gerar vapor. Neste processo de queima do bagaço, ocorre a produção de um segundo subproduto, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar (NUNES *et al.*, 2010).

### 3.1 CINZA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar são oriundas de um processo de geração de energia nos empreendimentos sucro-alcooleiros. Cerca de 10% do total do bagaço queimado se torna cinza. Estas cinzas geradas são utilizadas como adubo nas próprias lavouras de cultivo de cana-de-açúcar, porém, devido a sua difícil degradação e por não apresentar uma estrutura rica em nutrientes minerais, este resíduo não está sendo mais procurados pelos agricultores (FREITAS *et al.*, 1998).

Atualmente, a cinza do bagaço de cana-de-açúcar vem sendo estudada por vários grupos de pesquisadores que apresentam como foco de pesquisa o desenvolvimento de materiais para utilização na construção civil. Os estudos voltados para emprego desse resíduo em matrizes cimentícia decorre das suas

propriedades físicas e químicas que se assemelham as cinzas volantes (CASTALDELLI, 2013).

Um ponto negativo para utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar obtido por meio da calcinação nas indústrias, é que este subproduto não é considerado um material homogêneo, visto que, para ser considerado um material com estas características, é necessário controlar questões como: variáveis agrícolas, matéria-prima e temperatura. Quando calcinadas em indústrias as cinzas podem apresentar diferentes comportamentos e diferentes composições químicas devido a temperatura de queima não ser controlada. Por esses motivos a reutilização deste subproduto em determinados setores industriais como, empresas produtoras de cimento, são afetadas (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011).

### 3.1.1 Influência da temperatura de calcinação nas propriedades da cinza

De acordo com os estudos já realizados por Cordeiro, Toledo Filho e Fairbairn (2009), a calcinação do bagaço de cana-de-açúcar sob condições controladas de queima, proporcionam ao material diferentes estruturas (amorfa e cristalina). Observou-se também que quanto maior a temperatura de queima, mais cristalina fica a amostra (PAULA, 2006; CORDEIRO, 2006). A Figura 4 ilustra as etapas de calcinação do bagaço de cana-de-açúcar, bem como, as diferentes colorações do material durante o processo.

Figura 4 - Tonalidades da cinza de cana-de-açúcar em função da temperatura de calcinação.



Fonte: CORDEIRO (2006).

Na Figura 4, é possível observar as etapas de calcinação do bagaço de cana-de-açúcar, onde as temperaturas variaram de 600 °C à 800 °C respectivamente. O primeiro resíduo ilustrado apresenta o bagaço “*in natura*”, na sequência encontra-se

o material já calcinado à 600 °C com uma tonalidade escura, característica de um resíduo que não teve sua calcinação por completo e em virtude disto, apresenta um maior teor de carbono na estrutura. Na sequência é mostrado o resíduo calcinado em uma temperatura de 700 °C, com teor de carbono menor em suas propriedades, este pode ser observado através da coloração mais clara. A terceira e última cinza ilustrada, foi calcinada à 800 °C e apresenta uma coloração mais clara que as demais, podendo-se concluir que a calcinação se deu por completa (CORDEIRO, 2006).

Paula (2006), em sua pesquisa também relata as mudanças nas propriedades da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, quando calcinadas em diferentes condições de queima. De acordo com o autor, a perda de massa inicial ocorre em temperaturas de até 100°C, essa perda ocorre devido a evaporação da água absorvida pela cinza. Em temperaturas entre 400 °C e 500 °C, a perda é mais considerável, nessas condições a cinza se torna rica em sílica amorfa. A calcinação em temperaturas mais elevadas, entre 700 °C e 900 °C, pode ocorrer a formação de quartzo e apresentar sílica essencialmente cristalina.

De acordo com Chauhan e Kumar (2013), a quantidade de sílica é influenciada não somente pela temperatura de queima, como também pelo tempo de calcinação. Ainda segundo os autores, períodos mais longos em temperaturas entre 500°C e 680°C, resultam em sílica totalmente amorfa.

Segundo Cook, Pama e Paul (1977), a cinza quando calcinada a temperaturas entre 450 e 500 °C, apresenta ainda em suas propriedades químicas carbono combinado com os demais elementos. Os autores ainda relatam que a calcinação do bagaço de cana-de-açúcar em temperaturas não controladas pode conter altos teores de carbono e matéria orgânica. Paula (2006), relata que grandes quantidades de carbono nas propriedades da cinza podem ocasionar uma redução na reatividade do material.

Cordeiro (2006), em sua pesquisa, produziu cinza do bagaço de cana-de-açúcar sob condições de calcinação controladas. O autor relatou que, à medida que a temperatura de queima aumentava, ocorria uma progressiva cristalização dos compostos presentes. Em temperaturas entre 400 e 500 °C as estruturas apresentavam-se totalmente amorfas e, a partir de 600°C, já foi possível observar as fases cristalinas se formando. Já em 900 °C, a cinza apresentou picos

característicos de um material cristalino, identificado principalmente como cristobalita.

### 3.1.2 Composição química

Na Tabela 2 estão apresentados alguns trabalhos da literatura, onde é possível notar que em todos eles o elemento predominante encontrado na cinza de bagaço de cana-de-açúcar, é a sílica. Nota-se que os teores variam entre 50% e 84% em massa.

Tabela 2 – Comparação da composição química da cinza do bagaço de cana-de-açúcar.

Composto	Composição (% em massa)				
	Cordeiro (2006)	Paula (2006)	Castaldelli (2013)	Frías (2011)	Zodinio (2013)
SiO <sub>2</sub>	64,64	83,70	51,83	69,40	50,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,10	-	26,04	11,26	8,30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	6,537	11,84	5,41	1,96
CaO	6,33	1,18	3,03	2,51	5,92
Na <sub>2</sub> O	0,74	-	0,46	0,09	-
K <sub>2</sub> O	9,57	6,146	2,67	3,45	19,38
MnO	0,51	0,081	< 0,10	-	0,23
TiO <sub>2</sub>	< 0,01	1,16	0,87	1,38	0,58
MgO	9,27	-	1,05	1,28	5,55
BaO	< 0,16	-	-	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8,84	-	-	1,61	2,46

Fonte: Autor (2021).

Segundo Cordeiro (2006), a presença de sílica em grande porcentagem decorre da adsorção do silício por meio do solo pelas raízes da cana na forma de ácido monossilícico (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>). O autor relata também que este fato pode ser devido a presença de materiais como a areia aderida as raízes da cana quando não são higienizadas corretamente.

De acordo com Castaldelli (2013), as propriedades químicas, mineralógicas e morfológicas da cinza do bagaço de cana-de-açúcar influenciam significativamente as propriedades químicas e mecânicas dos concretos e argamassas. Macedo (2009) relata que as diferentes porcentagens de teores de sílica da cinza do bagaço de

cana-de-açúcar não influenciam significativamente na resistência dos geopolímeros, no entanto, as diferenças mineralógicas na forma de sílica (amorfa ou cristalina) influenciam.

Cordeiro (2006) relata que composição química encontrada na cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta-se adequada ao emprego de aditivos minerais, esse fato decorre dos teores relativamente elevados de silício e da perda ao fogo encontrados no resíduo. Porém, ele ressalta que, devido à granulometria variável do material, se faz necessário um processo de moagem controlado para que seja possível aumentar a reatividade do material pelo aumento da superfície específica das partículas.

### **3.1.3 Índice de Atividade Pozolânica da CBC**

De acordo com a NBR 12653:2012, a atividade pozolana de um material ocorre devido à presença de materiais silicosos ou silico-aluminosos (moídos), que, quando em contato com a água, reagem com os hidróxidos de cálcio presentes na composição, formando compostos com propriedades aglomerantes.

Nas pesquisas realizadas por Cincotto (1983), foi possível observar que as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar apresentam um índice de atividade pozolânica muito semelhante ao cimento pozolânico. Cordeiro (2006), em suas pesquisas sobre as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, também encontrou resultados que mostram um elevado índice de atividade pozolânica no resíduo. O autor relata ainda que a temperatura de calcinação influencia significativamente neste índice, pois quanto maior a temperatura maior será o índice de atividade pozolânica.

Melo Neto (2007) observou que, em cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), quanto menor a finura do material, maior será a atividade pozolânica. Cordeiro e Kurtis (2017) também obtiveram resultados semelhantes, os autores analisaram a reatividade pozolânica de cinzas de cana-de-açúcar pelo método de Chapelle modificado e observaram que, quanto mais fino for o material, maior será sua reatividade pozolânica.

### 3.2 ESTUDOS COM CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Devido a disponibilidade de cinza de bagaço de cana-de-açúcar e pelas propriedades físicas e químicas do material, diversos pesquisadores vêm estudando o potencial da utilização do resíduo quando incorporado em diferentes misturas, como mostra Tabela 3.

Tabela 3 – Trabalhos realizados utilizando cinza de bagaço de cana-de-açúcar na composição.

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Estudo</b>
ZARDO <i>et al.</i>	2004	Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento
PAULA	2006	Substituição parcial do cimento Portland por cinza do bagaço de cana-de-açúcar
SALES; LIMA	2010	Uso da cinza de cana de açúcar em substituição a areia na composição do concreto
FARIA; GURGEL; HOLANDA	2012	Reutilização de resíduos de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na produção de tijolos de barro
CASTALDELLI	2013	Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar
MARTINS; ALTOÉ	2015	Utilização de cinza de bagaço de cana-de-açúcar na moldagem de blocos de concreto para pavimentação
MOLIN FILHO <i>et al.</i>	2019	Concreto autoadensável produzido com cinza de bagaço de cana-de-açúcar

Fonte: Autor (2021).

De acordo com o trabalho realizado por Zardo *et al.* (2004), que tinha como objetivo verificar o potencial das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar já calcinado com diferentes tempos de moagem, como *filler* em compósitos cimentícios, as cinzas apresentaram resultados satisfatórios. Porém, o autor ressalva que, para os resultados serem mais satisfatórios, deve ser feito um controle efetivo da temperatura de queima da cinza para que seja possível obter fases amorfas de

sílica, tornando-a mais reativa com os hidróxidos de cálcio presentes no cimento Portland hidratado.

Paula (2006) realizou em sua pesquisa a avaliação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como material aglomerante, substituindo de forma parcial o cimento Portland da mistura. O autor tinha como objetivo analisar o comportamento deste resíduo quando incorporado em uma mistura cimentícia, visando uma redução do impacto ambiental ocasionado pela calcinação do clínquer. Os resultados encontrados foram satisfatórios e a cinza apresentou um índice de atividade pozolânica reativo, podendo assim substituir até 20% o cimento Portland na mistura.

O trabalho realizado por Sales e Lima (2010) tinha como finalidade estudar a substituição do agregado miúdo na mistura cimentícia por cinza do bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com os resultados obtidos pelos autores, a cinza apresenta propriedades similares as encontradas na areia natural. Os autores relatam que a substituição da areia natural por cinza melhorou os resultados de compressão das argamassas.

Faria, Gurgel e Holanda (2012) analisaram a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para substituição da argila na composição dos tijolos. Os resultados encontrados mostraram que a substituição da argila por cinza foi satisfatória, podendo substituir até 20% da argila em peso. Os autores relatam que a reutilização deste subproduto em tijolos de barros é uma alternativa viável, visto que contribui com o descarte correto deste resíduo.

Castaldelli (2013), em seu estudo, buscou desenvolver e estudar geopolímeros produzidos com cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC), devido ao fato de ser um resíduo abundante no Brasil. Os resultados obtidos na pesquisa mostraram que é possível utilizar CBC na pasta geopolimérica, porém o autor faz ressalvas. Para que seja possível obter bons resultados, é necessário que a cinza passe por alguns tratamentos (moagem, secagem e queima da matéria orgânica).

O estudo realizado por Martins e Altoé (2015) tinha como objetivo avaliar a substituição do agregado miúdo por cinza do bagaço de cana-de-açúcar na produção de blocos de concreto para pavimentação (*pavers*). De acordo com os resultados, a cinza mostrou-se um resíduo viável para substituição parcial do agregado. Ressalta-se também que a cinza pode contribuir para a redução do consumo do cimento na mistura utilizada para produção dos *pavers*, visto que, para

atender as resistências impostas pela norma, os blocos são fabricados com traços muito ricos em cimento.

Molin filho *et al.* (2019), analisou a substituição de cimento Portland por cinza de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de concreto autoadensável. O objetivo do autor era avaliar a influência da incorporação da cinza no comportamento no estado fluido do concreto. Os resultados encontrados na pesquisa foram satisfatórios, já que a cinza melhorou o comportamento do concreto, tornando-o mais coeso. O autor relata também que a substituição se faz viável do ponto de vista econômico, pois, por meio desta substituição, o custo final da obra diminuiu devido o menor consumo de cimento.

### **3.2.1 Emprego da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em matrizes geopoliméricas**

No momento atual, são poucos os trabalhos relacionados a utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) como precursores (fonte de silicato) para a produção de matrizes geopoliméricas. Os trabalhos e artigos relacionados a utilização de CBC em geopolímeros estão revisados nos próximos parágrafos.

Na pesquisa realizada por Tippayasam *et al.* (2010), os geopolímeros apresentavam em sua composição cinza do bagaço de cana-de-açúcar e metacaulim combinados como precursores. A ativação da pasta foi através da solução produzida a partir do silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), combinado com hidróxido de sódio (NaOH), em uma concentração de 10 Molares. Foram utilizadas as porcentagens de 20%, 50% e 80% de cinza em substituição ao metacaulim. Os autores realizaram ensaios de absorção de água, densidade, porosidade e resistência à compressão axial aos 8 dias. Os resultados obtidos na pesquisa foram satisfatórios, sendo as resistências mecânicas encontradas de 11,13 MPa, 16,16 MPa e 2,63 MPa. Os autores ressaltam que, quando utilizado 100% da cinza do bagaço de cana-de-açúcar as resistências a compressão dos geopolímeros baixam.

Castaldelli (2013), também utilizou cinza de bagaço de cana-de-açúcar combinado com escória de alto forno em sua pesquisa. O autor relata que a cinza utilizada na composição da matriz geopolimérica apresentou alta solubilidade. As proporções de materiais utilizados foram 100/0, 85/15, 75/25 e 60/40 (escória / cinza). Os ativadores utilizados foram hidróxido de sódio e hidróxido de potássio. A

análise de resistência à compressão foi realizada aos 90 e 270 dias, respectivamente. Os autores relataram um desempenho satisfatório da cinza do bagaço de cana-de-açúcar quando combinada com escória de alto forno.

Pereira *et al.* (2015) estudaram a substituição da escoria de alto forno por cinza do bagaço de cana de açúcar, ativada por hidróxido de sódio/potássio, juntamente com silicato de sódio. As concentrações de ativação foram fixadas em 8 mol e a razão molar foi 0 e 0,5. As substituições de escória de alto forno por cinza de bagaço de cana-de-açúcar variaram entre 25%, 33% e 50%, respectivamente. As resistências à compressão foram verificadas após o tempo de cura de 90 dias. Os resultados encontrados variaram na faixa de 16 a 51 MPa. Os autores ressaltam que, após feita uma análise microestrutural das amostras, foi possível verificar que os produtos de hidratação formados na ativação da escória de alto forno não são afetados com a adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Outra propriedade que também obteve resultados positivos foi a durabilidade frente ao ataque ácido, onde obteve-se uma perda de resistência de, aproximadamente, 48,4% enquanto a amostra referência produzida com cimento Portland apresentou uma redução de 83,3%.

Fernandes Filho (2012) analisou em sua pesquisa a utilização de cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar para o emprego como precursor e como ativador alcalino na produção de materiais cimentícios ativados alcalinamente. Além do ativador produzido com o resíduo, outros dois foram utilizados, sendo estes a base de silicatos e hidróxidos de potássio e de sódio. Os precursores utilizados na pesquisa foram metacaulim, escoria de alto forno e a cinza do bagaço de cana-de-açúcar. As idades de cura para análise de resistência à compressão foram 7 e 14 dias, respectivamente. Os resultados de resistência à compressão variam entre 11,05 e 23 MPa para uma idade de cura de 14 dias. O autor ressalva que para a amostra produzida com 100% de cinza de bagaço de cana-de-açúcar, sendo o precursor e o ativador oriundo da CBC, as amostras obtiveram uma resistência de 20MPa, no entanto, este resultado só foi obtido quando a temperatura foi elevada a 180°C.

Fernandes Filho (2012), evidenciou a importância de pesquisar novos materiais que permitam avançar em novos produtos que tenham como viés o desenvolvimento de tecnologia sustentável e que, por meio deste, agreguem valor a um resíduo importante dentro da cadeia agroindustrial.

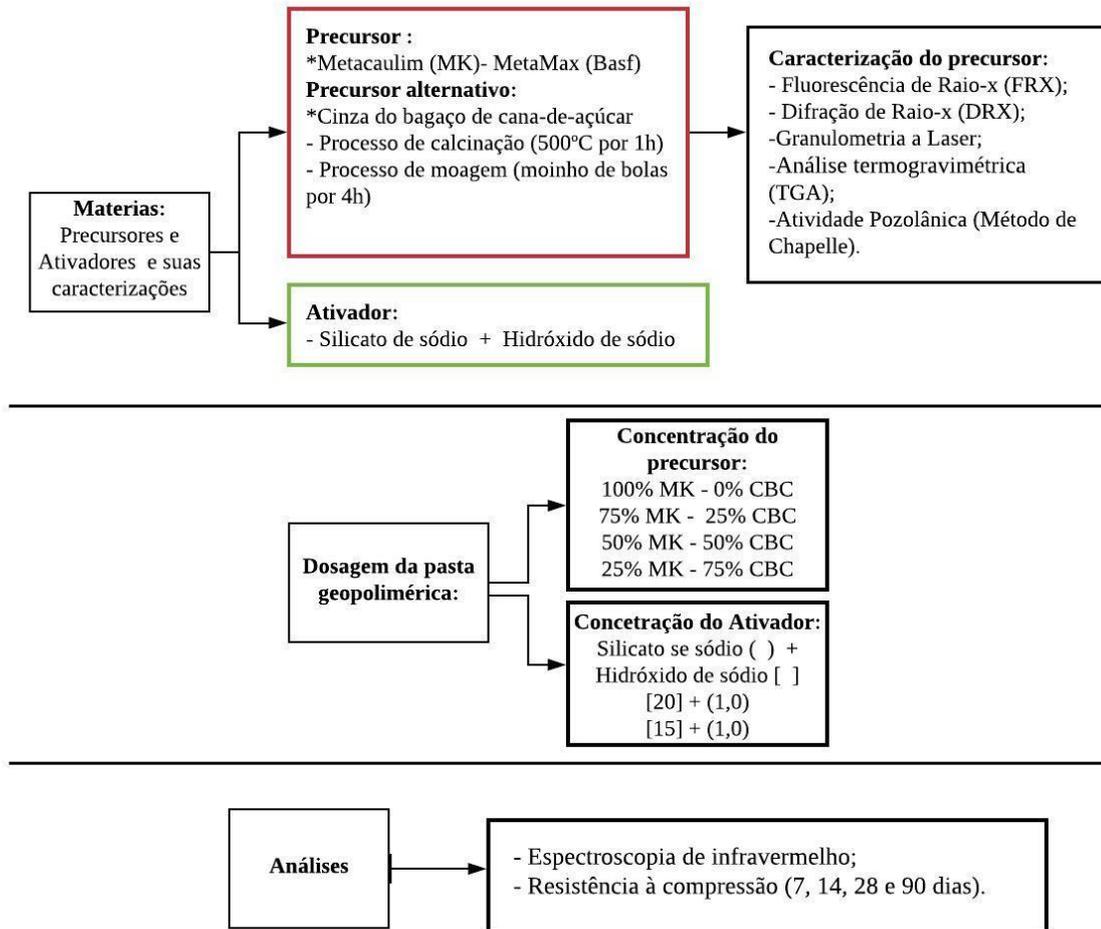
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo em vista o objetivo principal da presente pesquisa, a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como precursor alternativo para a obtenção de geopolímeros, planejou-se um programa experimental que auxiliasse o melhor entendimento dos procedimentos e ensaios adotados. A pesquisa em questão teve como foco avaliar a resistência a compressão, na medida em que aumentasse a concentração da cinza de bagaço de cana-de-açúcar na composição.

### 4.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste subitem é apresentado em formato de fluxograma, a descrição da metodologia utilizada para a caracterização dos materiais precursores (metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar), bem como, os ensaios previstos para a análise do geopolímero. A Figura 5 ilustra de forma esquemática o desenvolvimento do experimento e os procedimentos de ensaio para cada etapa do trabalho.

Figura 5 – Fluxograma experimental da pesquisa.



Fonte: Autor (2021).

## 4.2 MATERIAIS

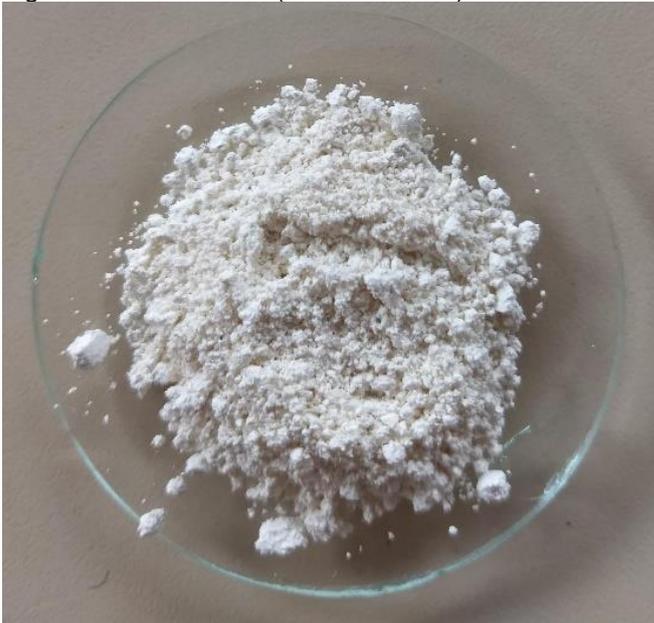
Nos subitens abaixo foi detalhado o processo de obtenção dos materiais, bem como, o processo de beneficiamento. Para uma melhor compreensão, foram divididos os materiais utilizados na composição do geopolímero como: precursor e ativador.

## 4.2.1 Precursor

### 4.2.1.1 Metacaulim

O precursor referência, utilizado como fonte de aluminossilicato na presente pesquisa, foi o metacaulim comercial (MetaMax – Basf), Figura 6. O material foi adquirido da empresa Lorama Mercosul Comercial, localizada na cidade de Cachoeirinha, no estado do Rio Grande do Sul. De acordo com a ficha técnica disponibilizada pelo fornecedor do produto, o MetaMax é composto por uma mistura mineral de alta pureza e reatividade que atende todas as especificações impostas pela ASTM C-618 Classe N.

Figura 6 – Metacaulim (MetaMax-Basf).



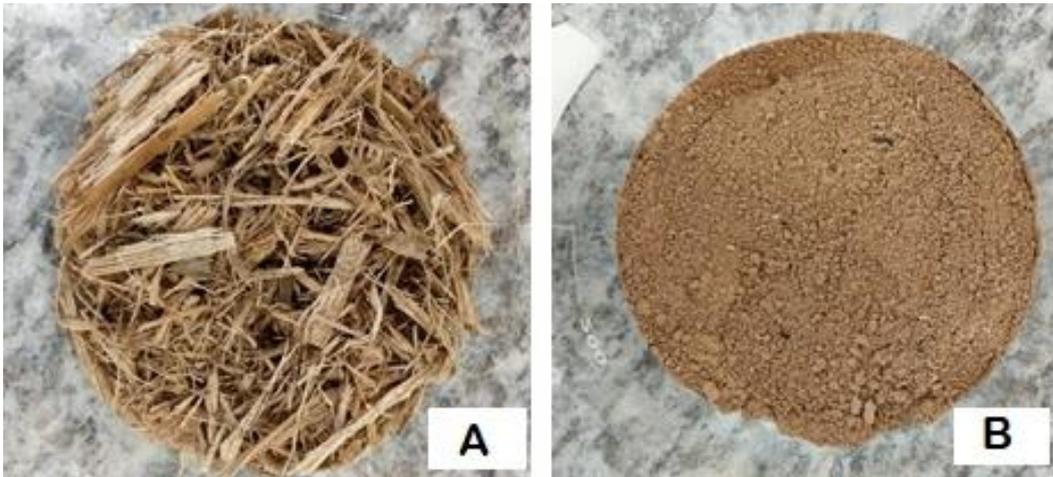
Fonte: Autor (2021).

### 4.2.1.2 Cinza do bagaço de cana-de-açúcar

O precursor utilizado como substituto ao metacaulim na composição da pasta geopolimérica foi a cinza do bagaço da cana-de-açúcar. O bagaço de cana-de-açúcar foi coletado “*in natura*” na empresa Coopercana, localizada no município de Porto Xavier no estado do Rio Grande do Sul. O processo de calcinação do material foi realizado através de uma mufla com capacidade de 1200 °C, por um período controlado de uma hora em temperatura fixa de 500 °C, com o intuito de eliminar a

matéria orgânica presente na matéria-prima (FERNANDES FILHO, 2012). A escolha da temperatura de calcinação se deu através de ensaios previamente feitos em laboratório, onde foi possível constatar que para o resíduo utilizado, a calcinação em temperatura de 500 °C apresentava uma estrutura com característica amorfa. A Figura 7 ilustra a fase “*in natura*” do resíduo (A) e após o processo de calcinação do mesmo (B).

Figura 7 – Bagaço de cana-de-açúcar, A) “*in natura*” e B) calcinada a uma temperatura controlada de 500 °C.



Fonte: Autor (2021).

A cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi submetida a um processo de moagem por um período de 4 horas no Moinho de bolas. O objetivo deste processo foi diminuir as partículas da matéria prima de modo a torná-la um resíduo mais pozolânico, visto que o tamanho das partículas é um fator que influencia no aumento da reatividade.

#### 4.2.2 Ativador

A solução ativadora empregada no estudo foi composta por silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) combinado com o hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ). A escolha dos ativadores decorre do fato de a mesma apresentar resultados satisfatórios quando empregados como ativador na mistura, como relatam os autores Kaze *et al.*, 2018; Rifaai *et al.*, 2019; Livi, 2013; Castadelli, 2013.

O hidróxido de sódio (NaOH) empregado, apresenta-se em formas de micro pérolas com 99% de pureza. O mesmo foi diluído em água distribuída pelo sistema público de abastecimento da cidade de Passo Fundo/RS.

O Silicato de sódio empregado é do tipo C-112 com densidade de 1,480 ~ 1,670 g/cm<sup>3</sup> (25 °C), pH de 12,0, viscosidade de 800 ~ 30000 cP, peso molecular de 194,00 e uma relação sílica/sódio de 2,20 com percentuais máximos de 33% de óxido de sílica (SiO<sub>2</sub>), 15,5% de óxido de sódio (NaO<sub>2</sub>).

## 4.3 MÉTODOS

### 4.3.1 Caracterização dos precursores

#### 4.3.1.1 Fluorescência de raio-X

A análise de espectrometria de fluorescência de Raio-X (FRX) consiste em uma análise quantitativa que possibilita verificar, por meio de dispersão de comprimento de onda, a composição química presente na amostra (precursor). A caracterização química do material é de extrema importância para a produção de geopolímeros, visto que, por meio desta técnica, é possível obter a concentração de óxidos presentes na amostra e, desta forma, conseguir elaborar uma dosagem eficiente da pasta. Esta análise foi realizada para os dois precursores (cinza do bagaço de cana-de-açúcar e metacaulim). O equipamento utilizado para análise foi o modelo EDX 7000 da marca Shimadzu.

Inicialmente foi realizado o teste de perda ao fogo (PF), seguindo a norma que padronizam o ensaio de perda ao fogo por ignição de materiais sólidos (ASTM D7348-07), a fim de eliminar os materiais orgânicos e água presentes no material. Após a realização da PF, as amostras foram moídas e prensadas em forma de pastilhas, para posterior realização da análise química. O ensaio foi realizado no laboratório do Centro Tecnológico SATC localizado em Criciúma no estado do Rio Grande do Sul.

#### 4.3.1.2 Difração de raio-X

A análise de difração de raio-X permite identificar a estrutura (cristalina e amorfa) dos materiais, possibilitando assim, a identificação dos minerais presentes por meio da sobreposição de picos característicos de cada material.

A composição mineralógica foi realizada no equipamento da marca Shimadzu, modelo LabX XRD-6100. O ensaio foi realizado com os precursores em formato de pó. A identificação das fases foi obtida através da comparação de difratogramas contidos no banco de dados. O ensaio foi realizado no laboratório do Centro Tecnológico SATC, localizado em Criciúma no estado do Rio Grande do Sul.

#### 4.3.1.3 Granulometria a laser

O ensaio de granulometria a laser possui a finalidade de determinar as características físicas do material, por meio do tamanho médio das partículas e sua distribuição granulométrica.

Esta análise foi realizada apenas para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, visto que, o metacaulim apresentava em sua ficha técnica, disponibilizada pelo fornecedor, o tamanho médio de suas partículas de 1,3  $\mu\text{m}$ . O equipamento utilizado para esta análise foi Bettersizer S2- WD, marca AcilWeber e a metodologia utilizada foi a seco, pelo método de Fraunhofer.

#### 4.3.1.4 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA) é uma análise térmica que permite verificar as alterações químicas na amostra por meio da variação de massa (ganho ou perda) em função da variação da temperatura e/ou do tempo. Por meio desta técnica, entende-se as mudanças que o aquecimento/resfriamento pode ocasionar na massa das substâncias, sendo assim, é possível determinar uma faixa de temperatura em que a amostra assume uma composição química constante e também a temperatura em que a amostra inicia o seu processo de decomposição (desidratação, oxidação, combustão e decomposição) (CANEVAROLO, 2004).

A análise foi realizada para determinar a perda de massa encontrada no bagaço da cana-de-açúcar *in natura* e também após o processo de calcinação à 500

°C. Para a realização do ensaio, o material encontrava-se em forma de pó. As análises foram realizadas em um analisador termogravimétrico Shimadzu TGA-50. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C min<sup>-1</sup>, sob fluxo de 50 mL min<sup>-1</sup> de nitrogênio, na faixa de temperatura entre 20 °C e 1000 °C.

#### 4.3.1.5 Atividade Pozolânica

A reatividade pozolânica dos precursores foi determinada seguindo os critérios imposto pela NBR 15895:2010, pelo método de Chappelle modificado. Este ensaio teve como objetivo verificar a reatividade pozolânica dos precursores, visto que, este parâmetro é de suma importância para materiais que tem como finalidade o uso em matrizes cimentantes.

Os resultados de pozolanidade foram obtidos com base na capacidade do material, em fixar hidróxido de cálcio quando mantido em uma solução aquosa com óxido de cálcio. A metodologia de ensaio consiste em manter uma solução com 1,000g de óxido de cálcio, 1,000g de cinza de cana-de-açúcar e 250,0g de água (isenta de dióxido de carbono). Esta solução permanece sob um aquecimento de 90°C em banho maria, durante no mínimo 16 horas. O teor de CaO livre é verificado por meio de titulação, utilizando fenolftaleína. O resultado é expresso por meio da quantidade de óxido de cálcio fixado por grama de cinza de cana-de-açúcar e, desta forma, é possível estimar a reatividade pozolânica do material. O mesmo processo foi realizado para o metacaulim. O ensaio foi realizado no laboratório de química do curso de Engenharia Civil da Faculdade Meridional – IMED, campus de Passo Fundo.

#### 4.3.2 Dosagem da pasta

Devido ao fato de, no atual momento, não se ter normativa vigentes que auxiliem no procedimento de dosagem dos geopolímeros, se faz necessário que a mesma seja calculada e testada. Para a presente pesquisa, a dosagem dos geopolímeros seguiu a dosagem proposta na pesquisa realizada pelo autor Longhi *et al.* (2019). Levou-se em consideração a razão do módulo de sílica, expresso como  $\text{SiO}_2 / \text{M}_2\text{O}$ , onde utilizou-se o valor de 1,0.

A concentração do teor de álcalis também seguiu o proposto pelo autor supracitado. Os valores adotados para composição da pasta, variaram entre  $M_2O=$  15 e 20%. As porcentagens de incorporação de cana-de-açúcar nas misturas foram respectivamente: 0% CBC, 25% CBC, 50% CBC e 75% CBC. A Tabela 4 apresenta a dosagem proposta para cada teor de álcalis, bem como, para cada porcentagem de incorporação da cinza do bagaço de cana-de-açúcar (CBC) na mistura.

Tabela 4 – Formulação empregada na pasta geopolimérica.

Descrição	Mk (g)	CBC (g)	NaOH (g)	SS (g)	H <sub>2</sub> O (g)
Geo 0% CBC [15] (1,0)	50,00	0,00	5,00	24,95	27,00
Geo 25% CBC [15] (1,0)	37,50	12,50	5,00	24,95	27,00
Geo 50% CBC [15] (1,0)	25,00	25,00	5,00	24,95	27,00
Geo 75% CBC [15] (1,0)	12,50	37,50	5,00	24,95	27,00
Geo 0% CBC [20] (1,0)	50,00	0,00	6,65	32,90	22,4
Geo 25% CBC [20] (1,0)	37,50	12,5	6,65	32,90	22,4
Geo 50% CBC [20] (1,0)	25,00	25,00	6,65	32,90	22,4
Geo 75% CBC [20] (1,0)	12,50	37,50	6,65	32,90	22,4

\* Os valores expressos com a simbologia [ ] representam a concentração de álcalis ( $NaO_2$ ) em porcentagem e os valores apresentados com a simbologia ( ) representam o módulo de sílica (MS).

Fonte: Autor (2021).

### 4.3.3 Moldagem dos corpos de provas

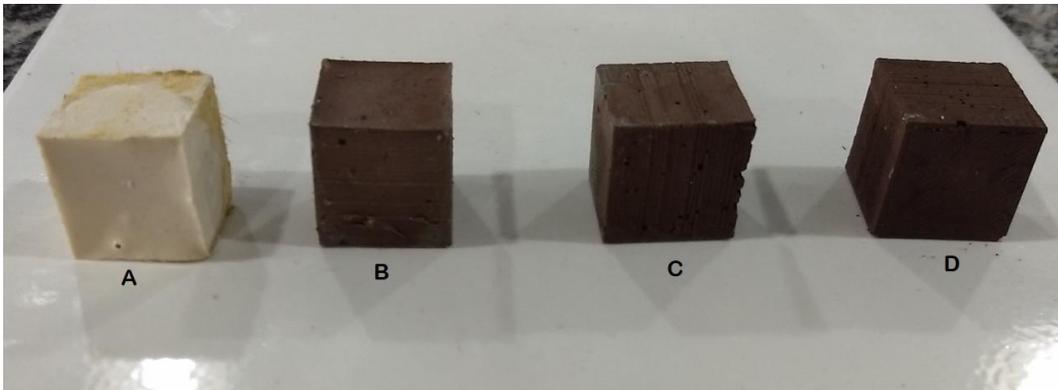
A preparação da pasta geopolimérica iniciou com o preparo da solução do ativador. Primeiramente, devido ao hidróxido de sódio ser um material sólido, o mesmo foi diluído em água previamente dosada para a mistura. Em função da reação de dissolução do hidróxido de sódio ser exotérmica, o recipiente de preparo da solução foi colocado em um recipiente com água com o intuito de mitigar o ganho de temperatura. Após o processo de dissolução, a solução permaneceu em repouso por 30 minutos. Em seguida o silicato de sódio, foi misturado junto a solução de

hidróxido de sódio. Por fim, com o auxílio de uma espátula metálica, o precursor foi adicionado no ativador sob regime de mistura constante.

Após a moldagem da pasta, os corpos de provas foram levados para mesa vibratória onde sofreram um breve adensamento de 30 segundos para que fosse melhor compactado. Em seguida, foram colocados em uma caixa lacrada com água no fundo, sem que a mesma tivesse contato com os corpos de prova. As amostras permaneceram nesta condição em temperatura ambiente de aproximadamente 23°C até a sua desforma. Depois da desforma, os corpos de prova foram embalados em plástico filme para que não houvesse a perda de umidade para o ambiente e permaneceram dentro da caixa sob as mesmas condições de cura até as idades de testes.

Foram produzidos 7 corpos de prova no formato cúbico de 20 mm por 20 mm para cada concentração proposta na presente pesquisa, totalizando 224 amostras. A Figura 8 ilustra os corpos de provas já moldados com suas respectivas composições.

Figura 8 – Corpos de prova, A) 100% Metacaulim, B) 75% Metacaulim, C) 50% Metacaulim e D) 25% Metacaulim.



Fonte: Autor (2021).

## 4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

### 4.4.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A ocorrência da geopolimerização foi avaliada por meio da espectroscopia de infravermelho com Transformada de Fourier (ATR-FTIR). Esta técnica baseia-se no fato de que cada ligação química apresenta uma frequência de vibração específica, ou seja, cada frequência de absorção presente no espectro representa uma

frequência vibracional de uma determinada parte de uma molécula presente na amostra. De acordo com Haack (2010), as ligações moleculares podem se apresentar de seis modos, sendo elas: deformação axial assimétrica, simétrica, angular simétrica no plano, angular simétrica fora do plano, angular assimétrica no plano e angular assimétrica fora do plano.

O ensaio foi realizado por meio de 64 varreduras de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  e uma resolução de 2  $\text{cm}^{-1}$ , em um equipamento espectrofotômetro de marca Nicolet 6700. Foram analisadas a superfície do material e também uma área próxima ao centro da amostra (em uma profundidade de 1 mm). Este ensaio foi realizado com o objetivo de obter informações sobre a formação das ligações feitas entre os átomos, bem como a evolução estrutural dos aluminossilicatos amorfos. Os resultados são obtidos por meio das bandas de absorção de infravermelho. Através destas diferenças de frequência de absorção, é possível identificar as transformações que ocorrem durante o processo de geopolimerização. O ensaio foi realizado para os corpos de prova com idade de 14 dias.

#### **4.4.2 Resistência à compressão**

A análise de resistência a compressão axial das amostras geopoliméricas, foi realizada em uma prensa hidráulica da marca EMIC modelo PC200C, seguindo os critérios impostos pela norma ABNT NBR 7215: 1996. A norma em questão destina-se à avaliação de amostras produzidas com cimento Portland, porém, até o atual momento, não existem padrões para a caracterização e avaliação de pastas geopolimérica.

Em virtude do exposto, será utilizado a norma supracitada como base para avaliar a resistência a compressão. Para a análise de resistência à compressão foram utilizadas sete amostras para cada traço produzido. A análise foi realizada em quatro idades diferentes, sendo elas: 7, 14, 28 e 90 dias.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRECURSORES

#### 5.1.1 Fluorescência de raio-X

A caracterização química, em termos de óxidos, foi realizada por meio da técnica de FRX, onde obteve-se os resultados mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química dos precursores.

Propriedades Físico-químicas	Valores (%)	
	Metacaulim (MetaMax)	Cinza do bagaço de cana-de-açúcar
SiO <sub>2</sub>	55,0	57,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,6	17,4
K <sub>2</sub> O	0,2	5,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41,9	4,5
CaO	0,0	4,0
TiO <sub>2</sub>	1,8	2,9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	2,1
MgO	-	1,9
SO <sub>3</sub>	0,1	1,9
MnO	0,0	0,6
Cl	-	0,2
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1	0,1
ZnO	0,0	0,1
ZrO <sub>2</sub>	0,01	0,03
SrO	0,01	0,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	0,02
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00
Massa Específica	2,50 g/cm <sup>3</sup>	2,61 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor (2021).

Como pode-se observar, os dois precursores analisados obtiveram a sílica como elemento predominante em sua composição, apresentando valores acima de 50%.

Os resultados obtidos corroboram também com os dados encontrados na literatura para a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CORDEIRO, TOLEDO FILHO, FAIRBAIRN, 2009; PEREIRA, 2014). Para que o resíduo seja considerado um material pozolânico, o somatório dos óxidos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO<sub>3</sub> deve apresentar

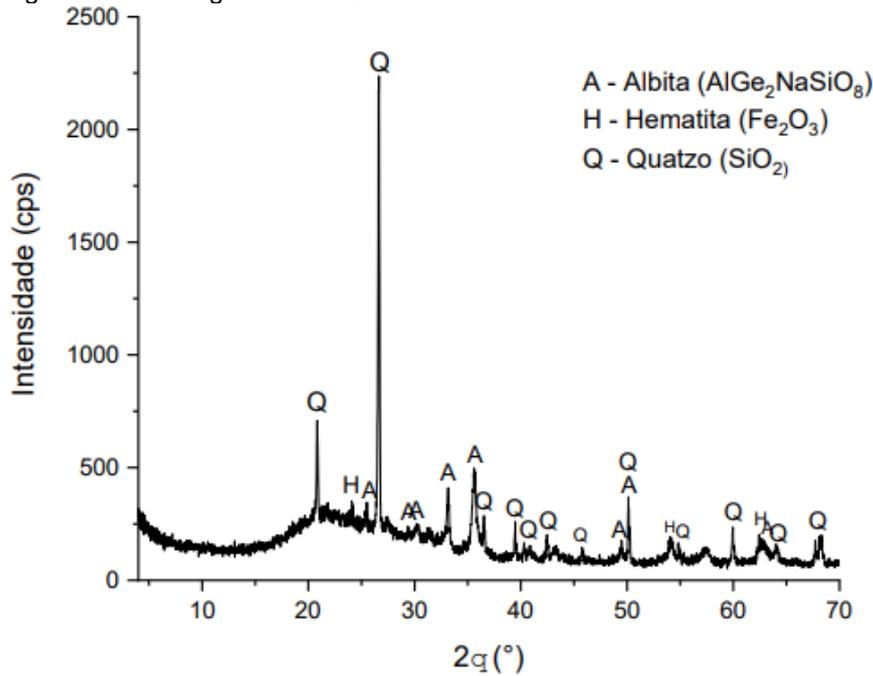
no mínimo 50% dos óxidos constituintes (ASTM C-618, 2012). Sendo assim, é possível observar que a cinza de cana-de-açúcar analisada, atende as condições impostas pela norma supracitada, apresentando um somatório de óxidos de aproximadamente, 80%. Desta forma, pode-se inferir que a CBC pode ser considerada uma fonte de silicato, podendo assim ser utilizada para obtenção de materiais álcali ativados. É possível observar também que a CBC apresenta em sua composição química um teor de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) relativamente baixo (4,5%), podendo, desta forma, favorecer para a formação dos produtos de hidratação (PEREIRA, 2014). Segundo Massazza (1998), quanto maior o teor de sílica ativa, melhor será a atividade pozolânica do precursor.

Os resultados de FRX encontrados para o metacaulim corroboram com os resultados encontrados por Longhi *et al.* (2019) em sua pesquisa. De acordo com o autor, os elementos químicos predominantes na amostra são  $\text{SiO}_2$  (54,8%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (42,5%), respectivamente, resultados estes que podem ser observados no metacaulim utilizado na presente pesquisa.

### 5.1.2 Difração de raio-X

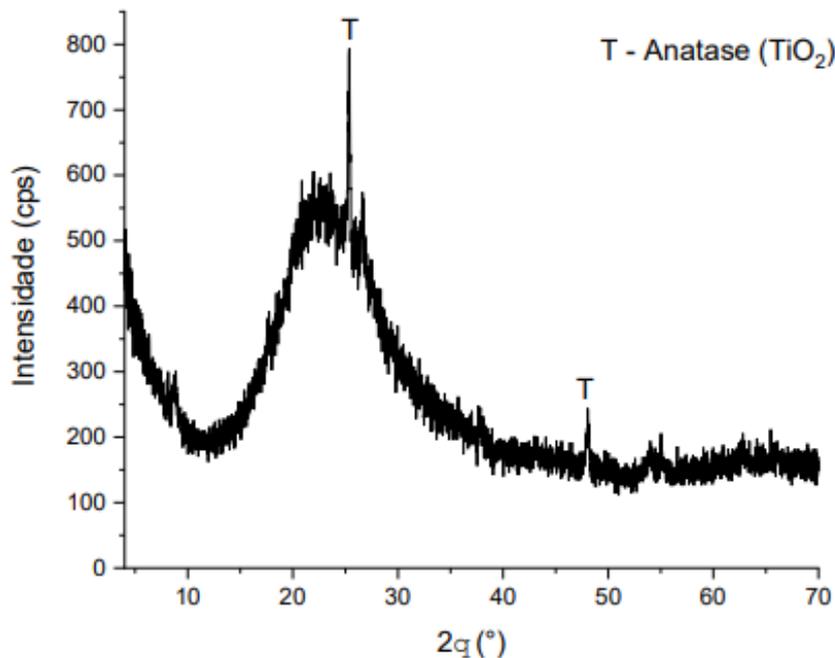
As análises de difração de raio-X dos precursores são ilustradas nas Figuras 9 e 10. Através das Figuras, é possível verificar a intensidade das fases presentes no material por meio da contagem por segundo (cps), em função do ângulo de difração,  $2\theta$  ( $^\circ$ ).

Figura 9 – Difratoograma da CBC.



Fonte: Autor (2021).

Figura 10 – Difratoograma do Metacalim (MetaMax – Basf).



Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 9, que corresponde a análise feita para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, é possível observar a presença de um halo ( $2\theta=2^\circ$  e  $2\theta=20^\circ$ ) que caracteriza a fase amorfa do material. Também é possível verificar que os picos ( $2\theta=21^\circ$  e  $2\theta=26^\circ$ ) indicam que a estrutura da CBC apresenta as fases

cristalinas da sílica na forma de quartzo (Q). Observa-se também a presença de picos de hematita (H) e albita (A) característicos em estruturas cristalinas. A presença de quartzo indica que a biomassa foi queimada a alta temperatura, o que corrobora com os resultados obtidos por Arif, Clark e Lake (2016). A grande porcentagem de quartzo na CBC pode ser proveniente da areia aderida à cana-de-açúcar durante o processo de colheita que não é totalmente retirada durante a etapa de lavagem antes da moagem da cana (XU *et al.* 2019; CORDEIRO, 2006).

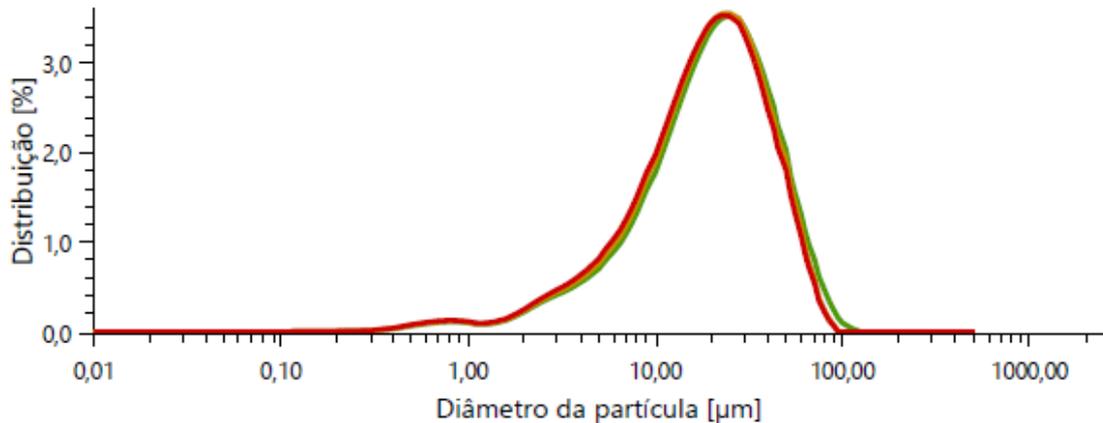
A difração de raio-X da amostra, confirmou a presença de alguns óxidos encontrados na análise química de fluorescência de raio-X feitas na cana ( $\text{SiO}_2$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Segundo Silva *et al.* (2019); Villar-Cociña *et al.* (2003); Cordeiro, Toledo Filho, Fairbairn (2009), os picos característicos encontrados nas fases cristalinas são observados na posição  $2q=26,64^\circ$  com elevada intensidade. Já o halo característico da fase amorfa da cinza pode ser encontrado entre  $2q= 06$  e  $18^\circ$ . Ainda de acordo com os autores, quanto maior a temperatura de calcinação das cinzas, maior será a tendência de cristalização.

Na análise realizada para o metacaulim (Figura 10), pode-se observar que o material apresenta-se em estado predominantemente amorfo, com um halo característico entre ( $2q=10^\circ$  e  $2q= 25^\circ$ ). Os picos cristalinos podem ser observados devido à presença de titânio ( $\text{TiO}_2$ ). Esses resultados também foram encontrados por Longhi *et al.* (2019) e Rocha e Vasconcelos (2006). Diante do exposto, pode-se inferir que resultados encontrados corroboram com os dados encontrados na literatura.

### 5.1.3 Granulometria a laser

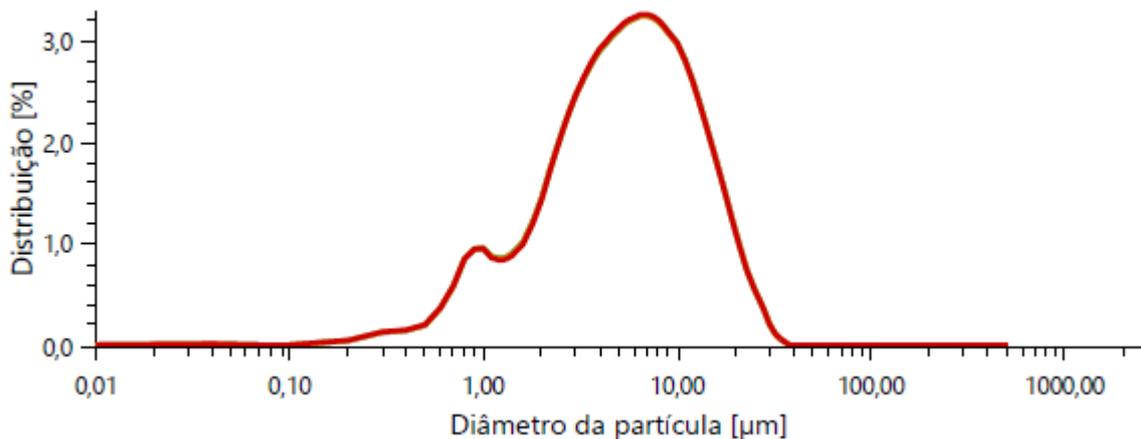
A Figura 11 mostra a distribuição granulométrica do material.

Figura 11 – Curva de distribuição granulométrica CBC.



Fonte: Autor (2021).

Figura 12 – Curva de distribuição granulométrica Metacaulim - Basf.



Fonte: Autor (2021).

Para análise da granulometria do material, foram utilizados, como parâmetros para caracterização, os valores encontrados em D10, D50 e D90, que representam os tamanhos de partículas que se encontram em 10%, 50% e 90% da massa do material, respectivamente. O tamanho médio dos grãos obtidos para a CBC foram de 23,2  $\mu\text{m}$  e para o metacaulim 6,8  $\mu\text{m}$ . Fernandes Filho (2012) relata que a granulometria do material influencia na capacidade reativa do mesmo. De acordo com Cordeiro, Toledo Filho, Fairbairn (2009), a elevada atividade pozolânica pode ser atribuída à presença de sílica amorfa no material e também ao reduzido tamanho das partículas. Os resultados encontrados para atividade pozolânica dos precursores são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Índice de atividade pozolânica.

Precursor	I Ca (OH) <sub>2</sub> (mg/g)
CBC	321,86
MK	736,48

Fonte: Autor (2021).

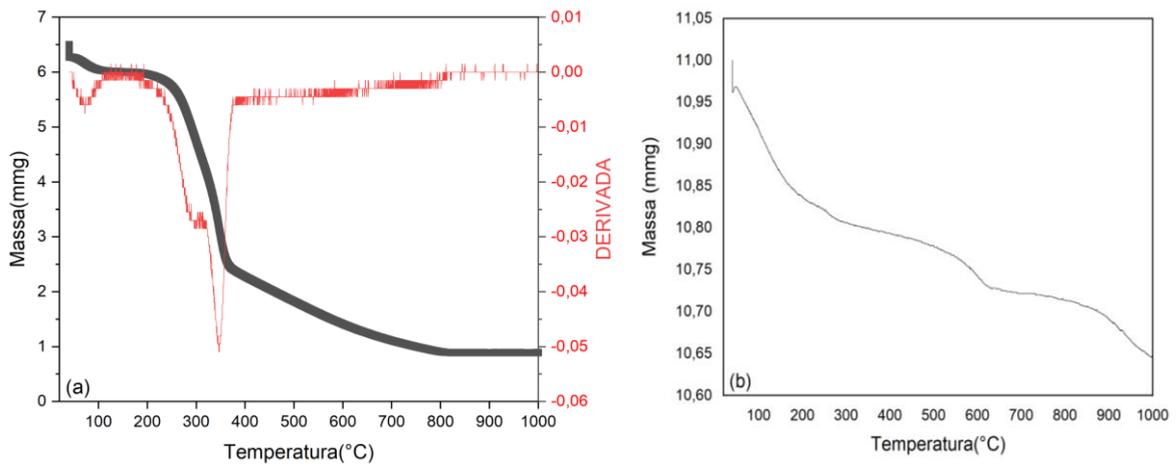
Em conformidade com as normas NBR 12653 (2014), ASTM C 618 e IS 1344 que classificam os materiais como pozolânico, o somatório dos teores de óxidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ ) deve ser superior a 70%. Tendo como base os elementos químicos encontrados na análise de FRX (Tabela 5), é possível observar que o somatório dos elementos ultrapassa ao estipulado pelas normas, sendo os valores de 97% para o metacaulim e 80% para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, podendo assim serem considerados materiais de elevada reatividade. De acordo com Macedo (2009), as reações pozolânicas estão diretamente ligadas a presença dos óxidos  $\text{SiO}_2$  e/ou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que se apresentam em estado predominantemente amorfo e não apenas na quantidade de óxidos presentes no material.

Segundo Raverdy *et al.* (1980), o índice mínimo de consumo de  $\text{Ca (OH)}_2$  para um material pozolânico deve ser de 300 mg/g utilizando o método de Chapelle modificado. Esses valores foram encontrados para ambos os precursores utilizados na pesquisa. Kawabata (2008) relata que a reatividade do precursor depende da composição química. Para a cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a reatividade é fortemente influenciada pelo produto que gerou a cinza, pelo solo e pelo processo de produção da cinza.

#### 5.1.4 Análise termogravimétrica

As Figuras 13a ilustra a decomposição do bagaço de cana de açúcar *in natura* e a Figura 13b após o processo de calcinação à 500° C

Figura 13 – Curva termogravimétrica da Cana-de-açúcar *in natura* e após a calcinação.



Fonte: Autor (2021).

Analisando a Figura 13a observa-se que, para a temperatura de 340°C, ocorreu a maior perda de massa do material (87,35%) e, após essa perda observa-se que não se obteve maiores perdas de massa na medida em que a temperatura aumentava.

A Figura 13 b apresenta os dados de perda de massa da CBC calcinada a temperatura de 500°C, quando submetidas ao ensaio de TGA. Através da análise é possível notar que houve uma perda de massa a uma temperatura de aproximadamente 144°C, esta perda diz respeito a decomposição da água intracelular na amostra. A segunda perda de massa da amostra ocorreu na temperatura de 267°C que diz respeito a decomposição da celulose presente na amostra. De acordo com Cordeiro (2006), quando submetidas as amostras de cinza do bagaço de cana-de-açúcar à uma análise térmica, os primeiros picos de perda de massa que serão encontrados estão entre as temperaturas de 50 °C e 60 °C. Isso decorre da perda de água livre presente na amostra. Outro pico característico encontrado é o pico exotérmico, localizado entre as temperaturas de 200 °C a 330 °C, por meio do qual é encontrado o carbonato de potássio. O terceiro pico relatado pelo autor é encontrado nas temperaturas acima dos 500 °C, também denominado como um pico exotérmico, oriundos da combustão do carbono presente na amostra. Para Benini (2011), a perda de massa presente entre os intervalos de 200 a 400 °C decorre da maior quantidade de materiais amorfos presentes.

Segundo Garcia-Pèrez, A Chala, Yang e Roy (2001), o primeiro pico que se é encontrado, quando submetido esse material a esta análise, localiza-se entre as

temperaturas de 200 a 300 °C e refere-se a hemicelulose. O segundo pico encontrado corresponde à degradação da celulose e também a lignina.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS GEOPOLÍMICAS

### 5.2.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A análise de espectros de FTIR de geopolímeros, segundo os pesquisadores Bigno (2008), Longhi (2015), Ozer e Uzun (2015), Tchakouté *et al.* e outros (2016a e b) e Kamseu *et al.* (2017) apresenta a caracterização das reações de geopolimerização presentes na pasta, sendo estas reações descritas na Tabela 7.

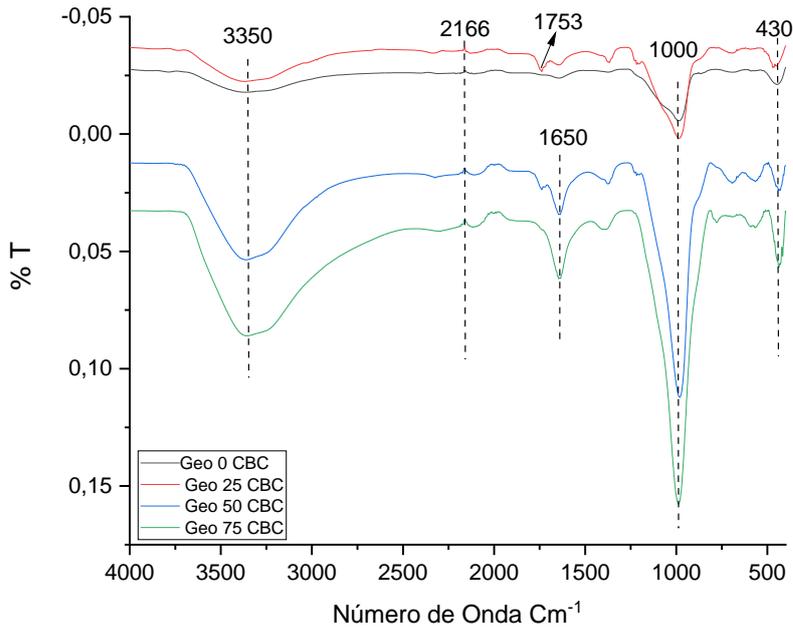
Tabela 7 – Vibrações características das reações de geopolimerização.

Vibração (cm <sup>-1</sup> )	Formação das ligações
3200	OH
2200	-OH, HOH
1650	H <sub>2</sub> O
1380	OH
1000	Si-O-Si e Si-O-Al
690	Estiramento simétrico da Si-O
450	Vibração de flexão das ligações Si-O

Fonte: Autor (2021).

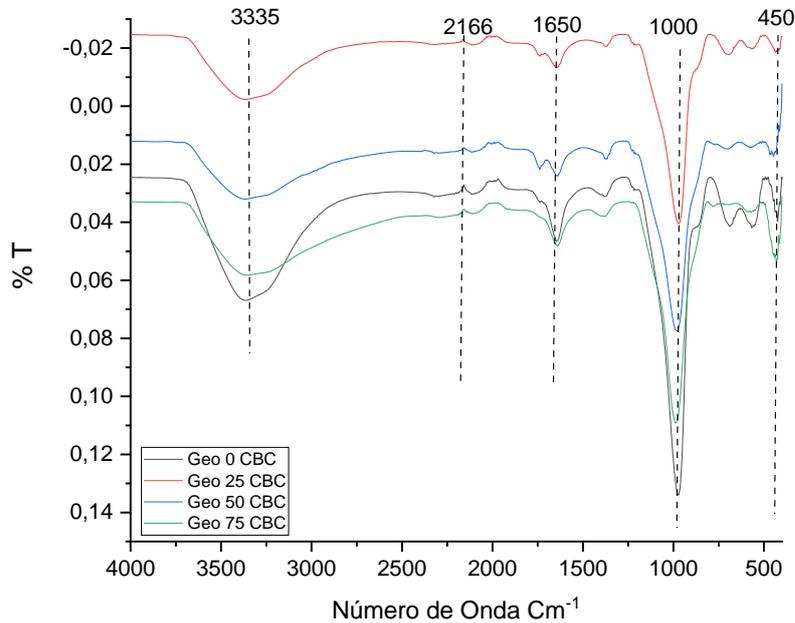
Tchakouté *et al.* (2016b) identificaram que o processo de geopolimerização gera a formação de um gel e que este pode ser comprovado através do pico entre 1001 – 1024 cm<sup>-1</sup>. Ainda, pode-se considerar o grau de geopolimerização através destes picos característicos, que são atribuídos ao estiramento assimétrico da Si-O-Si e Si-O-Al. As Figuras 14 e 15 ilustram os resultados obtidos para as amostras produzidas com as concentrações de 15 e 20% de álcalis. A análise FTIR foi realizada para as amostras com idade de 14 dias.

Figura 14 – FTIR para a concentração de álcalis de 15% e módulo de sílica 1,0.



Fonte: Autor (2021).

Figura 15 – FTIR para a concentração de álcalis de 20% e módulo de sílica 1,0.



Fonte: Autor (2021).

Na Figura 14 e 15, é possível observar que as amostras apresentaram os picos de onda em  $1001 \text{ cm}^{-1}$  que se corrobora a ocorrência do processo de geopolimerização e formação do gel, conforme dados encontrados na literatura. É possível observar também que os picos encontrados nas amostras contendo CBC apresentam vibrações semelhantes ao geopolímero composto apenas por

metacaulim como precursor (amostra referência). As bandas encontradas corroboram com os resultados encontrados na literatura. O quartzo presente nas amostras, representado pelas bandas  $430\text{ cm}^{-1}$  e  $450\text{ cm}^{-1}$ , são decorrentes da incorporação da CBC na mistura. A não absorção deste no processo de formação do geopolímero o torna visível na análise.

O processo de geopolimerização pode ser constatado devido à presença das vibrações de alongamento assimétrico (Si (Al) – O – Si), localizado em picos de  $1000\text{ cm}^{-1}$ , sendo estes provenientes de um rearranjo estrutural. De acordo com Garcia-Lodeiro *et al.* (2011) e Xu *et al.* (2010), este rearranjo evidencia a formação do gel N-A-S-H, sendo esta banda característica da ligação Si-O-Si e Si-O-Al.

Os picos entre  $3335\text{ cm}^{-1}$  a  $3350\text{ cm}^{-1}$  são característicos da Portlandita, sendo este menor na medida em que aumenta a concentração de CBC na mistura (PEREIRA, 2014).

### **5.2.2 Resistência à compressão**

Os resultados de resistência à compressão das amostras ativadas com 15% e 20% de álcalis e substituição de 0%, 25%, 50% e 75% de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, são fornecidos nas Tabelas 8 e 9, a seguir.

Tabela 8 – Resistência à compressão para a concentração de álcalis de 15% e módulo de sílica 1,0.

<b>Idade de cura (dias)</b>	<b>Concentração (%)</b>	<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	<b>Desvio padrão</b>
7	Geo 0 CBC	21,7	0,9
	Geo 25 CBC	25,3	2,8
	Geo 50 CBC	28,4	3,6
	Geo 75 CBC	28,1	1,2
14	Geo 0 CBC	34,1	3,3
	Geo 25 CBC	31,3	3,4
	Geo 50 CBC	20,9	3,5
	Geo 75 CBC	16,9	0,5
28	Geo 0 CBC	28,4	2,2
	Geo 25 CBC	26,62	1,2
	Geo 50 CBC	26,9	6,2
	Geo 75 CBC	23,9	3,9
90	Geo 0 CBC	22,7	2,1
	Geo 25 CBC	20,0	1,9
	Geo 50 CBC	16,3	0,7
	Geo 75 CBC	15,9	0,2

Fonte: Autor (2021).

Tabela 9 – Resistência à compressão para a concentração de álcalis de 20% e módulo de sílica 1,0.

Idade de cura (dias)	Concentração (%)	Resistência à compressão (MPa)	Desvio Padrão
7	Geo 0 CBC	36,1	1,2
	Geo 25 CBC	21,2	1,4
	Geo 50 CBC	24,6	6,5
	Geo 75 CBC	16,8	1,6
14	Geo 0 CBC	45,8	10,8
	Geo 25 CBC	28,6	1,9
	Geo 50 CBC	27,5	2,4
	Geo 75 CBC	21,2	0,7
28	Geo 0 CBC	45,4	3,8
	Geo 25 CBC	28,3	3,0
	Geo 50 CBC	25,0	3,0
	Geo 75 CBC	22,1	3,3
90	Geo 0 CBC	47,8	3,9
	Geo 25 CBC	32,0	2,9
	Geo 50 CBC	23,5	3,9
	Geo 75 CBC	17,8	1,6

Fonte: Autor (2021).

Analisando as resistências à compressão ilustradas nas Tabelas 8 e 9, é possível observar que os geopolímeros moldados com um maior teor de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) apresentaram resultados mais satisfatórios aos 7 dias de cura. Os resultados encontrados para a amostra de referência corroboram com o artigo utilizado como referência ao traço, Longhi *et al.* (2019). Segundo o autor, o elevado teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  ocasiona em uma maior formação de gel elevando assim a resistência. Sendo assim, quanto maior a quantidade de gel formado no processo de dissolução do precursor, mais compacta será a estrutura das reações formadas e consequentemente, mais satisfatórios serão as propriedades mecânicas do material.

Provis e Bernal (2014) afirmam que quantidades maiores de hidróxido de sódio na solução de ativação tornam mais alcalinas, promovendo uma melhor dissolução do precursor na fase aquosa e, consequentemente, facilitando a formação de gel N-A-S-H. Sendo assim, o aumento de gel formado indica que houve uma maior quantidade de produtos reagidos, podendo-se inferir, que o precursor foi dissolvido em grandes proporções e que menores quantidades de material não reativo encontram-se no interior da amostra. Puertas *et al.* (2000) afirmam que as

propriedades mecânicas dos geopolímeros são influenciadas pelas concentrações de hidróxido de sódio presente na mistura.

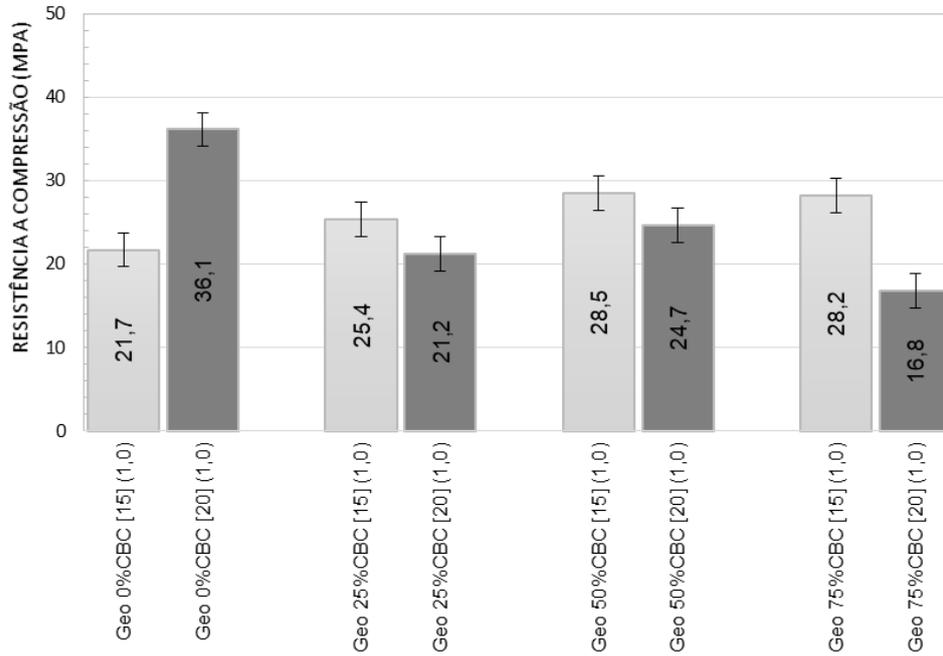
É possível observar que, na medida em que se aumenta a substituições de metacaulim por cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a resistência à compressão reduz. Esses resultados também são vistos na pesquisa realizada por Tippayasam *et al.* (2010), onde o autor relata a redução da resistência à compressão de pastas geopoliméricas aos 8 dias de cura, com substituições de 20%, 50% e 80% de metacaulim por cinza de bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com o autor, na medida em que se aumenta a concentração de cinza do bagaço de cana-de-açúcar na mistura, menor fica a resistência. Castaldelli (2013) também relata em sua pesquisa a queda da resistência à medida que acrescenta a cinza na composição da pasta.

Macedo (2009) relata em sua pesquisa que as diferenças química, mineralógica e também morfológica da cinza de bagaço de cana-de-açúcar influenciam diretamente nas propriedades mecânicas de pastas geopoliméricas.

A pesquisa realizada por Puertas *et al.* (2000) analisa diferentes parâmetros que podem influenciar nas propriedades mecânicas e também nos produtos de hidratação formados no processo de dissolução de matrizes geopoliméricas produzidas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com o autor, os fatores são: concentração alcalina, temperatura de cura e concentração de substituição do precursor por CBC, sendo esses os parâmetros que influenciam diretamente na estrutura formada. O autor relata que o produto de reação formado na estrutura é um gel C-S-H, com elevada quantidade de Al. De acordo com Zhang *et al.* (2013), a baixa resistência a compressão dos geopolímeros pode estar associada à alta porosidade e também ao fato de as ligações presentes no gel não estarem bem estruturadas.

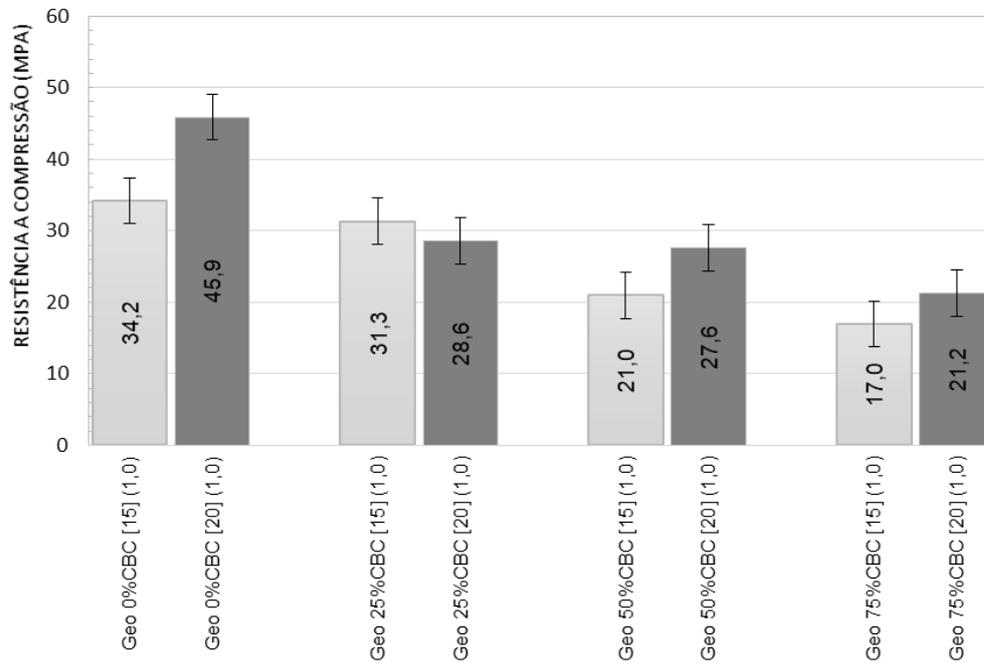
As Figuras 16, 17, 18 e 19 ilustram um comparativo entre as concentrações de ativação e o tempo de cura de cada composição.

Figura 16 – Valores de resistência à compressão aos 7 dias de cura.



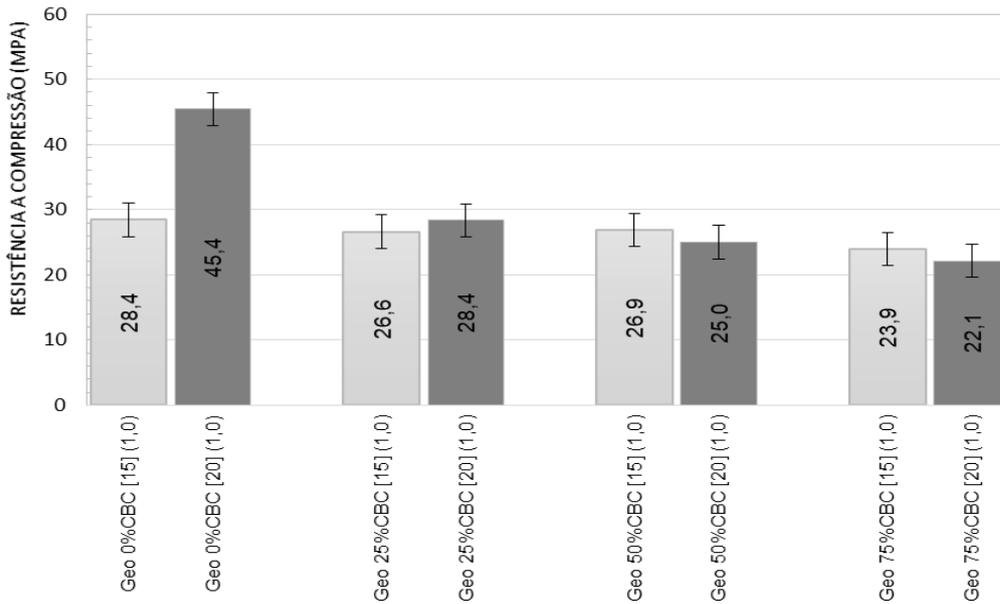
Fonte: Autor (2021).

Figura 17 – Valores de resistência à compressão aos 14 dias de cura.



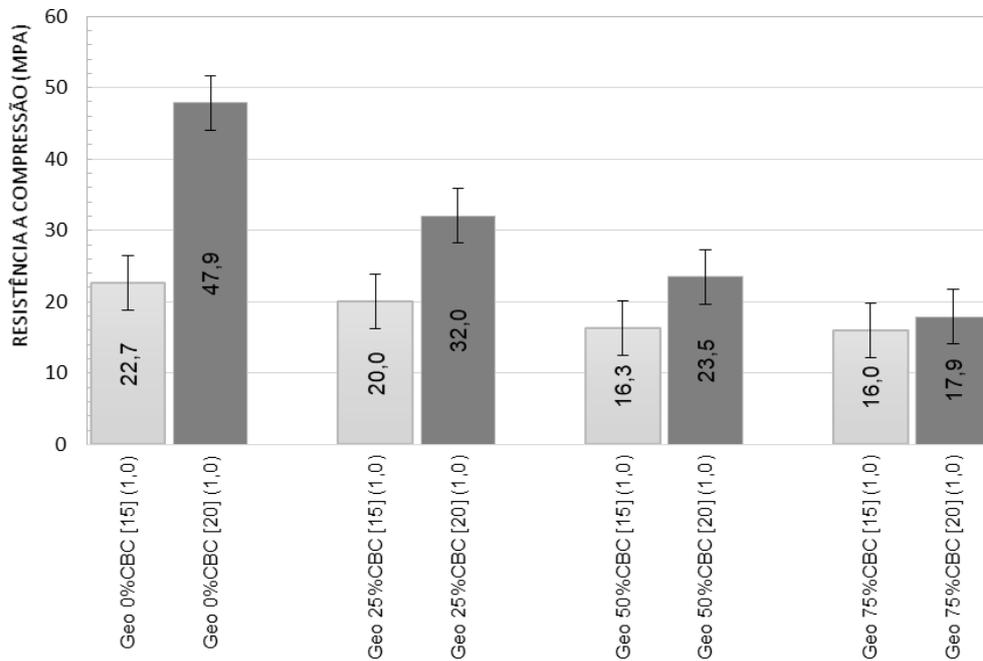
Fonte: Autor (2021).

Figura 18 – Valores de resistência à compressão aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor (2021).

Figura 19 – Valores de resistência à compressão aos 90 dias de cura.



Fonte: Autor (2021).

Por meio do comparativo feito nas figuras é possível observar que as amostras moldadas com CBC e 15% de álcalis, apresentam maiores resistências à compressão na idade de cura de 7 dias.

Afim de avaliar quais fatores analisados (ativação alcalina, porcentagem de substituição e tempo de cura) influenciam mais na resistência a compressão realizou-se uma análise estatística (ANOVA), ilustrada na Tabela 10.

Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) da resistência à compressão.

<b>Fatores</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Grau de liberdade</b>	<b>Média quadrática</b>	<b>Valor - F</b>	<b>Valor - p</b>
Concentração de CBC	3325,46	3	1108,49	27,49	0,000000
Teor de álcalis (%)	586,32	1	586,32	14,54	0,000000
Tempo de cura	298,48	1	586,32	2,47	0,065371
Erro	4837,52	120	40,31		

Fonte: Autor (2021).

Através da Tabela 10, é possível afirmar com 95% de confiabilidade que todos os fatores analisados tem influência significativa na resistência à compressão das amostras, sendo os fatores: concentração de CBC e o teor de álcalis os mais representativos. Por meio do valor de F é possível observar que a concentração de CBC na mistura é o fator que mais influência na resistência à compressão, o que corrobora com a literatura. O tempo de cura não se mostrou um fator relevante para as amostras produzidas com CBC, sendo necessário estudos mais aprofundados para verificação da influência deste fator na resistência à compressão.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, sob os ensaios realizados, foi possível concluir que:

- A Análise de TGA mostrou todos os eventos de perda de massa da amostra *in natura* e da amostra calcinada. Por meio da análise comprovou-se a eficiência do processo de calcinação adotado.
- A análise de ATR-FTIR comprovou a ocorrência da reação de geopolimerização. Observou-se que todas as amostras analisadas obtiveram o pico característico do processo de geopolimerização (1001 – 1024  $\text{cm}^{-1}$ ).
- Através da análise de FRX do resíduo é possível inferir que a cinza do bagaço de cana-de-açúcar apresenta concentrações satisfatórias dos óxidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}_3$ , elementos estes essenciais para o processo de geopolimerização.
- O teor de ativação alcalina influenciou diretamente na resistência à compressão das amostras. Pode-se inferir que esse fato decorre devido à adição de maiores quantidades de silicatos solúveis que possibilitam a formação de produtos de reação, propiciando um melhor desempenho mecânico.
- A quantidade de cinza do bagaço de cana-de-açúcar influenciou diretamente na resistência à compressão dos geopolímeros. No entanto, apesar dessa redução de resistência, o material apresentou-se solúvel em condições alcalinas, o que pode ser considerado como um material interessante para a produção de geopolímeros.
- As idades de cura não apresentaram influências significativas para a condição de cura adotada nesta pesquisa.
- A combinação de precursores (metacaulim e cinza do bagaço de cana-de-açúcar) se mostrou uma combinação promissora para a utilização em pastas geopoliméricas. No entanto, adições do resíduo acima de 25% não apresentaram resultados satisfatórios de resistência à compressão.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao finalizar esta pesquisa verificou-se a necessidade de estudos que possam contribuir ainda mais com este trabalho e elucidar alguns questionamento que se fizeram presente e que vão além do que está pesquisa propôs. Sendo assim, podem ser definidas as seguintes sugestões de pesquisas futuras:

- Estudos sobre o comportamento das amostras em diferentes temperaturas e condições de cura;
- Avaliação do tempo de pega da pasta nas diferentes composições;
- Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras para verificar a interação e composição química dos precursores.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: requisitos.** NBR 16697:2018. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão.** NBR 7215: 1996. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado pelo método de chapelle modificado.** NBR 15895. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - Requisitos.** NBR 12653. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais Pozolânicos- Especificação.** NBR 12653:2012. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassas e concreto endurecidos-** Determinação da absorção de água por imersão- Índice de vazios e massa específica. NBR 9778:1987. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=400221>. Acesso em: 24 nov.2019.
- ASTM C618-19 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2019. Disponível em: <http://www.astm.org>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- ALVARENGA, C. B. C. S. **SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS À BASE METACAULIM E MICROPARTÍCULAS DE VIDRO SODA-CAL.** 2018. UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, [s. l.], 2018. Disponível em: [http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-AWULXM/2018\\_03\\_06\\_mestrado cristianealvarenga.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-AWULXM/2018_03_06_mestrado cristianealvarenga.pdf?sequence=1). Acesso em: 06 fev. 2020.
- APOLONIO, P. H. **Produção de geopolímeros usando cinza de casca de arroz como fonte complementar de sílica.** 2017. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2017.
- ARIF, E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high efficiency co-generation boiler: Applications in cement and mortar production. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 287-297, 2016.
- ARIFFIN, M.A. M.; BHUTTA, M. A. R.; HUSSIN. M. W.; TAHIR. M. Mohd; AZIAH. Nor. Sulfuric acid resistance of blended ash geopolymer concrete. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 43, p.80-86, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>.

BAKHAREV, T. Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 658–670, 2005.

BEDDOE, Robin E.; DORNER, Horst W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanisms. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 35, n. 12, p.2333-2339, dez. 2005. Elsevier BV.

BELL, Jonathan L.; DRIEMEYER, Patrick E.; KRIVEN, Waltraud M. Formation of Ceramics from Metakaolin-Based Geopolymers. Part II: K-Based Geopolymer. **Journal Of The American Ceramic Society**, [s.l.], v. 92, n. 3, p.607-615, mar. 2009. Wiley.

BELMOKHTAR, Nouredine; AMMARI, Mohammed; BRIGUI, Jamal; BEN ALLAL, Laïla. Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge. **Construction and Building Materials**, vol. 146, p. 621–629, 15 Aug. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.127>.

BENINI, Kelly Cristina Coelho de Carvalho. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: HIPS / fibra de casca do coco verde e bagaço de cana de açúcar**. 2011. 125 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

BIANCHI, Otávio *et al.* Avaliação da degradação não-isotérmica de madeira através de termogravimetria –TGA. **Polimeros**. V. 20, n 5, p 395-400. 2010.

BIGNO, I. C. **Cimento Geopolimérico à Base de Resíduos Agrícolas e agroindustriais**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2008.

BURCIAGA-DÍAZ, O.; ESCALANTE-GARCÍA, J. I. Strength and durability in acid media of alkali silicate-activated metakaolin geopolymers. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 95, n. 7, p. 2307–2313, 2012.

BRANDÃO, A. M. S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado - aspectos relativos ao projeto** - Dissertação (Mestrado) - São Carlos-SP Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, p. 149, 1998. Campanha Nacional de Abastecimento CONAB (2019). “Acompanho da safra brasileira de Cana-de-açúcar”, (ISSN: 2318-7921), p. 75.

CAI, Jingming; LI, Xiaopeng; TAN, Jiawei; VANDEVYVERE, Brecht. Thermal and compressive behaviors of fly ash and metakaolin-based geopolymer. **Journal of Building Engineering**, vol. 30, p. 101307, 1 Jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101307>.

CANEVAROLO, S. V. **Técnica de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, p.209-229, 2004.

CASTALDELLI, Vinicius Nobre. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013. 87 f. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/111146>.

CHAUHAN, R.p.; KUMAR, Amit. Radon resistant potential of concrete manufactured using Ordinary Portland Cement blended with rice husk ash. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 81, p.413-420, dez. 2013. Elsevier BV.

CHEN, Liang; WANG, Zaiqin; WANG, Yuanyi; FENG, Jing. 2016. "Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer" **Materials** 9, no. 9: 767.

CIMENTO. ORG. Cimento 1º tri: Crescimento sob base fraca. Publicado em 12 de abril de 2021. **Cimento.org: O mundo do cimento**. Disponível em: <https://cimento.org/cimento-1o-tri-crescimento-sob-base-fraca/> Acessado em: 29 de abril de 2021.

CINCOTTO, M. A. **Selection of wate materials with pozzolanic activity**. In: International Conference on Development of Low-Cost na Energy Saving Constrution Materials Proceedings. Rio de Janeiro, v 1, p 287-297, 1984.

COOK, David J.; PAMA, Ricardo P.; PAUL, Bishwendu K. Rice husk ash-lime-cement mixes for use in masonry units. **Building And Environment**, [s.l.], v. 12, n. 4, p.281-288, jan. 1977. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(77\)90031-2](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(77)90031-2).

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CORDEIRO, G.; KURTIS, E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 97, n. 1, p.41-49, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.03.008>.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, [s.l.], v. 32, n. 1, p.82-86, 2009. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422009000100016>.

CRIADO, M., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A. **Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio. Part I: FTIR study**. Microporous and Mesoporous Materials, 106 (1-3), p. 180-191. 2007.

CRUZ, M. A.; CASANOVA. R. F.; BOSCARDIN, D.; ALMEIDA.W. P; ZANCHET. A. Análise da influência da temperatura de calcinação do bagaço de cana-de-açúcar para a produção de geopolímeros. **Revista Ambiente Construído**. 2020. No prelo.

DA COSTA, Danubia Lisboa. **Avaliação da influência da adição de alumina em geopolímero a base de metacaulim**. 2013. 90 f. Universidade federal de Campina

Grande, 2013.

DAVIDOVITS, J.; **Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and concretes**. Kiev, Ukraine, p. 131–149, 1994 (a).

DAVIDOVITS, J. **High-Alkali Cements for 21st Century Concrete in “Concrete Technology, Past, Present and Future”**, Proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium, Editor: P. Kumar Metha, ACI SP- 144, p.383-397, 1994 (b).

DAVIDOVITS, J. **The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information: transfer and exploitation os scientific and technical information, EUR 7716**. Luxembourg: Commission of the European Communities, 1982.

DAVIDOVITS, J. Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In: GEOPOLYMER 2002 CONFERENCE 2002, **Anais...** : Geopolymer Institute Saint-quentin (France), Melbourne (Australia), 2002.

DIAZ, O.B.; GARCIA, J.I.E, GOROKHOVSKY, A. **Geopolymers based on a coarse low-purity kaolin mineral: Mechanical strength as a function of the chemical composition and temperature**. *Cement and Concrete Composites*, Vol.34, Pages 18-24, 2012.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A; PROVIS, J.L; LUKEY, G.C. PALOMO, A.; VAN DEVENTER, S.J. Geopolymer techology: The current state of the art. **Jornal of Materials Science**, v. 42, n.9, p. 2917-2933, 2007.

DUXSON, P. S. W. M.; MALLICOAT, S. W.; LUKEY, G.C.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J. S. The effect os alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 292, n. 1, p.820, 2007.

FARIA, K.C.P.; GURGEL, R.F.; HOLANDA, J.N.F. Recycling of sugarcane bagasse ash waste in the production of clay bricks. *Journal Of Environmental Management*, [s.l.], v. 101, p.7-12, jun. 2012. Elsevier [http:// dx.doi.org/10.1016/j.jenvman. 2012. 01.032](http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.032).

FERNANDES-FILHO, P. **Utilização da cinza residual do bagaço de cana-de-açúcar na produção de materiais cimentícios alcalinamente ativados**. 2012. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

FREITAS, E.G.A.; RODRIGUES, E.H.V.; ARAUJO, R. C. L. & FAY, I. Efeito da adição de cinzas de bagaço de cana de açúcar na resistência à compressão de argamassa normal. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. 1998. Vol. 27. p. 219-21.

FRÍAS, Moisés; VILLAR, Ernesto; SAVASTANO, Holmer. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement

manufacture. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 33, n. 4, p.490-496, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>.

GAIER, C.V. **Análise do desempenho de materiais de reparo industrializados para estruturas de concreto frente ao ataque ácido**. (Dissertação). Mestrado Profissionalizante em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; MACPHEE, D.e.. Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram Na<sub>2</sub>O–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 9, p. 923-931, set. 2011. Elsevier BV.

GARCIA-PÉREZ, M; A CHAALA,; YANG, J; ROY, C. Co-pyrolysis of sugarcane bagasse with petroleum residue. Part I: thermogravimetric analysis. *Fuel*, [S.L.], v. 80, n. 9, p. 1245-1258, jul. 2001. **Elsevier BV**.

GARTNER, E. M.; MACPHEE, D. E. Cement and concrete research a physicochemical basis for novel cementitious binders. **Cement and concrete Research**, v. 41, n7, p 736-749, 2011.

GIERGICZNY, Zbigniew. Fly ash and slag. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 124, p.105826-105826, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>.

GÖRHAN, Gökhan; KÜRKLÜ, Gökhan. The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. **Composites Part b: Engineering**, v. 58, p.371-377, mar. 2014. Elsevier BV.

GORNINSKI, J. P.; KAZMIERCZAK, C. S. Avaliação da resistência química de concretos poliméricos em ambientes agressivos. **Ambiente Construído**, v. 8, n. 1, p. 105–113, 2008.

GUBOLINO, N.; Sandra Isabel Franzotti. Qualidade físico-química e microbiológica de refrigerantes sabor guaraná em embalagens PET-2000mL e ocorrência de leveduras. 2007. 71 f. Dissertação (mestrado) – **Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas**, 2007.

HAACK, M. de S. **Análise de materiais por espectroscopia no infravermelho dentro do sistema de gestão de qualidade conforme ABNT NBR ISSO/IEC 17025**. 2010, 50 f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

KAMSEU, E.; MOUNGAM, L.M. Beleuk À; CANNIO, M.; BILLONG, Ndigui; CHAYSUWAN, Duangrudee; MELO, U. Chinje; LEONELLI, C. Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 142, p. 3050-3060, jan. 2017. Elsevier BV.

KAWABATA, C.Y. **Aproveitamento de cinzas da queima de resíduos agroindustriais na produção de compósitos fibrosos e concreto leve para a construção rural**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2008.

KAYA, Kardelen; SOYER-UZUN, Sezen. Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud-metakaolin based geopolymer systems. **Ceramics International**, vol. 42, no. 6, p. 7406–7413, 1 May 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.144>.

KAZE, C. R. et al. Effect of silicate modulus on the setting, mechanical strength and microstructure of iron-rich aluminosilicate (laterite) based-geopolymer cured at room temperature. **Ceramics International**, [s. l.], v. 44, n. 17, p. 21442–21450, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884218322776>.

LIVI, C. Desenvolvimento de pasta de geopolímericas a base de cinza volante e hidróxido de sódio. Dissertação (mestrado) – **Universidade Federal de Santa Catarina**. Florianópolis, 2013.

LIVI, C. N.; REPETTE, W. L. Ligante geopolimérico produzido com cinza volante e hidróxido de sódio. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 7–18, 2015. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212015000300007&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212015000300007&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 06 fev. 2020.

LLOYD, R. R.; PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Acid resistance of inorganic polymer binders. 1. Corrosion rate. **Materials and Structures**, v. 45, n. 1–2, p. 1–14, 2012.

LONGHI, M. A. **Álcali-ativação de lodo de caulim calcinado e cinza pesada com ativadores convencionais e sílicato de sódio alternativo**. (Dissertação). Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

LONGHI, M. A.; WALKLEY, B.; RODRÍGUEZ, E. D.; KIRCHHEIM, A. P.; ZHANG, Z.; WANG, H. New selective dissolution process to quantify reaction extent and product stability in metakaolin-based geopolymers. **Elsevier**, v. 176, nov. 2019. Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107172>

LOT, Ana Virgínia; MELCHIADES, Fábio Gomes; BOSCHI, Anselmo Ortega. Influência das Características de Metacaulins no Desempenho de Geopolímeros. **Cerâmica Industrial**, vol. 20, no. 3, p. 35–41, 2015.

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1244–1256, 2011.

MACEDO, Pamela Camargo. **Avaliação do desempenho de argamassas com adição de cinza do bagaço de cana-de-açúcar**. 2009. 116 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2009.

MONTE, M. B. M; PAIVA, P. R. P; TRIGUEIRO, F. E. Técnicas Alternativa para Modificação do Caulim. Rio de Janeiro: **Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Série Rochas e Minerais Industriais**, Vol 8, 50 p., 2003.

MARTINS, M.A.P; ARAÚJO, H.N.; PELIZZARO, Marli. Estudo de compósitos com produtos de reciclagem. **XXXI Simpósio Brasileiro de Pesquisas Operacionais**, 2009.

MASSAZZA, F. Pozzolana and pozzolanic cements. In: Hewlett, P. C. (ed.), **Lea's chemistry of cement and concrete, 4th edition**, London: Arnold Publishers, 1998. p.485-500.

MAGALHÃES, G.A. **Caracterização e análise macro e microestrutural de concretos fabricados com cimentos contendo escórias de alto-forno**. Dissertação (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007, 238 p.

MANRICH, S.; PESSAN, L. A. Reologia: conceitos básicos. São Carlos: Gráfica UFSCar, 1987.

MEHTA, P. Kumar. Sustainable cements and concrete for the climate change era-a review. In: **Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Aneona, Italy**. 2010. p. 28-30.

MELO NETO, A. A. **Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada**. 2007. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MO, B. H.; ZHU, H.; CUI, X.; HE, Y.; GONG, S. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. **Applied Clay Science**, v. 99, p 144-148, 2014.

MUÑIZ-VILLARREAL, M.s.; MANZANO-RAMÍREZ, A.; SAMPIERI-BULBARELA, S.; GASCA-TIRADO, J. Ramón; REYES-ARAIZA, J.L.; RUBIO-ÁVALOS, J.C.; PÉREZ-BUENO, J.J.; APATIGA, L.M.; ZALDIVAR-CADENA, A.; AMIGÓ-BORRÁS, V. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, [S.L.], v. 65, n. 6, p. 995-998, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2010.12.049>.

NAGHIZADEH, A.; EKOLU, S. O. Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 202, p. 704–717, 2019. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818331799> Acesso em: 5 jan. 2020.

NG, Connie; ALENGARAM, U. Johnson; WONG, Leong Sing; MO, Kim Hung; JUMAAT, Mohd Zamin; RAMESH, S. A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 186, p. 550-576, out. 2018. Elsevier BV.

NUNES, I. H. S.; VANDERLEI, R.D; SECCHI, M.; & ABE, M.A.P. Estudo das características físicas e químicas da cinza de bagaço de cana-de-açúcar para uso na construção. **Revista Tecnológica**. V.17, n.1, p.39-48, 2010.

OZER, I., SOYER-UZUB, S. Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. (2015). **Ceramics International**.

PACHECO-TORGAL, F.; ABDOULLAHNEJAD Z.; CAMÕES A.F.; JAMSHIDI M.; DING. Y. Durability of alkali-activated binders: A clear advantage over Portland cement or an unproven issue? **Construction And Building Materials**, v. 30, p.400-405, maio 2012. Elsevier BV.

PAULA, M.D. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v 13, n.3, 2006.

PEREIRA, Adriana Maria. **Análise da viabilidade da utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como aglomerante para a produção de matrizes cimentantes**. 2014. 207 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

PEREIRA, Adriana; AKASAKI, Jorge L.; MELGES, José L.P.; TASHIMA, Mauro M.; SORIANO, Lourdes; BORRACHERO, María V.; MONZÓ, José; PAYÁ, Jordi. Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. **Ceramics International**, [S.L.], v. 41, n. 10, p. 13012-13024, dez. 2015. Elsevier BV.

PROVIS, J.; BERNAL, S.A. Geopolymer and other álcali activated materials: why, how, and what? *Materials and Structures*, v.47. January, p. 299-327,2014.

PROVIS, J.L.; VAN DEVENTER, J.S.J. (Eds). *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*. eBook: ISBN: 9781845696382. Woodhead Publishing. Publicado em: 22 jun. 2009. 464p.

RAVERDY, M. et al. Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components. **Appreciation of pozzolanic reactivity of minor components**. França.1980.

RIFAAI, Y. *et al*. Rheology of fly ash-based geopolymer: Effect of NaOH concentration. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 223, p. 583–594, 2019.

RIELLA, Humberto Gracher. **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**. Universidade Federal de Santa Catarina, centro tecnológico departamento de engenharia química e engenharia de alimentos programa de pós-graduação em engenharia química [S. l.: s. n.], 2012.

ROBAYO-SALAZAR, Rafael Andrés; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby; PUERTAS, Francisca. Effect of metakaolin on natural volcanic pozzolan-based geopolymer cement. **Applied Clay Science**, vol. 132–133, p. 491–497, 1 Nov. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.020>.

ROCHA, G. G. N.; VASCONCELOS, W. L. Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Resistência. **Revista Concreto**. Nº 42, p. 98 -106, 2006.

ROMAGNOLI, Marcello; LEONELLI, Cristina; KAMSE, Elie; GUALTIERI, Magdalena Lassinantti. Rheology of geopolymer by DOE approach. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 36, p. 251-258, nov. 2012. Elsevier BV.

ROVNANÍK, Pavel. Effect of curing temperature in the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 24, n. 7, p. 1176-1183, jul. 2010. Elsevier BV.

SALES, Almir; LIMA, Sofia Araújo. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. *Waste Management*, [s.l.], v. 30, n. 6, p.1114-1122, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.026>

SAMPAIO, Zodínio Laurisa Monteiro. **Análise do comportamento mecânico de concretos produzidos com incorporação de cinza do bagaço da cana-de-açúcar de variedades SP911049, RB92579 e SP816949**. 2013. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

SANTA, R. A. A. B. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir do resíduo da indústria de papel**. 2012.

SANTOS, Moacyr L. dos et al. Estudos das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química nova**, v. 34, n.3, p 507-511, 2011.

SARKAR, Madhuchhanda; DANA, Kausik. Partial replacement of metakaolin with red ceramic waste in geopolymer. **Ceramics International**, vol. 47, no. 3, p. 3473–3483, 1 Feb. 2021.

SATHIYA, K. **Experimental study on bagasse ash in concrete**. International journal for servisse learning in engineering, v.5, n.2, 2010.

SCHWAAB, S.; UENO, O. K.; GANASINI, D.; SCHACKOW, A.; FOLGUERAS, M. V.; CORREIA, S. L. Physical properties, mechanical strength and microstructure of fired clay brick waste and metakaolin geopolymer mortars. **Materials Science Forum**, vol. 930 MSF, p. 170–175, 2018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.930.170>.

SCOPEL, M. **Valorização de cinza de fundo por meio da síntese de ligantes geopoliméricos: otimização de traços em pasta e avaliação dos sistemas em**

argamassas. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

SHI, C.; FERNÁNDEZ-JIMENEZ, A.; HE, F.; PAVEL, V. Classification and characteristics of alkali-activated cement. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, v. 40, n. 1, p. 69–75, 2012.

SILVA, E. J.; BASTO, P.E.A.; ARAÚJO, F. W.C.; MIRANDA, L.F.R.; NETO, A.A.M. Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 4, e 12497, 2019.

SOUZA, A. E.; TEIXEIRA S. R.; SANTOS, G. T. A.; COSTA, F.B.; LONGO. E. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. **Journal of environmental management**. v.92, n. 10, p 2774-2780. 2011.

STRUBLE, L.; GODFREY, J. “How sustainable is concrete? ”, In: International Workshop on sustainable Development na Technology, parte II, Beijing, China, pp. 201-2011, 2004.

TANNER, R.L. *Engineering rheology*. ed. rev. New York: Oxford University Press, 1988. 451p.

TASHIMA, Mauro Mitsuchi; FIORITI, Cesar Fabiano; AKASAKI, Jorge Luís; BERNABEU, Jordi Payá; SOUSA, Leandro Cirqueira; MELGES, José Luís Pinheiro. **Cinza de casca de arroz (CCA) altamente reativa: método de produção e atividade pozolânica**. Ambiente Construído, [s.l.], v. 12, n. 2, p.151-163, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO).

TEIXEIRA, F. R.; MAGALHÃES, F. C.; WALLY, G. B.; SELL JUNIOR, F. K.; PALIGA, C. M.; TORRES, A. S. Use of ornamental rock waste as a partial substitute for binder in the production of structural concrete. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 13, n. 3, p. 501-514, jun. 2020. FapUNIFESP (SciELO).

TCHAKOUTÉ, Hervé K.; RÜSCHER, Claus H.; KONG, Sakeo; KAMSEU, Elie; LEONELLI, Cristina. Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: a comparative study. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 114, p. 276-289, jul. 2016a. Elsevier BV.

TCHAKOUTÉ, Hervé Kouamo; RÜSCHER, Claus Henning; KONG, Sakeo; RANJBAR, Navid. Synthesis of sodium waterglass from white rice husk ash as an activator to produce metakaolin-based geopolymer cements. **Journal Of Building Engineering**, [S.L.], v. 6, p. 252-261, jun. 2016b. Elsevier BV.

TIPPAYASAM, C.; Boonsalee, S.; Sajjavanich, S.; Ponzoni, C.; Kamseu, E.; Chaysuwan, D. Geopolymer Development by Powders of Metakaolin and Wastes in Thailand. **Advances In Science And Technoogy**, [s.l.], v.69, p. 63-68, out. 2010. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AST.69.63>

THOKCHOM, S.; GHOSH, P.; GHOSH, S. Resistance of fly ash based geopolymer mortars in sulfuric acid. **ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences**, v. 4, n. 1, p. 65–70, 2009.

VASSALO, E. A. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. (Dissertação). Mestrado em Construção Civil. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte-MG, 2013.

VAN JAARSVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.. Effect of the Alkali Metal Activator on the Properties of Fly Ash-Based Geopolymers. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s.l.], v. 38, n. 10, p.3932-3941, out. 1999.

VILLAR-COCIÑA, E; VALENCIA-MORALES, E; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, R; HERNÁNDEZ-RUÍZ, J. Kinetics of the pozzolanic reaction between lime and sugar cane straw ash by electrical conductivity measurement: a kinetic-diffusive model. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 517-524, abr. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)00998-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)00998-5).

XU, H. et al. Synthesis of thermostable geopolymer from circulating fluidized bed combustion (CFBC) bottom ashes. **Journal of hazardous materials**, v. 175, n 1-3, p.198-204, 15 mar. 2010.

Xu, Q., Ji, T., Gao, S.-J., Yang, Z., & Wu, N. Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. **Materials**, v. 12, n. 1, p. 39, 2019.

YAO, Xiao; ZHANG, Zuhua; ZHU, Huajun; CHEN, Yue. Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 493, n. 1-2, p. 49-54, set. 2009. Elsevier BV.

ZARDO, A. M. Utilização da cinza de bagaço de cana-de-açúcar como “filler” em compostos de fibrocimento. **I ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONSTRUÇÃO SISTENTÁVEL**. Anais. São Paulo, 2004.

ZHANG, Z. WANG, H.; PROVIS, J.; BULLEN, F.; REID, A. Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin. **Thermochimica Acta**, v. 565, p. 163–171, 2013.