

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

**DAIANE BOSCARDIN**

**REOLOGIA DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS  
DESENVOLVIDOS COM CINZA DE CANA-DE-  
AÇÚCAR**

**PASSO FUNDO**

**2022**

**DAIANE BOSCARDIN**

**REOLOGIA DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS DESENVOLVIDOS COM CINZA  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Civil, em Desenvolvimento de produtos e tecnologias de processos para a construção, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, pela Faculdade IMED.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva

Coorientador: Prof. Dr. Heitor Luiz Ornaghi Júnior

**PASSO FUNDO**

**2022**

CIP – Catalogação na Publicação

---

- B741r BOSCARDIN, Daiane  
Reologia de materiais geopoliméricos desenvolvidos com cinza de cana-de-açúcar / Daiane Boscardin. – 2022.  
73 f., il.; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade IMED, Passo Fundo, 2022.  
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva.  
Coorientador: Prof. Dr. Heitor Luiz Ornaghi Júnior.
1. Engenharia civil. 2. Geopolímero. 3. Cana-de-açúcar – Reologia de materiais. I. SILVA, Rodrigo de Almeida, orientador. II. ORNAGHI JUNIOR, Heitor Luiz, coorientador. III. Título.

CDU: **620.1**

**DAIANE BOSCARDIN**

**REOLOGIA DE MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS DESENVOLVIDOS COM CINZA  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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, Escola de Mestre em Engenharia Civil.

Passo Fundo, 28 de Abril de 2022

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo de Almeida da Silva – IMED

---

Prof. Dr. Heitor Luiz Ornaghi Júnior - UNILA

---

Prof. Dra. Aline Zanchet – SENAI

---

Prof. Dr. Richard Thomas Lermen – IMED

**Dedico este trabalho principalmente a minha família, meu namorado e a Deus por nunca desacreditar em meu potencial.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me direcionado, iluminando e abrindo caminhos o tempo todo.

Ao Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Silva pela orientação, compreensão, e confiança tornando possível o desenvolvimento deste trabalho mesmo à distância.

Ao Prof. Dr. Heitor Luiz Ornaghi JR por todos os ensinamentos repassados a compreensão e paciência principalmente quando eu achava que tudo estava perdido.

A Profa. Dra. Aline Zanchet pela amizade construída ao longo dos anos, por todo o apoio, orientação, incentivo contínuo toda a ajuda, e suporte para a elaboração.

Aos colegas e amigos que de alguma forma estiveram presentes nesse momento apoiando, muitas vezes trazendo momentos de descontração, meu muito obrigado acredito que vocês fizeram essa caminhada um pouco mais leve.

Agradeço imensamente minha família e meu namorado por todo o suporte e carinho, por compreenderem, muitas vezes, minha ausência sei que se não tivesse encontrado o suporte e incentivo em vocês eu não chegaria até aqui.

**“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”**

**José de Alencar**

## RESUMO

As propriedades reológicas dos geopolímeros é um fator importante que possibilita o controle e qualidade dos artefatos cimentícios geopoliméricos, crucial na etapa de moldagem. O objetivo principal deste trabalho é correlacionar o efeito das cinzas de cana-de-açúcar (CBCA) nas propriedades reológicas de um geopolímero a base de metacaulim. A CBCA foi caracterizada com o ensaio de análise termogravimétrica (TGA), microscopia de varredura (MEV), espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) e difração de raios-X (DRX). Os geopolímeros foram desenvolvidos com substituição do metacaulim por cinza de cana-de-açúcar e percentuais de substituição. No ensaio de reometria foi utilizado o reômetro oscilatório, sendo varrido a taxa de cisalhamento (0,1 a 100 s<sup>-1</sup>). As pastas geopoliméricas se enquadraram no modelo de Bingham e Pseudoplástico, em relação a cinza do bagaço da cana-de-açúcar aumentou a tensão de escoamento inicial do material devido a rigidez do material. Em relação ao teor de álcalis ocasionou a diminuição na viscosidade inicial dos traços.

**Palavras-chave:** Geopolímero. Propriedades Reológicas. Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

## ABSTRACT

. The rheological properties of geopolymers is an important factor that enables the control and quality of geopolymeric cementitious artifacts, crucial in the molding stage. In its manufacture, precursor materials are used, in the form of powder, composed of silica and aluminum, such as Metakaolin, fly ash, and other clay-minerals. sodium or potassium hydroxides. Therefore, the main objective of this work is to correlate the effect of sugarcane ash (CBCA) (0%,25%,50% and 75%) on the rheological properties of a metakaolin-based geopolymer. The CBCA was characterized with the Thermogravimetric Analysis (TGA), Scanning Microscopy (SEM), X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) and X-ray Diffraction (XRD) for subsequent preparation of the geopolymer paste for the rheometry. In the rheometric test, the oscillatory rheometer was used, with the shear rate ( $0.1$  to  $100\text{ s}^{-1}$ ) being swept. The geopolymer pastes fit the Bingham and Pseudoplastic model, in relation to sugarcane bagasse ash, the initial yield stress of the material increased due to the stiffness of the material. Regarding the alkali content, it caused a decrease in the initial viscosity of the traces.

**Keywords:** Geopolymer. Rheological Properties. Sugarcane bagasse ash

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Modelo de Glukhovsky .....   | 17 |
| Figura 2: Rede de tetraedros de $\text{SiO}_4$ e $\text{AlO}_4$ unidos pelo compartilhamento do oxigênio ..... | 20 |
| Figura 3: Curva de escoamento do fluido newtoneano .....   | 24 |
| Figura 4: Comportamento reológico de fluídos independentes do tempo .....                                      | 25 |
| Figura 5: Classificação dos fluídos dependentes do tempo. ....   | 26 |
| Figura 6: Curvas de tensão de cisalhamento (A) - curvas de Viscosidade (B).....                                | 40 |
| Figura 7: Fluxograma. ....   | 42 |
| Figura 8: Cinza do bagaço da cana de açúcar .....  | 43 |
| Figura 9: Granulometria a laser a- CBCA/ b- metacaulim .....   | 44 |
| Figura 10: Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza do bagaço da cana-de-açúcar ampliada 500x .....        | 49 |
| Figura 11: Curva TG e derivada da cinza do bagaço da cana-de-açúcar. ....                                      | 49 |
| Figura 12: Difratoograma da CBCA.....  | 54 |
| Figura 13:Difratoograma do Metacaulim (MetaMax Basf). ....   | 55 |
| Figura 14: Viscosidade x Taxa de cisalhamento- amostras com 15% de álcalis.....                                | 56 |
| Figura 15: Viscosidade x Taxa de cisalhamento - amostras com 20% de álcalis.....                               | 57 |
| Figura 16: Efeito treliça .....  | 58 |
| Figura 17: Tensão de Cisalhamento x Taxa de cisalhamento.....  | 59 |
| Figura 18: Curva reológica dos traços de referência (0% CBCA) .....  | 60 |

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1: Classificação do cimento geopolimérico segundo Davidovits. ....  | 19  |
| Tabela 2: Aplicação do geopolímero devido a relação Si:Al.....   | 20  |
| Tabela 3: Modelo reológico e suas equações. ....   | 23  |
| Tabela 4: Ensaio para achar os parâmetros reológicos .....   | 32  |
| Tabela 5: Reologia em argamassas.....  | 33  |
| Tabela 6- Ensaio realizado para caracterização do estado fresco do concreto.....                                 | 34  |
| Tabela 7: Reologia em pastas cimentícias.....  | 36  |
| Tabela 8: Estudos das propriedades reológicas em geopolímero.....  | 37  |
| Tabela 9: Parâmetros reológicos de amostras com 90% de conteúdo de ativador...                                   | 41  |
| Tabela 10: Propriedades físico-químicas do Metacaulim fornecidas pela MetaMax.                                   | 44  |
| Tabela 11: Formulação empregada na pasta geopolimérica. ....   | 46  |
| Tabela 12: Composição química da CBCA em termos de óxidos.....   | 51  |
| Tabela 13: Composição química da CBCA encontrada na literatura .....   | 52  |
| Tabela 14: Índice de Atividade Pozolânica dos Precursores.....   | 53  |
| Tabela 15: Comparação da viscosidade inicial com o ensaio de resistência a compressão de Casagrande (2021). .... | 588 |

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

|          |  |
|----------|--|
| ABNT     | Associação Brasileira de Normas Técnicas     |
| CBCA     | Cinzas do bagaço da cana-de-açúcar           |
| CONAB    | Companhia Nacional De Abastecimento          |
| DRX      | Difração de raios- X                         |
| FRX      | Espectroscopia de fluorescência de Raios – X |
| MEV      | Microscopia eletrônica de Varreduta.         |
| MK       | Metacaulim                                   |
| NBR      | Norma Brasileira Registrada                  |
| $\tau$   | Tensão de cisalhamento                       |
| $\eta$   | Viscosidade                                  |
| $\gamma$ | Taxa de Cisalhamento                         |
| $\tau_0$ | Tensão de escoamento                         |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>12</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS .....  | 15        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                   | <b>16</b> |
| 2.1          | GEOPOLÍMERO.....   | 16        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Breve história.....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Mecanismo de Formação dos Geopolímeros .....</b>                  | <b>17</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Classificação.....</b>  | <b>19</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Vantagens e principais aplicações .....</b>                       | <b>21</b> |
| 2.2          | REOLOGIA.....  | 22        |
| <b>2.2.1</b> | <b>Conceitos principais da Reologia .....</b>                        | <b>22</b> |
| <b>2.2.2</b> | <b>Classificação do comportamento reológico .....</b>                | <b>22</b> |
| 2.2.2.1      | Fluído Newtoniano.....   | 23        |
| 2.2.2.2      | Fluído Não-Newtoniano .....  | 24        |
| <b>2.2.3</b> | <b>Reologia em materiais cimentícios .....</b>                       | <b>27</b> |
| <b>2.2.4</b> | <b>Fatores que afetam a reologia dos materiais cimentícios .....</b> | <b>28</b> |
| 2.2.4.1      | Distribuição granulométrica agregado utilizado .....                 | 29        |
| 2.2.4.2      | Teor de água .....   | 30        |
| 2.2.4.3      | Influência do procedimento de mistura .....                          | 31        |
| <b>2.2.5</b> | <b>Reologia em argamassa.....</b>                                    | <b>31</b> |
| <b>2.2.6</b> | <b>Reologia em concreto fresco .....</b>                             | <b>33</b> |
| <b>2.2.7</b> | <b>Reologia em pasta de cimento .....</b>                            | <b>35</b> |
| <b>2.2.8</b> | <b>Reologia em Geopolímero .....</b>                                 | <b>37</b> |
| <b>3</b>     | <b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....                                      | <b>42</b> |
| 3.1          | MATERIAIS .....  | 43        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Precursor.....</b>  | <b>43</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Ativador .....</b>  | <b>45</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>Composição da mistura do geopolímero .....</b>                    | <b>45</b> |
| 3.2          | MÉTODOS .....  | 46        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Ensaio de caracterização do resíduo.....</b>                      | <b>46</b> |
| 3.2.1.1      | Microscopia eletrônica de varredura.....                             | 46        |
| 3.2.1.2      | Análise termogravimétrica .....                                      | 46        |
| 3.2.1.3      | Espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX) .....               | 47        |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 3.2.1.4      | Atividade Pozolânica .....                               | 47        |
| 3.2.1.5      | Difração de Raios-X (DRX).....                           | 48        |
| <b>3.2.2</b> | <b>Reometria .....</b>                                   | <b>48</b> |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                     | <b>49</b> |
| 4.1          | MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....                 | 49        |
| 4.2          | ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA .....                          | 50        |
| 4.3          | ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX).....    | 51        |
| 4.4          | REOMETRIA .....  | 55        |
| 4.4.1        | Viscosidade versus taxa de cisalhamento .....            | 55        |
| 4.4.2        | Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento ..... | 59        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÃO.....</b>                                    | <b>62</b> |
|              | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>            | <b>63</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                  | <b>64</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil é conhecido por consumir grandes volumes de recursos naturais. Estudos apontam que um dos materiais mais utilizados neste setor industrial é o cimento Portland, matéria prima utilizada para produção do concreto, ainda é possível salientar que o processo produtivo do cimento Portland é responsável por 10% das emissões anuais de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre (HERBERT, 2011). Buscando amenizar este impacto surge a utilização de materiais aglomerantes alternativos, que é o caso dos geopolímeros.

Os geopolímeros são materiais cimentantes que apresentam uma série de vantagens quando comparados ao cimento Portland entre eles, destaca-se a emissão de menores cargas de carbono na etapa de produção pois não empregam o processo de clinquerização (DUXSON *et al.*, 2007).

Para a produção de um material geopolimérico é necessária a mistura de duas partes, constituído por um material sólido de aluminossilicato (ricos em alumínio e sílica, sendo oriundo de pozolanas naturais, resíduos industriais ou agrícolas) e por uma solução alcalina (normalmente uma solução aquosa de hidróxido ou silicato alcalino), remetendo a geopolimerização (DAVIDOVITS, 1991).

A geopolimerização acontecerá em temperatura ambiente, com a lixiviação dos precursores (aluminossilicatos) na solução alcalina (ativador) utilizada fazendo que ocorra a transferência dos materiais lixiviados pelas superfícies sólidas formando um gel de crescimento, seguido da nucleação e a condensação desse gel (FENG *Et al.*, 2012; VASSALO, 2013)

O geopolímero por ser um cimento alternativo ao cimento Portland com o intuito da redução do impacto ambiental e consumo de matéria prima, estuda-se a utilização de resíduos e subprodutos industriais e agroindustriais como matéria prima para os precursores utilizados na produção do geopolímero (CASTALDELLI, 2013).

Dos materiais utilizados como precursores destaca-se a cinza do bagaço cana-de-açúcar, material que é rico em sílica e alumínio. (BRITO *et al.*, 2018; Cruz *et al.*, 2021). Geralmente, estas cinzas são descartadas nas lavouras sem um manejo eficiente pelas usinas sucroalcooleiras. Em particular, a produção de cana-de-açúcar é significativa no país. Segundo Companhia Nacional De Abastecimento - CONAB

(2020), a safra 2019/2020 fechou com uma produção de cana-de-açúcar no território brasileiro de 642.717,8 mil toneladas neste último ano.

De acordo com Guedes et al. (2010), a cada mil quilos de cana-de-açúcar utilizada para a produção de álcool, são gerados 280 kg de bagaço e palha da cana como resíduos. Do bagaço gera cerca de 95% de todo o bagaço gerado é reutilizado nas caldeiras para a geração de energia.

Nos últimos anos cerca de 95% de todo o bagaço gerado no País, são queimados nas próprias usinas de álcool para a geração de vapor em processos de cogeração de energia. As cinzas do bagaço da cana-de-açúcar são produzidas através do processo da queima do bagaço da cana-de-açúcar para a geração de energia. Desse processo é gerado a cinza da cana-de-açúcar que devido as características químicas vem sendo estudado para utilização nas matrizes cimentícias (CRUZ et al. 2021).

A incorporação dessas cinzas oriundas da queima do bagaço da cana-de-açúcar como precursor na preparação de materiais geopoliméricos é de grande relevância, pois, além de reduzir a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na utilização de cimento alternativo, reduzindo a produção de cimento Portland, se dá uma melhor destinação para os resíduos sucroalcooleiros. Resíduos que são descartados nas próprias lavouras para adubação da terra, que por sua vez, não atua bem como fertilizante devido ao seu alto teor de sílica em sua composição (ALMEIDA, 2020). Porém para utilização da cinza de bagaço de cana em geopolímeros é necessário investigar seu comportamento no sistema geopolimérico. Sendo de extrema importância estudar o comportamento reológico das pastas geopoliméricas contendo o resíduo.

As propriedades reológicas do material são necessárias para a validação da tecnologia do produto. Estas propriedades estão totalmente vinculada ao desenvolvimento tecnológico desse material, pois a partir do entendimento mais detalhado da influência de cada constituinte dentro do material, permitirá a adequação do material para utilizar todas as vantagens ou avaliar possíveis alterações com a finalidade de adequar as propriedades para seu determinado uso (ROMANO;CARDOSO;PILEGGI, 2011 ; SIQUEIRA *et al.*, 2021).

Uma vez que no estado fresco o geopolímero pode possuir comportamento dualístico, isto é seu fluxo de escoamento pode mudar em em decorrência do processamento ou forma de aplicação (dependendo da temperatura e cinética de

reação aplicado no material ele poderá mudar seu comportamento reológico). Nesse sentido o estudo da reologia dos geopolímeros desenvolvidos com a cinza resultante da queima do bagaço da cana de açúcar se faz necessário. Na reologia é possível avaliar o tempo necessário para o endurecimento do material, chamado de tempo de pega, também sua plasticidade e trabalhabilidade em relação a forças aplicadas no sistema. Estas medidas fornecem condições de avaliar a estabilidade, moldabilidade e a capacidade de escoamento, fornecendo dados para uma previsão da aplicação em campo, uma vez que o mesmo fornece os parâmetros associados ao comportamento estrutural do material (SANTOS,2012).

As bases conceituais dos cimentos geopoliméricos apresentam uma ausência de um histórico sobre a reologia do material quando comparado com o cimento Portland (GÜLLÜ et al., 2019). A utilização da reologia em geopolímeros ainda não foi totalmente explorada, havendo uma lacuna sobre estudos da análise da reologia, investigando os efeitos da variação da taxa de cisalhamento no geopolímero com reaproveitamento da cinza da cana-de-açúcar.

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi avaliar os efeitos da quantidade de cinza de cana de açúcar nas propriedades reológicas do material geopolimérico. Para atingir o objetivo geral do trabalho, os seguintes objetivos específicos foram almeçados:

- Caracterizar a cinza da cana-de-açúcar através da Análise Termogravimétrica, Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX);
- Obter os parâmetros reológicos dos diferentes geopolímeros como a viscosidade, tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para avaliar a influência da cinza da cana de açúcar como precursor.
- Obter os parâmetros reológicos dos geopolímeros para avaliar a influência da concentração de álcalis em sua mistura.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GEOPOLÍMERO

#### 2.1.1 Breve história

Há relatos de ligantes geopoliméricos vem se destacando desde a década de 40 onde eram chamados de ligantes obtidos por ativação alcalina que Purdon na Bélgica, utilizava o material tendo como precursor as escórias e ativador o hidróxido de sódio (PACHECO-TORGAL, 2007).

No entanto quando se fala de construções, o primeiro investigador que analisou os ligantes em construções históricas foi Glukhovsky. O qual obteve seus estudos em cima de construções antigas como o caso de pirâmides egípcias e nos templos romanos. Glukhovsky constatou que essas construções antigas eram compostas por aluminossilicatos cálcicos hidratados, com características parecidas com o cimento Portland, porem possuía fases cristalinas do tipo analcite, que possuem as mesmas propriedades que uma rocha natural da crosta terrestre (CUNHA 2013).

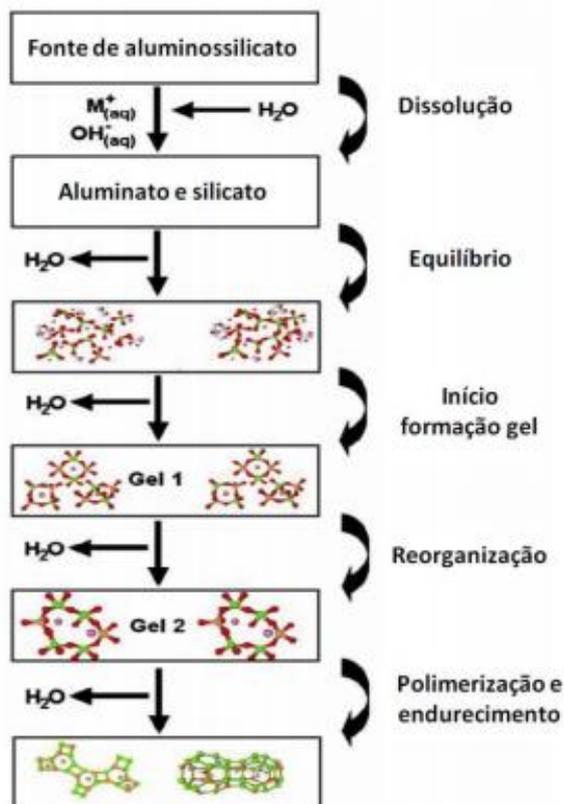
Em termos históricos os geopolímeros foram objeto de estudo de diversos investigadores do leste da Europa, sendo trazidos como um ligante de ativação alcalina. Apenas em 1978 Joseph Davidovits patenteou o termo geopolímeros através da investigação da geopolimerização do metacaulim. Trazendo o primeiro conceito onde o geopolímero, “polímeros” pelo seu processo de produção (transformam, policondensarem ganham resistência rapidamente a baixa temperatura). Como na antiguidade já eram observados o uso de materiais geopolímeros em várias construções antigas clássicas, acaba ilustrando as propriedades mecânicas e a sua grande resistência à deterioração (DAVIDOVITS, 1991, CUNHA 2013).

O termo geopolímero deriva de polímeros inorgânicos, os quais possuem uma estrutura polimérica de silício-oxigênio-alumínio, onde sua obtenção se dá pela polimerização de matérias-primas naturais de origem geológica contendo aluminossilicato. Este cimento foi criado pela necessidade de encontrar um material com boa resistência ao calor devido aos incêndios que tomavam conta na França. Os materiais foram tratados como polímeros pelo fato de se policondensarem, ganhando forma e se endurecendo rapidamente à temperatura ambiente (MA; AWANG; OMAR, 2018).

### 2.1.2 Mecanismo de Formação dos Geopolímeros

Com a descoberta deste novo material, Victor Glukhovsky em 1959, propôs um modelo simplificado para explicar o processo de ativação alcalina do material. Este modelo (Figura 01) até hoje é utilizado para explicar de uma forma mais simples o processo de geopolimerização de materiais (DUXSON, 2007).

Figura 1: Modelo de Glukhovsky



Fonte: Duxson (2007).

Segundo Davidovits (1991), para a formação de um ligante geopolimérico é necessária uma reação de um aluminossilicato sólido dado como precursor, oriundo de pozolanas naturais, resíduos industriais ou agrícolas juntamente com uma solução aquosa de hidróxido ou silicato alcalino. O hidróxido ou o silicato alcalino aumentará o pH da solução, favorecendo a dissolução da camada mais externa, da superfície da partícula dos precursores sólidos.

O precursor é dado como um material aluminossilicato, isto é um material rico em Sílica e Alumínio tendo como requisitos necessários para sua ativação alta

solubilidade em meios básicos e alta disponibilidade de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  no meio ( SHI; JIMÉNEZ; PALOMO, 2011; CASTALDELLI, 2013). Já o ativador para a mistura do geopolímero é necessariamente qualquer substância que consiga fornecer cátions alcalinos, para a elevação do pH da mistura e que consiga facilitar a dissolução da  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  contidos no precursor (OLIVEIRA, 2018).

A geopolimerização apresenta uma reação de 4 estágios: i) precursores em contato com álcalis (em meio alcalino), ii) dissolução, iii) condensação e iiiii) endurecimento (DUXSON *et al.*, 2007; DEVENTER, 2009; SEVERO *et al.*, 2013; FIRDOUS; STEPHAN; DJOBO, 2018). Primeiramente para acontecer a geopolimerização deve haver contato direto entre um precursor com uma solução aquosa de elevada alcalinidade. Após ocorre o processo de dissolução que devido a elevada alcalinidade da mistura. O estágio da dissolução ocorre com o contato da solução ativadora com a superfície do aluminossilicato, devido à alta alcalinidade do sistema parte da superfície é dissolvida deixando os íons do Al e Si livres para reagir. Este estágio depende do grau de solubilidade da superfície e sua extensão bem como o pH e a temperatura do meio. Após a dissolução ocorre a difusão das espécies na solução para assim formar as novas ligações. No estágio de condensação as partículas existentes no início da solidificação formam cadeias poliméricas tridimensionais e estruturas de anéis formadas de ligações Si-O-Al-O, por fim ocorre o processo de endurecimento os poli (sialatos) (DUXSON *et al.*, 2007; DEVENTER, 2009; SEVERO *et al.*, 2013; FIRDOUS; STEPHAN; DJOBO, 2018).

Para uma completa geopolimerização devemos observar a temperatura, o pH e o cátion presente na solução alcalina. Os mesmos são os fatores que influenciam na formação do gel. A temperatura que normalmente pode variar de  $25^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$  que influenciará a cinética e as propriedades determinando a aplicação do geopolímero. O pH deve ser do meio alcalino podendo variar em torno de 11 para uma melhor dissolução do aluminossilicato. e um cátion metal alcalino tendo um maior tamanho atômico para favorecer a formação de oligômeros de silicatos maiores para a ligação do o Al  $(\text{OH})^{-4}$ . Ocasionalmente uma maior resistência no material. (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009; LIMA, 2018) .

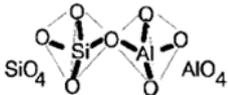
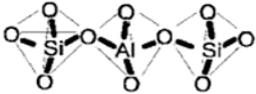
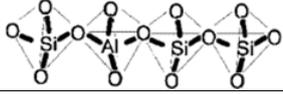
A utilização das pozolanas naturais como um ligante alternativo para o cimento é consideravelmente viável pelo fato de ser uma fonte de sílica e aluminas reativas precisas para a fabricação do geopolímero ou ligante. Para o meio ambiente, além de reduzir a emissão de  $\text{CO}_2$  gerados pelo uso de cimento Portland, a sua extração acaba

sendo simples, contribuindo para um custo mais baixo que as outras matérias-primas (FIRDOUS; STEPHAN; DJOBO, 2018).

### 2.1.3 Classificação

Em 1976 Davidovits propôs três estruturas silico-alumínio (polissialatos), representados através de uma cadeia molecular de estrutura amorfa à semicristalina constituída de silício, alumínio e oxigênio. As três estruturas silico-aluminato foram propostas devido à relação atômica dada por Silício (Si) e Alumínio (Al) (mostrados na Tabela 1). O gel formado na geopolimerização é apresentado na forma de  $M_2O \cdot mAl_2O_3 \cdot nSiO_2$ , em que geralmente o  $M$  diz respeito a parcela do álcali, tendo valor de aproximadamente 1, e o valor de  $n$ , varia entre 2 e 6. Já a parcela de Si é proveniente do precursor, bem como do ativador, sendo que no uso do silicato, o Si é incorporado ao gel pela sua solubilidade elevada. A presença de Si e Na são fatores determinantes para a formação do N-A-S-H, visto que o grau de polimerização da solução é relacionado diretamente a relação de  $SiO_2/Na_2O$  (FERNANDEZ-JIMENEZ e PALOMO, 2009).

Tabela 1: Classificação do cimento geopolimérico segundo Davidovits.

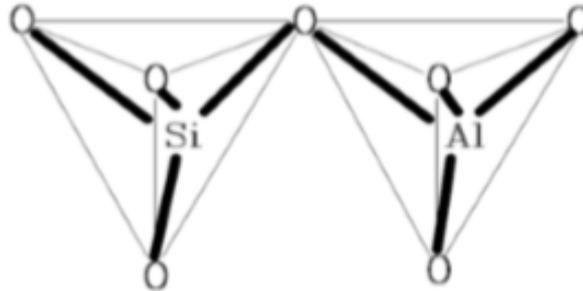
| Nome                   | Si/Al | Unidade repetidora            | Abreviação | Estrutura   |
|------------------------|-------|-------------------------------|------------|---|
| Polissialato           | 1:1   | $M_n-(Si-O-Al)_n$             | (M) - OS   |  |
| Polissialato-siloxo    | 2:1   | $M_n-(Si-O-Al-O-Si-O)_n$      | (M) - PSS  |  |
| Polissialato-dissiloxo | 3:1   | $M_n-(Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)_n$ | (M) - PSDS |  |

Fonte: Adaptado (DAVIDOVITS, 2002).

Em sua classificação observa-se a presença da nomenclatura “sialato” presente em todas as categorias, a mesma nomenclatura refere-se à abreviação silico-oxo-aluminato onde a rede baseia-se em tetraedros de  $SiO_4$  e  $AlO_4$  que se ligam

entre si pelo fato de compartilharem o mesmo átomo de oxigênio (DAVIDOVITS, 1991; RAMOS, 2017). A rede de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  está representado na Figura 2.

Figura 2: Rede de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  unidos pelo compartilhamento do oxigênio



Fonte (DAVIDOVITS, 1991).

Para Davidovits (2002), os provindos das reações de geopolimerização estão diretamente ligados ao processo de produção utilizado, e a relação Si/Al tem um grande impacto em relação a destinação de seu uso. Davidovits ainda classifica a destinação do uso do geopolímero através da sua relação Si/Al, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2: Aplicação do geopolímero devido a relação Si:Al.

| <b>Relação Si:Al</b> | <b>Aplicação do Geopolímero</b>   |
|----------------------|---|
| 20:1 < Si:Al < 35:1  | Resistente ao fogo e altas temperaturas   |
| Si:Al > 3:1          | Selantes para indústria e Ferramentas aeronáuticas (SPF Aluminium)  |
| Si:Al 3:1            | Proteção Anti-fogo compósitos com fibras; compósitos de 200°C a 1000°C; Equipamentos para fundição e Ferramentas aeronáuticas (Titanium proc) |
| Si:Al 2:1            | Cerâmicas e concretos com baixa emissão de CO <sub>2</sub> ; Encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos                                 |
| Si:Al 1:1            | Tijolos, Cerâmicas, Proteção Antifogo   |

Fonte Adaptado (DAVIDOVITS, 2002).

Para a produção dos geopolímeros há uma grande gama de precursores disponíveis, estes podem ser oriundos de materiais naturais que sofrem algum tipo de tratamento (proposital ou não), tornando-se fontes de aluminossilicato. Dentre estes materiais os mais comumente relatados são: as cinzas volantes, as escórias de alto forno, o metacaulim, resíduos agrícolas ou industriais e outras diversas pozolanas naturais, as quais vêm ganhando enfoque nas pesquisas de cimentantes alternativos nas últimas décadas (BIGNO, 2008; CASTALDELLI, 2013; BRITO et al., 2018).

Destacando os resíduos agrícolas e industriais, as cinzas residuais oriundas da queima do bagaço da cana-de-açúcar (CBCA) vêm aumentando constantemente. A tendência de aumento da produção para os próximos anos é devido ao aumento da produção de álcool como combustível. Por isso, hoje estuda-se o uso dessa cinza residual para misturas em concretos, argamassas e para a utilização como precursor em geopolímeros devido ao seu grande teor de sílica e seu potencial pozolânico.

#### **2.1.4 Vantagens e principais aplicações**

A principal proposta de aplicação de um material geopolimérico é como substituto ao cimento Portland devido ao apelo ecológico. Em suas vantagens encontra-se a redução da geração de CO<sub>2</sub> em sua fabricação. Além da oportunidade de se utilizar resíduos como matéria prima, que dependendo das características físico-químicas podem trazer propriedades interessantes para sua utilização, tais como rápido desenvolvimento de resistência mecânica e excelente durabilidade química (BORGES *et al.*, 2014).

Os geopolímeros apresentam comportamento mecânico similar ao cimento Portland, sendo que a resistência à compressão pode ser influenciada pela temperatura de cura. Autores relatam que um geopolímero curado em temperatura ambiente possui menor resistência em relação a um corpo de prova curado em temperaturas maiores. Fenômeno ocorrido pela aceleração da dissolução do aluminossilicato (precursor) podendo ser chamado esse processo de cura térmica propiciando ao geopolímero uma maior resistência a compressão em um curto prazo (LONGHI, 2015; CASAGRANDE, 2021).

## 2.2 REOLOGIA

### 2.2.1 Conceitos principais da Reologia

Para determinar as propriedades reológicas de um material, é importante compreender alguns conceitos básicos relacionados aos parâmetros reológicos. Dentro dos conceitos relacionados à reologia destaca-se a tensão, deformação e, por fim, de viscosidade. A tensão de um material na reologia está relacionada com a força aplicada por unidade área necessária para provocar o cisalhamento da suspensão. Já a deformação está associada as mudanças de posições de uma parte do material. A deformação pode ser dada por três movimentos diferentes: rotação sem deformação, deformação por cisalhamento e deformação por alongação (CASTRO, 2007).

Segundo Castro (2007) na reologia em termos de contribuições elásticas viscosas e inerciais descrevem as propriedades mecânicas de qualquer material. A deformação viscosa é dada pela taxa de cisalhamento. A taxa de cisalhamento é a mudança na velocidade do escoamento com uma distância medida em certos ângulos em relação à direção do fluxo. Por fim a viscosidade é denominada como relação entre taxa de cisalhamento e a tensão de cisalhamento, sendo utilizada para medir a resistência ao escoamento do material a qual nas argamassas está diretamente ligada ao teor de água utilizado na pasta, à origem do material utilizado, a geometria do material utilizado na mistura. Quanto maior a viscosidade maior a resistência ao escoamento do material (BRETAS; D'ÁVILA,2000).

### 2.2.2 Classificação do comportamento reológico

Os fluídos viscosos podem ser classificados em função do seu comportamento de fluxo ou reológico. Este comportamento envolve a relação entre resposta da viscosidade frente à taxa ou tempo de cisalhamento. Portanto, os fluídos podem ser classificados como: Newtonianos e Não-Newtonianos. A relação dada entre eles se dá através dos dados obtidos nos experimentos, obtendo assim o comportamento reológico do material (OLIVEIRA,2013; BRITO,2018).

Esse comportamento reológico é analisado através de uma relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento. A curva obtida da correlação desses parâmetros denomina-se curva de escoamento, a qual pode ser modelada através de relações matemáticas dada por cada modelo reológico(DE CASTRO; LIBORIO; PANDOLFEG,

2011). Na Tabela 3 é dada as principais equações que relacionam a tensão e a taxa de cisalhamento utilizados para o concreto em estado fresco.

Tabela 3: Modelo reológico e suas equações.

| <b>Modelo</b>     | <b>Equação modelo</b>  |
|-------------------|--|
| Newton            | $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$  |
| Bingham           | $\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$   |
| Herschel-Bulkley  | $\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$   |
| Lei das potências | $\tau = A \dot{\gamma}^n$<br>$n = 1$ , para fluido newtoniano<br>$n > 1$ , para fluido dilatante<br>$n < 1$ , para fluido pseudoplástico |
| Ostwald-de-Waele  | $\tau = \tau_0 + B \text{sen}^{-1}(\dot{\gamma} / C)$  |
| Robertson-Stiff   | $\tau = a(\dot{\gamma} + C)^b$   |
| Eyring            | $\tau = a \dot{\gamma} + B \text{sen}^{-1}(\dot{\gamma} / C)$  |
| Atzeni et al.     | $\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$   |

$\tau$  = tensão de cisalhamento;  $\tau_0$  = tensão de escoamento;  $\mu$  = viscosidade;  $\dot{\gamma}$  = taxa de cisalhamento; **A, a, B, b, C, K,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$**  = constantes.

Adaptado (DE CASTRO; LIBORIO; PANDOLFEG, 2011)

#### 2.2.2.1 Fluido Newtoniano

Segundo Brito (2018) o fluido mais simples é o newtoniano, o qual é remetido pela tensão ( $\tau$ ), sendo que a mesma é exatamente proporcional à taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), formando assim uma curva linear em seus resultados como demonstrado na Figura 3.

Figura 3: Curva de escoamento do fluido newtoneano



Fonte: Autor (2022).

Através da Figura 3 é possível ressaltar que uma das características principais de um fluido newtoniano é que o mesmo não possui tensão de cisalhamento inicial. Também é possível ser demonstrado em forma de Equação como na Equação 1 abaixo.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [1]$$

$\tau$  - Tensão de cisalhamento

$\eta$  - Viscosidade

$\dot{\gamma}$  - Taxa de Cisalhamento

Quando se fala em viscosidade absoluta sabe-se que a mesma mede qual será a resistência do fluido newtoniano constante em função taxa de cisalhamento. Resultando assim uma curva para o fluido newtoniano em linha reta, que passa pela origem e cuja inclinação é inversamente proporcional ao coeficiente de viscosidade. Assim, é necessário apenas um parâmetro reológico para a caracterização do seu comportamento ao escoamento (CASTRO, 2007).

#### 2.2.2.2 Fluido Não-Newtoniano

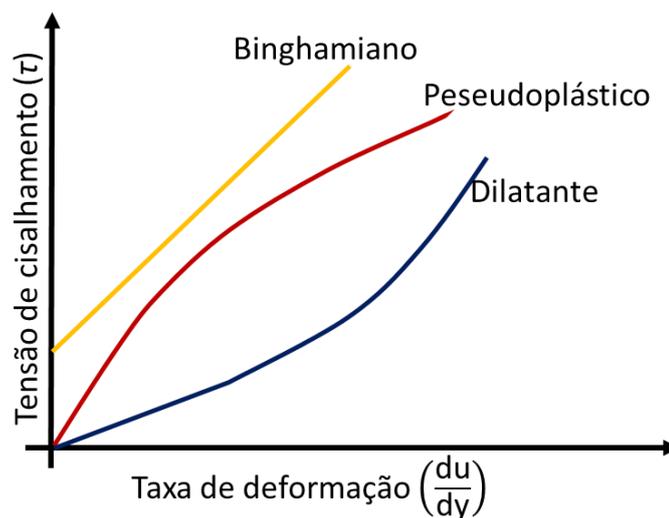
Denomina-se fluido não newtoniano os fluidos que não tem a viscosidade constante em uma determinada temperatura e pressão, sendo assim a viscosidade depende da relação entre a tensão e taxa de cisalhamento que acaba sendo não-

linear. Esse comportamento acaba resultando em sua ilustração uma linha que não seja reta, cujas suas propriedades não podem ser caracterizadas por uma única constante (TATTERSALL; BANFIL, 1983; CASTRO 2007).

Os fluídos não-newtonianos acabam se subdividindo em 3 classes cuja as quais são divididas dependendo do seu comportamento: os fluídos independentes do tempo, os que dependem do tempo e os que são viscoelásticos.

Os fluídos independentes do tempo são aqueles cuja taxa de cisalhamento é dada apenas pela tensão de cisalhamento e são subdivididos em fluídos dilatantes, Binghamianos ou plásticos e pseudoplásticos como demonstrado na Figura 4.

Figura 4: Comportamento reológico de fluídos independentes do tempo



Adaptado (FOX e McDONALD, 1998)

A classe Binghamianos ou plásticos segundo Sampaio (2017), se deve pela relação da proporcionalidade entre a tensão e a taxa de cisalhamento. Esse fluído possui uma tensão de cisalhamento inicial como demonstrado na Equação 2.

$$\tau = \tau_0 + \eta^\infty (\dot{\gamma}) \quad [2]$$

$\tau$  - Tensão de cisalhamento

$\eta^\infty$  – Viscosidade plástica de Bingham

$\dot{\gamma}$  – Taxa de Cisalhamento

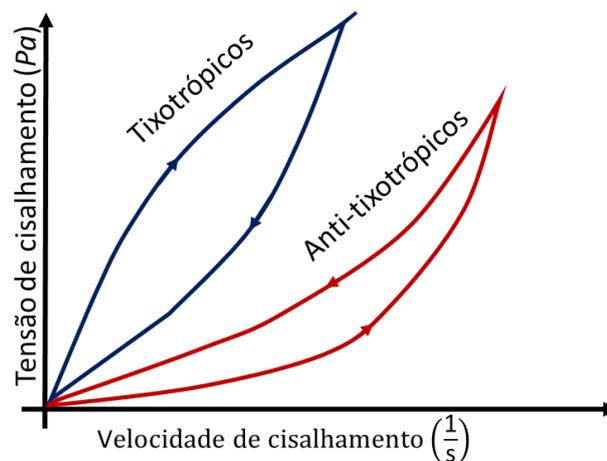
$\tau_0$  – tensão de escoamento

Os fluídos pseudoplásticos são aqueles que a sua curva de escoamento convencional remete a razão da tensão e taxa de cisalhamento. Esse fluído tem como principal característica a diminuição progressiva da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento (CASTRO 2007; OLIVEIRA 2013; SAMPAIO, 2017).

Os fluídos dilatantes correspondem aos fluídos que tem o comportamento contrário aos pseudoplásticos, isto é, a sua principal característica é o aumento progressivo da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento (OLIVEIRA, 2013).

Os fluídos denominados como dependentes do tempo estão totalmente ligados à relação da tensão e taxa de cisalhamento juntamente com o tempo em que o fluído foi cisalhado e eles se subdividem nas classes: tixotrópicos e reopéticos (anti-tixotrópicos ) como demonstrado na Figura 5.

Figura 5: Classificação dos fluídos dependentes do tempo.



Adaptado Moreno (2005).

Denomina-se fluídos tixotrópicos, aqueles que a consistência é influenciada pela duração do cisalhamento e pela taxa de cisalhamento. Normalmente nesses fluídos ocorre uma diminuição da viscosidade e a taxa de cisalhamento se encontra constante. Há uma quebra de estrutura pelo cisalhamento. Já os fluídos reopéticos há o aumento da viscosidade aparente enquanto a taxa de cisalhamento se encontra constante. Considera-se que nesse fluído há formação gradual da estrutura dada pelo cisalhamento (CASTRO, 2007).

Os fluídos viscoelásticos são os fluídos que apresentam em sua reologia sistemas com características tanto sólidas como líquidas, exibindo também uma recuperação parcialmente elástica após ter se deformado.

### **2.2.3 Reologia em materiais cimentícios**

Os concretos e argamassas a base de cimento Portland são os principais ligantes cimentícios utilizado dentro da construção civil e suas propriedades podem ser influenciadas pelas características dos seus constituintes, características como físico-químicas, granulometria e mecânicas. As características ideais para um material cimentício pode ser influenciado por vários fatores que impactam diretamente na aplicação e no comportamento do material como bombeamento, espalhamento, moldagem ou compactação (SATO *et al.*, 2012; SAMPAIO, 2017).

A maioria das técnicas utilizadas para caracterizar o material cimentício em seu estado fresco avalia a consistência do material para indicar sua moldabilidade, aderência e trabalhabilidade como no caso do teste de SLUMP regido pela NM 67/1998 (Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone), Table flow (determinação do índice de consistência da argamassa e consistência normal do Cimento Portland), Tempo de pega (através da penetração uma agulha de Vicat no material, o tempo de pega é determinado pela distância entre a agulha e a placa base é de  $(4 \pm 1)$  mm) e retenção de água.

Entretanto, para formulação e controle do material cimentício requer uma caracterização e estudo maior sendo convertidos esses dados em parâmetros reológicos. Pois a caracterização reológica está totalmente vinculada ao desenvolvimento tecnológico desse material, pois a partir do entendimento mais detalhado da influência de cada constituinte dentro do material, permitirá a adequação do material para utilizar todas as vantagens ou avaliar possíveis alterações com a finalidade maior de adequar as propriedades para seu determinado uso (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011 ; SIQUEIRA *et al.*, 2021).

Para adequar o produto e saber o destino correto e adequado para aquele tipo de concreto ou argamassa é necessário compreender o comportamento reológico do material. Entre as propriedades reológicas destaca-se a tensão de escoamento do material que está totalmente ligada a força necessária para agitar a pasta. Já a viscosidade impacta na fluidez do concreto que está interligada nas características de

moldabilidade do material, bombeamento e compactação do material a qual se não tiver uma fluidez adequada pode apresentar falhas na compactação reduzindo as propriedades mecânicas.

A caracterização reológica se dá através do estudo da reologia, ciência pela qual estuda-se a deformação e o escoamento dos materiais, submetidos a diferentes condições de tensões de cisalhamento e de deformação. Sendo assim, a reologia tem por finalidade nos mostrar a força necessária para conseguir uma certa deformação ou escoamento de um corpo ou predizer a deformação ou escoamento resultante da aplicação de forças em um corpo. Além disso com a análise do comportamento reológico se tem como principal objetivo garantir que o material tenha as propriedades reológicas adequadas para o seu uso sem que as suas características micro estruturais afetem o desempenho do material cimentício em seu estado final. Condições de aplicação não resulte em características micro estruturais que afetem a atuação dos mesmos no estado endurecido (CASTRO, 2007; ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011; SATO *Et al.*, 2012).

Entre as técnicas que quantificam os parâmetros reológicos encontra-se o ensaio com reômetro que traz como principal vantagem submeter a amostra do material em diferentes solicitações de cisalhamento simultaneamente. Dessa forma além de ser algo ágil e rápido, com o reômetro é conseguido compreender os fatores que influenciam o comportamento dos materiais cimentícios e os diferentes impactos que podem ser ocasionados pelos seus constituintes. Mesmo assim o uso de ensaios baseados em reômetros ainda é pequena, sendo de grande importância o estudo dessa ferramenta com análise das propriedades do estado fresco do material cimentício (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011; SATO *Et al.*, 2012).

#### **2.2.4 Fatores que afetam a reologia dos materiais cimentícios**

O comportamento reológico de materiais cimentícios como argamassa e concreto, estão completamente ligados a sua constituição, isto é, como é as proporções dos agregados graúdos e finos utilizadas na mistura (CARDOSO 2019). Segundo outros autores esse comportamento é influenciado por diversos fatores, sendo eles químicos, físicos como a relação água/cimento, fatores mineralógicos, condições submetidas na mistura, fatores de medição além da presença de aditivos (SEFFF; HOTZA; REPETTE, 2010).

#### 2.2.4.1 Distribuição granulométrica agregado utilizado

Segundo Siqueira *et al.* (2021), entre os fatores que podem afetar a reologia em matrizes cimentícias está a distribuição granulométrica, estando relacionada com a dimensão dos materiais adicionados pois os mesmos indicam a força que predominará sobre o material (SIQUEIRA *et al.*, 2021).

Quando as partículas forem menores as forças predominantes serão as relacionadas as superfícies devido ao fato da grande área superficial específica desse material. Já quando forem empregadas partículas maiores há a possibilidade da predominância das forças gravitacionais. Segundo Oliveira (2000) a adição de materiais que contenha em sua composição diferença de distribuição granulométrica poderá sofrer com os dois tipos de forças supracitados, que é o caso dos materiais cimentícios. Sendo necessário entender que para um escoamento adequado deve-se ter um efeito da superfície dos grãos finos e da massa do teor de grossos menor que a tensão de cisalhamento (SIQUEIRA *et al.*, 2021).

As partículas finas dentro de um material cimentício influenciam através da sua distribuição granulométrica forma das partículas e área superficial, devido ao fato que esse material juntamente com a água e os possíveis aditivos utilizado no material formam as matrizes que envolvem os agregados que compõem o material cimentício sendo responsáveis principalmente pela coesão do material. Essa matriz controla a fluidez do material de forma significativa, quanto menor o teor da matriz formada pelas partículas finas maior será o contato entre os agregados aumentando a viscosidade. Já caso houver uma elevada matriz a fluidez do material acaba sendo elevada devido ao fato de um menor contato entre os agregados ocasionando uma maior facilidade de movimentação dos agregados (SIQUEIRA *et al.*, 2021).

Porem vale ressaltar que é fundamental encontrar o teor ótimo de fino na composição do material, pelo fato que um teor muito alto de finos com sua alta área superficial consumirá mais a água livre dentro da composição diminuindo a fluidez. Outro fator importante na utilização de finos no material cimentício é o formato das partículas finas, pois quanto maior for sua irregularidade maior será a viscosidade. Precursores que possuem um formato esférico com baixa área superficial aumenta a fluidez da mistura. Já precursores com partículas no formato lamelar terá uma alta

área superficial aumentando assim a viscosidade e a tensão de escoamento da matriz (Castro 2007, SIQUEIRA et al., 2021).

Outro fator relevante é a quantidade de partículas grossas dentro do material cimentício, principalmente pelo teor de argamassa e ao formato irregular dos grãos podendo interferir no atrito ente eles. Assim compreende-se que um elevado teor de partículas grossas. ou um teor de finos muito baixo (matriz)as propriedades reológicas do material serão afetadas pelo maior contato entre as partículas grossas (SIQUEIRA et al., 2021).

#### 2.2.4.2 Teor de água

O teor de água utilizado em matrizes cimentícias é definida pela relação água/cimento. Além de estar totalmente ligada com as propriedades mecânicas, o teor de água pode ser considerado como um fator de interferência as propriedades reológicas do material, pelo fato de estar totalmente ligado ao controle da viscosidade do material (CASTRO 2007)

Segundo Franczak e Prevedello (2012), o teor de água influencia a tensão de limite de escoamento e a viscosidade. Quanto maior o teor de água dentro da matriz cimentícia menor será minha tensão de limite de escoamento, facilitando a deformação e a facilidade de manuseio do material. Sendo assim diminuindo a viscosidade da matriz. Porém deve-se atentar que com um elevado teor de água na matriz, poderá provocar a segregação dos constituintes. Por isso em certas situações aditivos plastificantes podem entrar como suporte para a redução da água dentro da matriz.

Já Cavalcanti (2013), relata que o teor de água está relacionado a lubrificação do grão, impactando na dissolução dos grãos de cimento juntamente com a distância entre os grãos, podendo reduzir ou aumentar os atritos intergranulares. Quanto maior o aumento do atrito entre os grãos (menor teor de água), terá maior viscosidade, e maior limite de escoamento.

#### 2.2.4.3 Influência do procedimento de mistura

Através do fato que o procedimento de mistura é o processo que visa reduzir e eliminar as heterogeneidades da matriz cimentícia acaba exercendo grande influência das misturas cimentícias. Sendo o tempo de mistura, o equipamento utilizado a velocidade de rotação a quantidade de material utilizado são os principais fatores atuantes nas propriedades reológicas (SIQUEIRA *et al.*, 2021)

Segundo Castro (2007) o procedimento da mistura está relacionado com a trabalhabilidade do material. Dependendo do processo de mistura adotado no processo de mistura dos constituintes irá variar o tempo de trabalhabilidade da matriz cimentícia impactando totalmente no tempo para transporte, bombeamento, injeção, espalhamento, moldagem e compactação do material.

#### 2.2.5 Reologia em argamassa

Para as argamassas é importante conhecer e avaliar as propriedades desse material no estado fresco, dentre essas propriedades destaca-se as reológicas. As propriedades reológicas de uma argamassa, está totalmente interligada com a qualidade do produto final. Para Cardoso (2019), uma boa argamassa deve apresentar ótimas condições de viscosidade e tensão de escoamento ideal para suportar as tensões ocasionadas pelo seu próprio peso e pela placa cerâmica após aplicação.

Para analisar a reologia do material é necessário determinar algumas propriedades do material entre elas se encontra a consistência, tensão de cisalhamento, tensão de escoamento e viscosidade. Sousa; Bauer (2002) trazem um compilado de ensaios com a sua descrição demonstrados na Tabela 4, no qual mostra alguns parâmetros reológicos de argamassas.

Tabela 4: Ensaio para achar os parâmetros reológicos

| <b>Ensaio</b>        | <b>Referência</b>  | <b>Configuração</b>  |
|----------------------|--|--|
| Mesa de consistência | NBR7215  | Consistência   |
| Cone de penetração   | BS 1377  | Consistência   |
| Vane teste           | Alves (2002)<br>Austin(1999)   | Tensão de cisalhamento   |
| Squeeze flow         | Fuki (2017)  | O estado de homogeneização do sistema após o processo de mistura inferindo |
| Reômetros            | (BRITO et al., 2018;<br>KOUTNÍK et al.,<br>2020; OLIENICK<br>FILHO, 2018; RIFAAI<br>et al., 2019a, 2019b;<br>ZHANG et al., 2018) | Tensão de cisalhamento e viscosidade                                       |

Fonte: Adaptado Sousa; Bauer, (2002)

A maioria dos ensaios descritos na Tabela 4 acima remetem a um parâmetro reológico, quando é mencionado a avaliação dos parâmetros reológicos de concretos ou argamassas se torna ineficaz o estudo da trabalhabilidade do material apenas com um parâmetro reológico (consistência ou tensão de cisalhamento) como é o caso dos ensaios mesa de consistência, Vane teste e Cone de penetração. Para uma análise mais detalhada do parâmetro reológico os ensaios utilizados frequentemente são o Squeeze Flow e Reômetros. Cujo, quando utilizados em conjunto consistem em uma detalhada compreensão da argamassa em seu estado fresco permitindo uma compreensão do comportamento do sistema no estado fresco, remetendo em resultados sobre o estado de dispersão e homogeneização da argamassa durante e após a mistura, repercutindo no estado final do produto (FRANÇA 2013; FUKI 2017).

A seguir na Tabela 5 um compilado com alguns estudos atuais correlacionando resultados de reologia realizados em pastas cimentícias, sendo enfatizados os fatores que acabam influenciando as propriedades reológicas.

Tabela 5: Reologia em argamassas.

| <b>Autor</b>                 | <b>Materiais utilizados</b>  | <b>Tipo de ensaio</b> | <b>Condições de ensaio</b>   | <b>Resultados</b>   |
|------------------------------|--|-----------------------|--|---|
| <b>Marangon et al (2020)</b> | Substituição em massa de Cimento Portland por sílica de casca de arroz | Vicat                 | Foram realizados aos 15, 60, 120 e 180 min   | A medida que o teor de Sílica de casca de arroz aumenta, a fluidez das argamassas diminui   |
| <b>Duan et al., (2020)</b>   | Adição de resíduos de construção e demolição;                          | Reômetro              | pré-cisalhada a uma velocidade de $5 \text{ s}^{-1}$ por 15 s. Após, a taxa de cisalhamento aumentou de 0 para $30 \text{ s}^{-1}$ nos primeiros 60 s. | A tensão de escoamento, a viscosidade plástica e a tixotropia aumentam com a adição de RPs.   |
| <b>Thakare et al (2020)</b>  | cimento-escória compostas com resíduos industriais secundários         | Reômetro              | Taxa de cisalhamento foi linearmente variada de $0 \text{ s}^{-1}$ a $40 \text{ s}^{-1}$ em um tempo de 50 s   | As curvas de fluxo mostram que a resistência ao cisalhamento aumenta com a adição de fibra de borracha a substituição do agregado miúdo pelas fibras de borracha mostrou o aumento da viscosidade |

Fonte Autor (2022)

### 2.2.6 Reologia em concreto fresco

Para o concreto fresco é de extrema importância conhecer as propriedades reológicas, devido ao fato dela influenciar o material desde a fase de mistura, transporte até o seu lançamento na obra. Quando falamos das propriedades reológicas de um concreto fresco estamos falando de termos como trabalhabilidade e consistência que estão totalmente interligados a composição do concreto. Tendo como ênfase que essas propriedades acabam afetando a produtividade, a qualidade do material ou até mesmo as propriedades mecânicas do concreto. (OLIVEIRA, 2013; SCHANKOSKI, 2017).

Sendo assim através das propriedades reológicas consegue-se observar de forma mais precisa os fatores que interferem e influenciam a trabalhabilidade do material (Castro 2007; ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011) Dentre as técnicas de caracterização do estado fresco do concreto destaca-se os métodos encontrados na Tabela 6.

Tabela 6- Ensaios realizados para caracterização do estado fresco do concreto.

| <b>Ensaio</b>                | <b>Principal Parâmetro Mensurado</b> |
|------------------------------|--------------------------------------|
| Abatimento de tronco de cone | Tensão de escoamento                 |
| Abatimento Modificado        | Tensão de escoamento e Viscosidade   |
| V- funnel Test               | Viscosidade                          |
| Orimet Test                  | Viscosidade                          |
| Habilidade enchimento        | Viscosidade                          |
| Remoldagem de Powers         | Viscosidade                          |
| Reômetros                    | Tensão de escoamento e Viscosidade   |

Fonte: Adaptado Romano; Cardoso; Pileggi, (2011)

A maioria das técnicas que foram nominadas na Tabela 6 que caracterizam o concreto em seu estado fresco, acabam avaliando a facilidade do fluxo em diversas condições sendo necessário transformar e converter os resultados em grandezas reológicas. Sendo importante o uso de técnicas de caracterização do concreto que tragam os parâmetros reológicos do material em estudo com diferentes solicitações físicas que podem ocorrer no processo de aplicação do mesmo como o ensaio com reômetros (ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011).

Porém há uma dificuldade na utilização dos reômetros para avaliar as propriedades reológicas do concreto no estado fresco, devido o tamanho das partículas dos agregados que constituem o concreto. Já existem reômetros de proporção adequada para a caracterização de concretos no estado fresco., porém

pelo elevado custo e sua baixa difusão no mercado ainda é pouco empregado (MELO, 2005; Mendes 2016).

Alguns autores optaram por estudar as propriedades reológicas em pastas ou argamassas em aparelhos convencionais fazendo após a correlação dos resultados para a reologia em concreto. Porém a estudos retratam que diversos fatores podem interferir nas características reológicas de concreto entre elas destaca-se a granulometria e morfologia dos agregados, as adições minerais, o tipo de cimento utilizado, aditivos superplastificantes, teor de agregado e de água (BANFILL, 2003; MENDES, 2016).

### **2.2.7 Reologia em pasta de cimento**

A reologia das pastas cimentícias é de trocar para a proposta de dosagem dos componentes do concreto, pois esses ao interagirem interferem diretamente na trabalhabilidade do material, podendo afetar a qualidade e as propriedades finais do produto.

O comportamento reológico das pastas de cimento é importante na produção e qualidade do material, uma vez que estão relacionadas as propriedades no estado fresco do material. Esse comportamento é influenciado por diversos fatores, sendo eles químicos, físicos como a relação água/cimento, fatores mineralógicos, condições submetidas na mistura, fatores de medição além da presença de aditivos (SENF; HOTZA; REPETTE, 2010).

Alguns pesquisadores buscaram compreender o comportamento reológico das pastas cimentícias ou argamassa, sendo correlacionada com as propriedades reológicas das argamassas e do concreto. A seguir, na Tabela 7, um compilado com os estudos atuais sobre reologia realizados em pastas cimentícias, sendo enfatizados os fatores que acabam influenciando as propriedades reológicas.

Tabela 7: Reologia em pastas cimentícias.

| <b>Autor</b>                              | <b>Materiais utilizados</b>   | <b>Ciclo de cisalhamento</b>   | <b>Resultados</b>  |
|---|---|--|--|
| <b>Douba;Ma;Kawashima (2022)</b>          | Diferentes tamanhos de partículas, fases cristalinas e tratamentos de superfície proporções de nano-TiO <sub>2</sub> na pasta | Pré-cisalhamento a 300 s <sup>-1</sup> por 2 min e um descanso de 2 min para homogeneizar a pasta, seguido de uma aceleração de 0 a 100 s <sup>-1</sup>  | Quanto menor o tamanho de partícula dos NTs, maior a área de superfície adsorvida mais água e superplastificava a superfície, o que resulta em uma maior tensão de escoamento/viscosidade mínima |
| <b>Xiao et al (2021)</b>                  | pastas de cimento sem ou com aditivos minerais (cinzas volantes, escória granulada de alto-forno e sílica ativa)              | Teve um pré-cisalhamento a uma taxa de cisalhamento de 100 s <sup>-1</sup> . Após foi aumentada de 0 s <sup>-1</sup> a 200 s <sup>-1</sup> em 60 s, então continuamente cisalhada por 30 s a 200 s <sup>-1</sup> e reduzida linearmente de 200 s <sup>-1</sup> para 0 s <sup>-1</sup> em 60 s. | Houve o crescimento da área tixotrópica das pastas com aditivo mineral é ligeiramente menor em comparação com a pasta de cimento controle  |
| <b>V.Jittin, A. Bahurudeen (2021)</b>     | Cinza de bagaço de cana e cinza de casca de arroz como materiais cimentícios alternativos                                     | A pasta foi pré-cisalhada a uma taxa de cisalhamento de 150 s <sup>-1</sup> . Após foi aumentada de 0 para 100 s <sup>-1</sup> em 180 s. Após um tempo de equilíbrio de 120 s.   | A adição de cinzas de resíduos agrícolas aumenta a tensão de escoamento e a viscosidade da pasta de cimento  |
| <b>Filho; Sinhorelli; Medeiros (2020)</b> | pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim   | Os ensaios foram do tipo rampa, que consistem na aplicação de taxa crescente de cisalhamento com aceleração de 0 a 100s <sup>-1</sup> em 2 min, seguida de desaceleração até 0, em mais 2 min  | Os resultados que o resíduo provocou uma diminuição na tensão de escoamento inicial. o que pode contribuir para uma mistura com maior facilidade de manuseio, ou seja, menos viscosa.            |
| <b>Vallurupalli et al (2020)</b>          | teores de 0,04%, 0,15% e 0,29% de óxido de grafeno, em massa de cimento   | através da diminuição gradual na taxa de cisalhamento de 70 para 10 s <sup>-1</sup> com cada passo de cisalhamento aplicado por 20 s para atingir o equilíbrio, que foi validado em cada taxa de cisalhamento.   | O aumento das propriedades reológicas pode ser causado pela redução da água livre devido à absorção de água pelo óxido de Grafeno  |
| <b>Jesus et al (2019)</b>                 | Pastas de cimentos contendo pó de borracha de pneu  | Pré-cisalhamento por 3 min do repouso até 0,2 s <sup>-1</sup> , após uma rampa ascendente de 0,2 a 44,95 s <sup>-1</sup> por 1 min e finalmente uma curva descendente de 48 para 0 s <sup>-1</sup> em 20 etapas de 30s cada  | A borracha aumentou a tensão de cisalhamento dinâmica (limite de escoamento) das pastas em maior escala com taxas de cisalhamento muito baixas.  |

Fonte Autor (2022)

Entre os modelos reológicos utilizados pelos autores para descrever o comportamento reológico das pastas cimentícias destaca-se os modelos de Bingham e de Herschel-Bulkley, modelos utilizados para fluídos com tensão de escoamento inicial propriedade ligada a facilidade de manuseio do material (quanto maior a tensão de escoamento inicial, maior a dificuldade de manuseio) (SEFFF; HOTZA; REPETTE, 2010; ROMANO; CARDOSO; PILEGGI, 2011; OLIVEIRA,2013).Analisando a literatura juntamente com a Tabela 7, observa-se que muitos fatores influenciam a reologia das pastas de cimento. Dentre elas destaca-se a natureza e características do cimento utilizado, a natureza das adições químicas como superplastificantes e aditivos ou adição de minerais para incorporar na pasta.

### 2.2.8 Reologia em Geopolímero

Como no cimento convencional o comportamento reológico do geopolímero é bastante complexo já que vários fatores influenciam o resultado: relação líquido-sólido (BOCA SANTA *et al.*, 2018), concentração de NaOH (RIFAAI *et al.*, 2019), razão molar da  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (KOUTNÍK *et al.*, 2020), pode ser afetada por fim até pela dissolução e geopolimerização no seu próprio sistema de suspensões (ZHANG *et al.*,2018).

Na Tabela 8 encontra-se um compilado de estudos que abordam a reologia dos materiais geopoliméricos sendo relatado as condições de ensaio utilizados para avaliar o comportamento reológico e produto utilizado para a produção da pasta geopolimérica (Precursor/ativador).

Tabela 8: Estudos das propriedades reológicas em geopolímero

| Autor               | Materiais utilizados                                    | Pré cisalhamento                            | Ciclo de cisalhamento                      | Resultados   |
|---------------------|---|---|--|--|
| Palomo et al (2005) | Cinza Volante (4 Fontes diferentes). Hidróxido de Sódio | 2 min a 50 s- 1. Próximos ciclos com 5 min. | 0 a 10 s-1 10 a 200 s-1 200 a 0 s-1 em 5 s | A relação líquido-sólido e concentração do ativador alcalino influenciaram diretamente na tensão de escoamento e na viscosidade. Maior concentração e maior fração de sólidos apresentaram valores mais altos de viscosidade e tensão de escoamento. |

|   |  |  |  |  |
|---|--|--|--|--|
| <b>Palacios, Banfill e Puertas (2008)</b> | Escória de Alto Forno. 1) Mistura de Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio 2) Hidróxido de Sódio              | 2 min a 200 s-1.                             | 1 a 10 s-1 (1 min). 10 a 200 s-1 (1 min). 200 a 50 s-1 (1 min)                     | O modelo de Herschel-Bulkley melhor ajustou os resultados das misturas com silicato de sódio, enquanto as misturas produzidas com NaOH melhor ajustaram o modelo de Bingham. |
| <b>Criado et al (2009)</b>                | Cinza Volante . Combinação de Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio   | -  | 1 min em 50, 100, 150, 200, 250 rpm. 1 min em 200, 150, 100 e 50 rpm               | Os aditivos utilizados resultaram nas misturas uma redução na viscosidade e tensão de escoamento da pasta.   |
| <b>Romagnoli et al (2012)</b>             | Metacaulim. Combinação de Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio   | -  | 0 a 300 s-1 e 300 a 0 s-1 em 300 s. Fim do ciclo com 10 s em 0 s-1                 | O principal resultado foi a influência da relação líquido-sólido, quanto maior era o teor de sólidos maior a viscosidade e taxa de cisalhamento.                             |
| <b>Puertas et al (2014)</b>               | Escória de Alto Forno. 1) Hidróxido de Sódio 2) Mistura de Hidróxido e Carbonato de Sódio 3) Silicato de Sódio | 2 min a 100 s-1.                             | 0 a 10 s-1(1 min). 10 a 100 s-1 (1 min). 100 a 50 s-1 (1 min). 50 a 0 s-1 (1 min). | O modelo que se enquadrou com as pastas ativadas com Hidróxido de quanto maior a concentração de ativadores maior a viscosidade e tensão de escoamento.                      |
| <b>Romagno li et al (2014)</b>            | Cinza Volante. Combinação de Silicato de Sódio e Hidróxido de Sódio  | 1 min a 100 s-1. Seguido de 60 s de descanso | 0 a 400 Pa. 100 pontos medidos   | Todas as amostras puderam ser melhor ajustadas pelo modelo de Herschel-Bulkley. A relação líquido sólido foi o fator importante.   |

|                            |  |  |   |  |
|----------------------------|--|--|---|--|
| <b>Rifaai et al (2019)</b> | Diferentes teores de cinza volante; diferentes concentrações de NaOH | pré-cisalhamento a 200 s <sup>-1</sup> por 120 s | 200 a 0,27 s <sup>-1</sup>  | O fator mais influente foi a concentração do ativador (NaOH) O aumento da concentração até 7 mol / L resultou em um aumento da tensão de escoamento, do módulo de armazenamento e da taxa de rigidificação dos geopolímeros. No entanto, o uso de concentrações mais altas de 7 mol / L resultou em uma diminuição considerável desses parâmetros. |
| <b>Zhou et al. (2021)</b>  | Cinza vulcânica ; Concentrações de NaOH 6,8 e 10 mol                 | -  | aumentar de 0,01 s <sup>-1</sup> a 100 s <sup>-1</sup> em 275 se então diminuir de 100 s <sup>-1</sup> para 0,01 s <sup>-1</sup> ao mesmo tempo | O modelo qe melhor se ajustou foi de Bingham. A diferença na distribuição do tamanho das partículas é uma das principais razões para a diferença no comportamento reológico da cinza vulcânica. O tamanho menor do resíduo aumenta o Efeito de Trelixa entre as partículas e dificulta o fluxo livre das moléculas de água.                        |
| <b>Bigno (2008)</b>        | Cinza volante e escória  | 1 min a 600 rpm                                  | taxas de cisalhamento crescentes 600, 300, 200, 100, 6 e 3 rpm, estabelecidas a cada 5 ou 10 min  | Um dos fatores que contribuiu para este comportamento foi a diferença das áreas específicas dos reagentes utilizados necessitando de maior volume de solução para molhar as partículas e manter a trabalhabilidade.  |

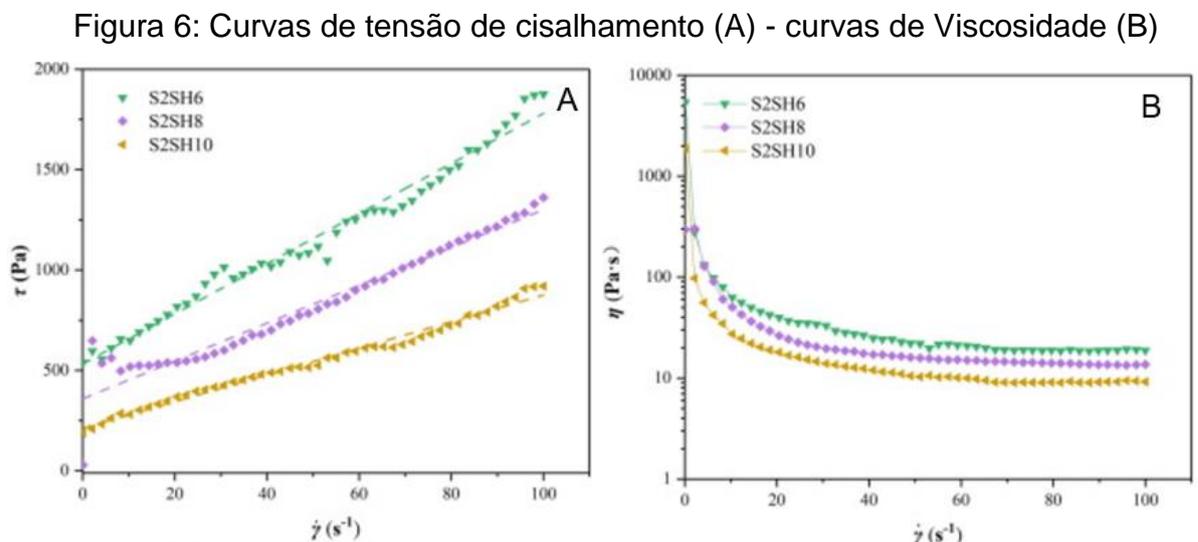
Fonte: Autor (2022)

Através dos estudos abordados consegue assim constatar que as propriedades reológicas de um geopolímero pode ser influenciada por diversos fatores assim como os outros materiais cimentantes. Dentre todos os fatores destaca-se a influência do ativador alcalino e do precursor, que dependendo da proporção dentro do material geopolimérico pode afetar diretamente a viscosidade e a tensão de escoamento do material em estudo.

A reologia em material geopolimérico também deve ser estudada para entender o comportamento e sua trabalhabilidade para uma possível aplicação no processo de

engenharia, como bombeamento, injeção, espalhamento, moldagem e compactação. Em seus estudos Zhou *et al* (2021) comparativos foram projetados usando dois tipos de cinzas vulcânicas de diferentes regiões e diferentes concentrações de NaOH (6, 8 e 10 mol/L) como ativador alcalino.

Na Figura 6 A e B encontra-se os resultados obtidos por Zhou *et al* (2021) em uma das cinzas vulcânicas que se ajustaram ao modelo de Bingham. Em seus estudos observou que com o aumento da concentração de NaOH, a tensão de escoamento ( $\tau$ ) e o coeficiente de viscosidade de plasticidade ( $\eta$ ) das pastas diminuem. Em outras palavras o autor relata que a solução de NaOH tem a capacidade de superplastificante.



Autor Zhou *et al* (2021).

Já em relação a Figura 6- B que traz a viscosidade, a qual diminui significativamente com o aumento da taxa de cisalhamento, representando um comportamento de escoamento pseudoplástico. Conforme há o aumento da taxa de cisalhamento, a maioria das partículas são dispostas em ordem e não podem ser mais orientadas, mostrando que a viscosidade tende a um valor constante (ZHOU *et al.*, (2021).

Existem algumas pesquisas que avaliam o geopolímero para aplicação em rejuntas, entre elas se encontra de Güllü *et al.* (2019). Em seus resultados ele observou o rejunte com geopolímero contém um comportamento dilatante, mas em alguns casos comportamentos pseudoplásticos e Bingham. Conseguiu uma

comparação semelhante com o cimento nativo em um rejunte geopolimérico com 30% a 60% de sílica ativa.

Já Halasta; Rovnanik; Mikhailova, (2019) trazem a reologia do material geopolimérico para revestimento que trouxe em suas misturas de geopolímeros foram compostas por metacaulim e silicato de sódio com três diferentes relações  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$ . No qual observou-se uma alta trixotropia (fenômeno em relação ao tempo que o material leva para sair de uma determinada microestrutura e ir para outra, e ainda voltar para a microestrutura inicial), esse parâmetro aumentou com a redução do módulo de sílica. Os autores estavam interessados em afetar como a mistura se comportará, como ela será transferida para o substrato e espalhada sobre sua superfície. Sendo que a melhor se enquadrou foi as amostras com 90% do conteúdo ativador demonstradas na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros reológicos de amostras com 90% de conteúdo de ativador.

| <b><math>\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}</math></b> | <b>Viscosidade<br/>(Pa.s)</b> | <b>Tensão<br/>(Pa)</b> | <b>Tixotropia<br/>(Pa . S)<sup>-1</sup></b> |
|--|-------------------------------|------------------------|---|
| <b>1,6</b>   | 5,43                          | 5,59                   | 4588  |
| <b>1,4</b>   | 7,56                          | 13,3                   | 5404  |
| <b>1,2</b>   | 12,54                         | 25,6                   | 14654                                       |

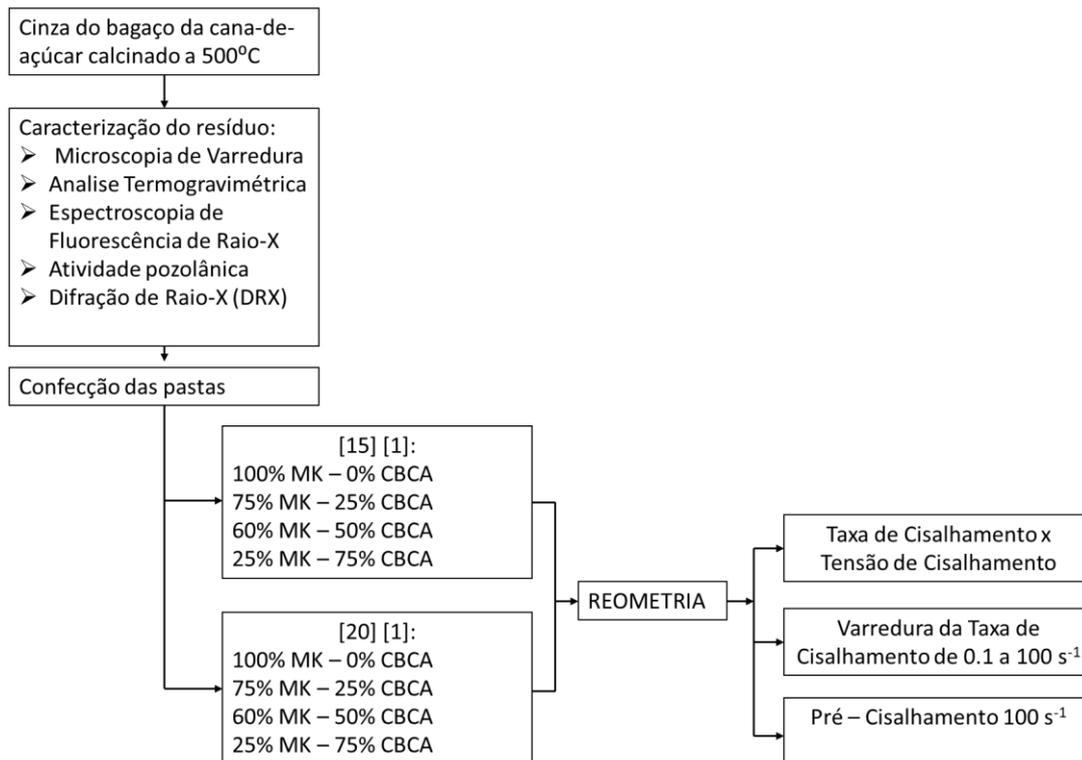
Adaptado Halasta; Rovnanik; Mikhailova, (2019).

Ao listar os diferentes fatores que interferem na reologia dos materiais geopoliméricos o presente trabalho se fez para expandir o entendimento existente considerando a avaliação do comportamento reológico de pastas de geopolímero havendo a substituição do metacaulim por cinza do bagaço da cana-de-açúcar variando a concentração de álcalis ( $\text{NaO}_2$ ) de 15% a 20%.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste capítulo são descritas os materiais e métodos previstos de forma detalhada. Na Figura 7, observa-se de forma esquemática, os procedimentos de ensaio para cada etapa do trabalho.

Figura 7: Fluxograma.



Fonte (AUTOR, 2021)

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 Precursor

O precursor utilizado na composição do compósito substituindo o metacaulim foi a cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA). O bagaço da cana-de-açúcar foi coletado “in natura” na empresa Coopercana, que está localizada no município de Porto Xavier no estado do Rio Grande do Sul. O processo de calcinação do bagaço da cana-de-açúcar foi realizado através da mufla, em temperatura fixa a 500 °C por 1 hora. com o objetivo de eliminar a matéria orgânica existente na matéria prima (FERNANDES FILHO, 2012).

A escolha da temperatura de calcinação se deu através da literatura, cujo bagaço da cana-de-açúcar demonstrou uma estrutura mais amorfa à 500°C, foram resfriadas a uma taxa de 10°C/min (CASTALDELLI, 2013). Na Figura 8 encontrasse a cinza após o processo de calcinação na mufla. Já o metacaulim utilizado foi o metacaulim comercial (MetaMax – Basf).

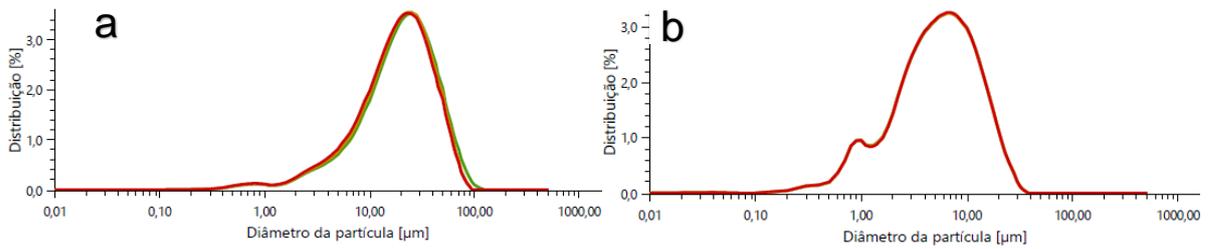
Figura 8: Cinza do bagaço da cana de açúcar



Fonte autor (2022)

Casagrande (2021), em seus estudos traz a granulometria dos precursores sendo os mesmos utilizados para o estudo presente. Em seus estudos destacou—se O tamanho médio dos grãos obtidos para a CBC foram de 23,2 µm e para o metacaulim 6,8 µm demonstrados abaixo (Figura 9):

Figura 9: Granulometria a laser a- CBCA/ b- metacaulim



Fonte (CASAGRANDE, 2021)

Para o metacaulim não foi necessária a realização da caracterização da composição química. Pois a empresa fornecedora apresenta uma ficha técnica do material demonstrada na Tabela 10.

Tabela 10: Propriedades físico-químicas do Metacaulim fornecidas pela MetaMax.

| Propriedades Físico-químicas do Metacaulim |                                    |
|--|------------------------------------|
| Componentes químicos                       | Metacaulim (MetaMax)               |
| SiO <sub>2</sub>                           | 55,0                               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 0,6                                |
| K <sub>2</sub> O                           | 0,2                                |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 41,9                               |
| CaO  | 0,0                                |
| TiO <sub>2</sub>                           | 1,8                                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>              | -                                  |
| MgO  | -                                  |
| SO <sub>3</sub>                            | 0,1                                |
| MnO  | 0,0                                |
| Cl   | -                                  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>              | 0,1                                |
| ZnO  | 0,0                                |
| ZrO <sub>2</sub>                           | 0,01                               |
| SrO  | 0,01                               |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>             | 0,01                               |
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 0,00                               |
| <b>Perda ao Fogo</b>                       | <b>3%</b>                          |
| <b>Atividade Pozolânica Chapelle</b>       | <b>880 mg Ca(OH)<sub>2</sub>/g</b> |
| <b>Massa Específica</b>                    | <b>2,50 kg/L</b>                   |

Fonte: Metamax

### 3.1.2 Ativador

A solução ativadora empregada foi o silicato de sódio alcalino ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) do tipo C-112 com densidade de  $1,480 \sim 1,670 \text{ g/cm}^3$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), pH de 12,0, viscosidade de  $800 \sim 30000 \text{ cP}$ , peso molecular de 194,00 e uma relação sílica/sódio de 2,20 com percentuais máximos de 33% de óxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), 15,5% de óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Sendo juntamente misturado com uma solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) com 99% de pureza. A relação de água utilizada para a solução ativadora foi de 27 g ( $\text{H}_2\text{O}$ ) para um teor de álcalis de 15% e 22,4 g de  $\text{H}_2\text{O}$  para o teor de álcalis de 20%.

A escolha dos ativadores foi realizada através da literatura, através da sua ampla utilização como ativador na mistura geopolimérica (BIGNO, 2008; CASTALDELLI, 2013; RIFAAI *et al.*, 2019; HALASTA; ROVNANIK; MIKHAILOVA, 2019; ZHANG *et al.*, 2020).

### 3.1.3 Composição da mistura do geopolímero

Para a presente pesquisa, a confecção das pastas foi realizada através da dosagem dos geopolímeros realizadas pela Casagrande (2021), a qual seguiu a dosagem proposta na pesquisa realizada pelo autor Longhi *et al.* (2019). A formulação empregada para a produção da pasta geopolimérica teve como consideração a razão do módulo de sílica ( $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ ), o qual foi fixado no valor 1,0. E para a concentração do teor de álcalis serão adotados uma variação de  $\text{M}_2\text{O} = 15\%$  e  $20\%$ .

A preparação da pasta geopolimérica iniciou com a separação e pesagem dos componentes de cada amostra, após foi realizado o preparo da solução do ativador. Primeiramente, devido ao hidróxido de sódio ser um material sólido, o mesmo foi diluído em água já dosada para a mistura. O recipiente de preparo da solução escolhido foi de vidro. 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 aos poucos no ativador sob regime de mistura constante. Esse procedimento foi realizado para os 8 traços descritos abaixo (Tabela 11), oriundas da proposta de dosagem da autora Casagrande (2021).

Tabela 11: Formulação empregada na pasta geopolimérica.

| Descrição                  | Mk (g) | CBC (g) | NaOH (g) | SS (g) | H <sub>2</sub> O (g) |
|----------------------------|--------|---------|----------|--------|----------------------|
| 100%MK / 0% CBC [15] (1,0) | 50,00  | 0,00    | 5,00     | 24,95  | 27,00                |
| 75%MK / 25% CBC [15] (1,0) | 37,50  | 12,50   | 5,00     | 24,95  | 27,00                |
| 50%MK / 50% CBC [15] (1,0) | 25,00  | 25,00   | 5,00     | 24,95  | 27,00                |
| 25%MK / 75% CBC [15] (1,0) | 12,50  | 37,50   | 5,00     | 24,95  | 27,00                |
| 100%MK / 0% CBC [20] (1,0) | 50,00  | 0,00    | 6,65     | 32,90  | 22,4                 |
| 75%MK 25% CBC [20] (1,0)   | 37,50  | 12,5    | 6,65     | 32,90  | 22,4                 |
| 50%MK / 50% CBC [20] (1,0) | 25,00  | 25,00   | 6,65     | 32,90  | 22,4                 |
| 25%MK / 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<sub>2</sub>) em porcentagem e os valores apresentados com a simbologia ( ) representam o módulo de sílica (MS).

Fonte: Adaptado Casagrande, 2021.

## 3.2 MÉTODOS

### 3.2.1 Ensaios de caracterização do resíduo

#### 3.2.1.1 Microscopia eletrônica de varredura

O ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foram realizados com o intuito de analisar a morfologia da Cinza do bagaço da cana-de-açúcar calcinada a 500 °C. Para a análise não foi metalizada a amostra, houve o aumento de 500 vezes a amostra. As microscopias eletrônicas de varredura foram realizadas no laboratório de materiais da Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Guaratinguetá.

#### 3.2.1.2 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA), foi realizada na Universidade de Caxias do Sul – UCS, na cidade de Caxias do Sul, estado do Rio Grande do Sul, com a finalidade de determinar a perda de massa em função da temperatura dos resíduos calcinados

à 500°C. As análises foram realizadas em um analisador termogravimétrico Shimadzu – modelo TGA-50. A taxa de aquecimento utilizada nos testes 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 e 900°C.

### 3.2.1.3 Espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX)

Para analisar a composição do material utilizado como precursor do geopolímero foi realizada a FRX. Para a realização do ensaio foi utilizado o equipamento de modelo EDX 7000 da marca Shimadzu. Sendo que primeiramente a fim de eliminar qualquer vestígio de materiais orgânicos e a possível presença de água no material foi realizado o ensaio de perda ao fogo (PF), seguindo os padrões da norma ASTM D7348-07 cuja a qual determina o ensaio de perda ao fogo por ignição de materiais sólidos. Após isso o material foi prensado em forma de pastilha afim de fabricar amostras para a realização da análise química dos elementos constituintes no resíduo. O ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural – LAMACI, de Criciúma.

### 3.2.1.4 Atividade Pozolânica

A reatividade pozolânica dos precursores foi determinada através do método de Chapelle modificado seguindo os critérios imposto pela NBR 15895:2010. O resultado se dá através da análise da capacidade do material em fixar o hidróxido de cálcio quando mantido em uma solução aquosa com óxido de cálcio.

O ensaio consistiu 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). Cujas qual, permaneceu 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 conseguindo assim estimar a reatividade pozolânica do material. O ensaio foi realizado tanto para a cinza do bagaço da cana-de-açúcar quanto para o metacaulim. O ensaio foi realizado no laboratório de química do curso de Engenharia Civil da Faculdade Meridional – IMED, campus de Passo Fundo.

### 3.2.1.5 Difração de Raios-X (DRX)

A difração de Raios-X será utilizada pela vantagem de ter maior facilidade de operação, por analisar com rapidez e de forma ampla as faixas de tamanho das partículas e também por caracterizar a distribuição das dimensões dos cristalitos. O objetivo principal da realização desse ensaio foi determinar as fases cristalinas e amorfas do precursor para a obtenção da pasta geopolimérica.

O ensaio será realizado com a CBCA calcinada a 500 °C. O método utilizado para a realização do ensaio será o modo Step, com Scan speed de 0,5s e Scan step de 0,03° no intervalo de 0 a 70 segundos, com ângulos entre 5° e 100°. 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.

### 3.2.2 Reometria

Para o ensaio de reometria dos traços estabelecidos, após a mistura dos constituintes do traço para a pasta geopolimérica é realizado uma oscilação de cisalhamento de 100 s<sup>-1</sup> por 60 segundos de acordo com Favier *et al* (2014). Esse procedimento é denominado como um pré-cisalhamento afim de garantir a calibragem do equipamento e conseguindo encontrar as condições ótimas para a realização do ensaio. O equipamento utilizado foi um reômetro oscilatório modelo RHEOPLUS/32 V3.21.

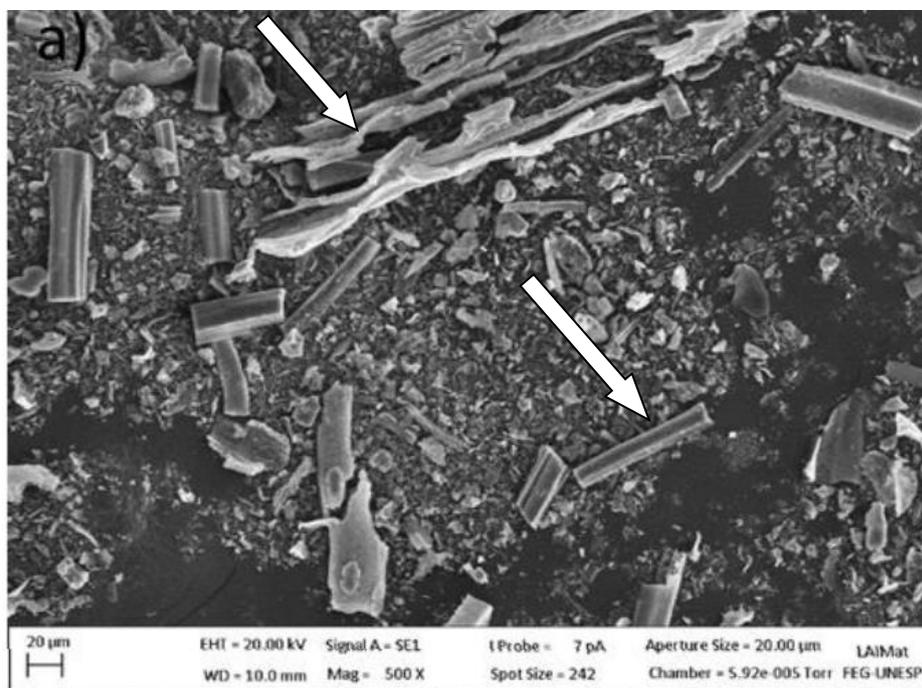
Após o estabelecimento das condições iniciais, os 8 traços, foram ensaiados variando a taxa de cisalhamento de 0,1 s<sup>-1</sup> a 100 s<sup>-1</sup> permitindo relacionar e comparar o comportamento da viscosidade e da tensão de escoamento e em função da taxa de cisalhamento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Através do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível fazer a análise da morfologia dos resíduos da cana-de-açúcar calcinados em. A Figura 10 apresenta a imagem de MEV em um aumento de 500 vezes da CBC.

Figura 10: Microscopia Eletrônica de Varredura da cinza do bagaço da cana-de-açúcar ampliada 500x



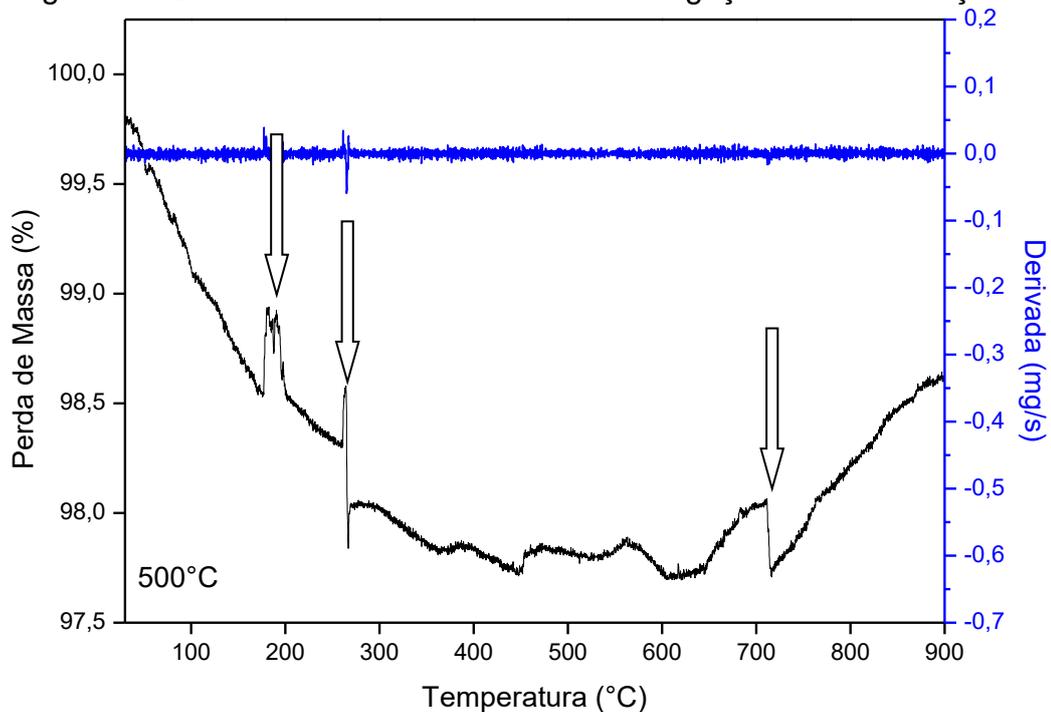
Fonte: (Autor 2021)

Ao analisar a Figura 10 é possível constatar que a cinza do bagaço de cana de açúcar possui uma superfície rugosa e de formato irregular, ainda é possível observar que as cinzas dos resíduos possuem uma superfície porosa, condizentes com os resultados obtidos por Apolônio (2017). Pode-se inferir que a maior presença de partículas alongadas na amostra expressa a possível presença de matéria orgânica. Segundo Cruz (2021) essas partículas alongadas são fibrilas, isto é, partes da celulose aas quais não foram fraturadas.

## 4.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise das CBCA por meio da análise termogravimétrica (TGA), permitiu identificar as transformações de fases do material quando submetidos a elevadas temperaturas. A Figura 11 apresenta os dados de variação, juntamente com a sua derivada, quando submetidas ao ensaio de TGA. Através na análise revela que houve uma perda de massa na 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 demonstrando que o processo de calcinação não foi completa concluído.

Figura 11: Curva TG e derivada da cinza do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte (Autor,2022)

A partir da temperatura de 720°C ocorre a decomposição de óxidos presente na amostra, gerando oxidações e conseqüentemente ganho de massa na amostra (CRUZ, 2021). Na literatura encontrasse também que ao aumentar a temperatura os óxidos de ferro se transformam em Goethita, Hematita e Magnetita mencionado por Silva (2013). Já através da análise de Amaral (2014), o pico localizado em 720°C está relacionado à reorganização do arranjo estrutural pela queima do mineral do quartzo,

sendo transformado de quartzo  $\alpha$  para quartzo  $\beta$  confirmando a predominância de sílica em sua composição. Quando encontrado na natureza, a forma dele é quartzo, se transformando em quartzo  $\beta$  a partir de 573°C.

#### 4.3 ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX)

Para a produção do geopolímero é necessário utilizar um material rico em aluminossilicato, isso é, que contenha uma porcentagem alta de sílica e alumínio em sua composição. Para informações da composição química da CBCA foi realizado a FRX exemplificada na Tabela 12.

Tabela 12: Composição química da CBCA em termos de óxidos

| <b>Componentes químicos</b>        | CBCA                   | Metacaulim             |
|------------------------------------|------------------------|------------------------|
|                                    | Valores (%)            | Valores (%)            |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 57,9                   | 55                     |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 17,4                   | 0,6                    |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 5,9                    | 0,2                    |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 4,5                    | 41,9                   |
| <b>CaO</b>                         | 4,0                    | 0                      |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 2,9                    | 1,8                    |
| <b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 2,1                    | 0                      |
| <b>MgO</b>                         | 1,9                    | 0                      |
| <b>SO<sub>3</sub></b>              | 1,9                    | 0,1                    |
| <b>MnO</b>                         | 0,6                    | 0                      |
| <b>Cl</b>                          | 0,2                    | 0                      |
| <b>V<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>  | 0,1                    | 0,1                    |
| <b>ZnO</b>                         | 0,1                    | 0                      |
| <b>ZrO<sub>2</sub></b>             | 0,03                   | 0,01                   |
| <b>SrO</b>                         | 0,02                   | 0,01                   |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0,02                   | 0,01                   |
| <b>Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>  | 0,00                   | 0                      |
| <b>Perda ao fogo</b>               | 2,3                    | 3                      |
| <b>Massa Específica</b>            | 2,61 g/cm <sup>3</sup> | 2,50 g/cm <sup>3</sup> |

Autor (2021)

Ao analisar a cinza do bagaço da cana-de-açúcar e do metacaulim observa-se que os mesmos podem ser utilizados como material pozolânico pois segue algumas especificações na NBR 12653 dados pelos critérios como, o somatório dos elementos

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  de todas as amostras são maiores que 70%, o percentual de perda ao fogo também é menor que percentual máximo estabelecido pela NBR 12653 que é 10%.

Também foi observado para a cinza do bagaço da cana-de-açúcar valores próximos aos encontrados na literatura, sendo que as cinzas apresentaram as mesmas condições de queima na temperatura próximas a 500 °C e de processo de moagem. Esses valores estão apresentados na Tabela 13. Uma porcentagem de óxido de silício variando de 63 a 43,90% e de alumínio variando de 0,1% a 26% foi obtida fazendo que a CBCA estudada esteja dentro do padrão encontrado na literatura.

Tabela 13: Composição química da CBCA encontrada na literatura

| Composição química      | Autores                            |                |                    |   |
|-------------------------|------------------------------------|----------------|--------------------|---|
|                         | Cordeiro; Andreão; Tavares, (2019) | Santos, (2017) | Castaldeli, (2013) | Cordeiro, Todelo Filho e Fairbairn (2009) |
| $\text{SiO}_2$          | 63,3                               | 43,90          | 51,83              | 60,96                                     |
| $\text{CO}_2$           | -                                  | 15,6           | -                  | -   |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 8,1                                | 5,8            | 26                 | 0,1                                       |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 3,6                                | 3,60           | 11,8               | 0,1                                       |
| $\text{TiO}_2$          | 0,4                                | 0,6            | 0,9                |   |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 3,8                                | 8,1            | 2,7                | 90  |
| $\text{CaO}$            | 4,6                                | 4,4            | 3,0                | 6   |
| $\text{SO}_3$           | 2,6                                | 2,9            | -                  | -   |
| $\text{MnO}$            | 0,3                                | 0,3            | < 0,10             | 0,5                                       |
| $\text{MgO}$            | 3,8                                | 2,9            | 1,1                | 8,7                                       |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | -                                  | 0,4            | -                  | 0,7                                       |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | -                                  | 3,09           | -                  | 8,34                                      |
| OUTROS                  | 3,2                                | 0,5            | 2,57               |   |
| Perda ao fogo           | 3,2                                | 8              | 66,82              | 5,7                                       |

Autor (2021).

De acordo com Cordeiro, Toledo Filho, Fairbairn (2009), a porcentagem significativa de Sílica na composição da CBCA e do metacaulim favorecem uma boa atividade pozolânica a qual pode ser inferido pelo índice de atividade pozolânica que por normativa, o qual relata que o índice mínimo consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , deve ser acima 300 mg/gOs resultados encontrados para atividade pozolânica dos precursores são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14: Índice de Atividade Pozolânica dos Precursores

| <b>Índice</b>     | CBCA                              | Metacaulim                        |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| <b>Atividade</b>  | 321,86 mg                         | 880 mg                            |
| <b>Pozolânica</b> | $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ | $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ |

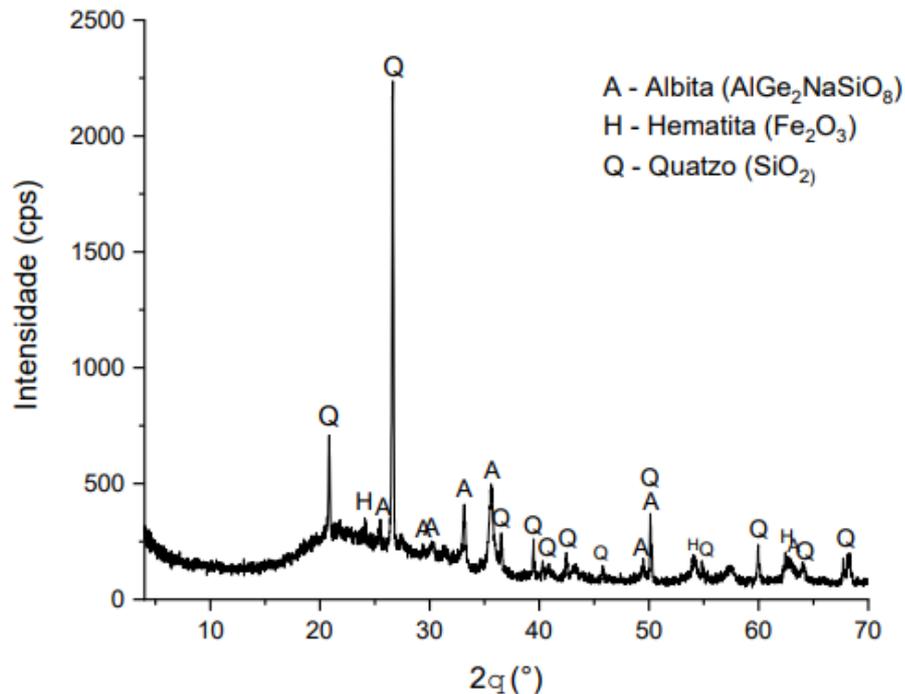
Fonte autor (2021)

Analisando os resultados do índice de atividade pozolana através do método de Chapelle modificado, os valores obtidos são superiores ao índice mínimo de consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  de 300 mg/g indicado por Raverdy *et al.* (1980), ultrapassando 6,79% do mínimo. Os resultados obtidos são condizentes com o encontrado na literatura (CORDEIRO, TOLHEDO FILHO, FAIRBAIRN.,2009).

#### 4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS - X (DRX)

Através do ensaio de Difração de Raios-X, foi possível analisar a mineralogia dos materiais, identificando as fases cristalinas e amorfas das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar e do metacaulim como demonstrado na Figura 12e na Figura 13. Para um material ser considerado como pozolânico, devem apresentar halos amorfos, considerando que a reatividade do material está relaciona a quantidade de material amorfo presente na amostra .

Figura 12: Difratoograma da CBCA



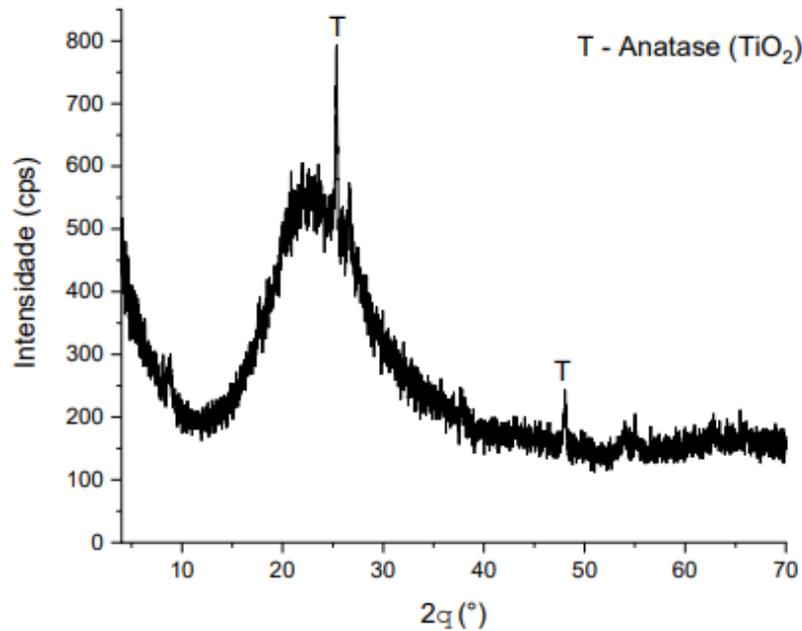
Fonte: Autor (2022).

Analisando a Figura 12, é possível observar a presença de um halo ( $2\theta=2^\circ$  a  $2\theta=20^\circ$ ) que caracteriza a fase amorfa do material. Também é possível verificar que os picos ( $2\theta=21^\circ$  e  $2\theta=26,5^\circ$ ) indicam que a estrutura da CBC apresenta as fases cristalinas da sílica na forma de: quartzo (Q), hematita (H) e albita (A) que correspondem com os resultados encontrados pelos autores Jittin, Bahurudeen (2021). Os autores também relatam que a grande quantidade de quartzo pode ser oriunda a contaminação durante a colheita ocasionada em contato com o solo, pelo fato de não haver um processo de lavagem desse material para tirar as impurezas.

Outro fator impactante relatado sobre o pico de encontrado em  $2\theta=26,5^\circ$ , é que o qual é relacionado ao tempo em que a cinzas ficaram dentro da mufla, após o processo de calcinação, essa cristalinidade pode se dar devido à inércia térmica do forno ao ser desligado (SILVA *et al*, 2019).

Em comparação com a DRX da cinza de cana de açúcar a Figura 13 remete a análise das fases cristalinas do metacaulim, o qual possui maior predominância por fases amorfas.

Figura 13: Difratoograma do Metacaulim (MetaMax Basf).



Fonte: Autor (2022).

Com base na análise obtida por meio do ensaio de difração de raio-X realizado na Figura 13, pode-se observar que o metacaulim apresenta-se em estado predominantemente amorfo, com um halo amorfo entre ( $2\theta=15^\circ$  e  $2\theta=35^\circ$ ) e picos cristalinos de Anatásio ( $2\theta = 26^\circ$ ,  $48^\circ$ ) que corroboram com os resultados encontrados por Andrade (2019) e Alvarenga (2018).

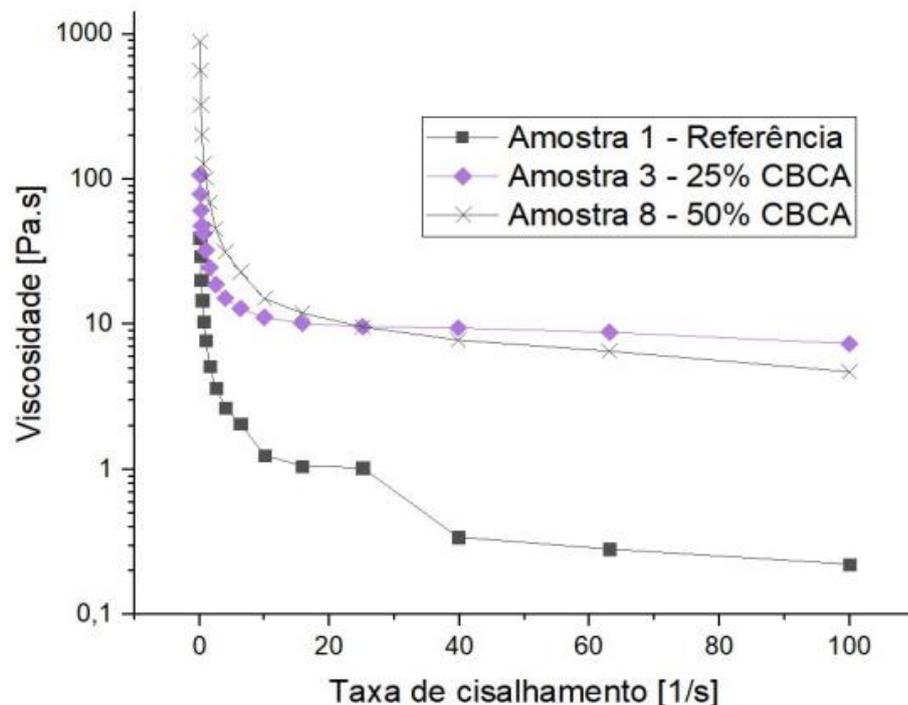
#### 4.4 REOMETRIA

##### 4.4.1 Viscosidade versus taxa de cisalhamento

O ensaio reológico foi realizado após a preparação das pastas geopoliméricas, com exceção da amostra 6 que gerou um material com maior rigidez, isto é o material obteve uma viscosidade inicial muito alta danificar o equipamento utilizado, sendo assim impossibilitado a sua análise no reômetro. Os geopolímeros é dito ser um fluido pseudoplásticos (baseado nos principais processos de transformação – extrusão e injeção - onde temperatura e cisalhamento são altas) que tem como principal característica a diminuição progressiva da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento (CASTRO 2007; OLIVEIRA 2013; SAMPAIO, 2017). No entanto para baixas taxas de cisalhamento o comportamento observado é newtoniano. Esse comportamento é observado em processos de termoformagem e calandragem.

A influência da cinza da cana-de-açúcar dentro da pasta geopolimérica foi um dos principais fatores a serem analisados. As Figuras 14 e 15 apresentam o comportamento da viscosidade em função da taxa de cisalhamento para as amostras com 15% e 20% de álcalis, respectivamente. Uma diminuição da viscosidade em função da taxa de cisalhamento é observada para todas as amostras. No entanto, o aumento do resíduo promoveu um aumento da viscosidade aparente. As amostras de referências obtiveram um comportamento mais linear da viscosidade em função da taxa de cisalhamento. Com a adição da cinza da cana-de-açúcar na pasta geopolimérica (chegando a 50% de adição da cinza) a viscosidade inicial foi maior, indicando que quanto maior a adição de CBCA, maior é a viscosidade e menor é a capacidade de moldabilidade. Menor capacidade de moldabilidade maior gasto energético e condições de processo, aumentando a probabilidade de aparição de bolhas aumenta pois necessita-se uma maior quantidade de “energia” para misturar a pasta.

Figura 14: Viscosidade x Taxa de cisalhamento - amostras com 15% de álcalis

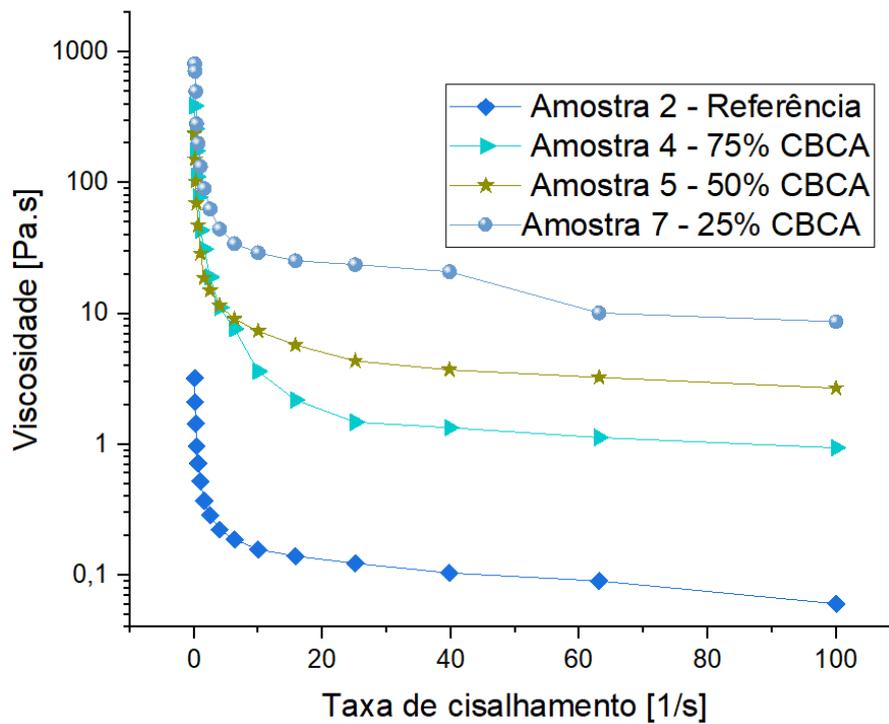


Fonte Autor (2022)

Já em relação à influência da concentração de álcalis dentro da pasta geopolimérica com o aumento da concentração de álcalis (NaOH) (Figura 15), há uma

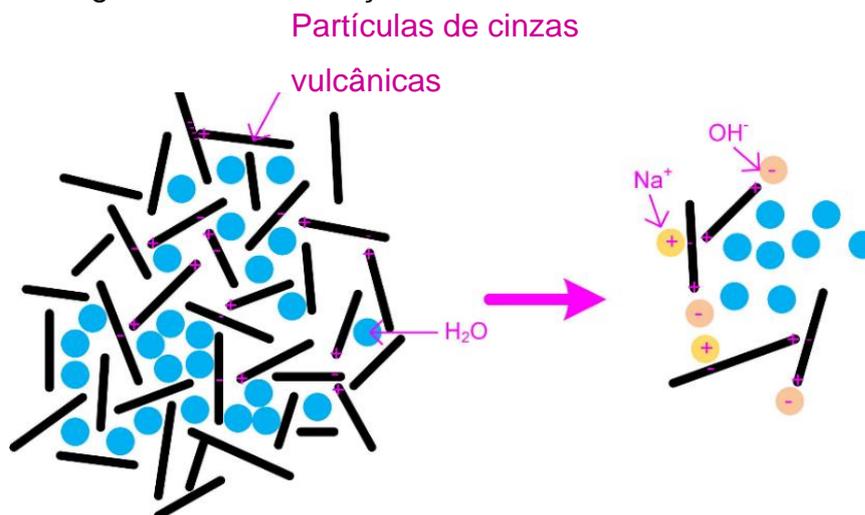
diminuição na viscosidade inicial de todos os traços. Esses resultados condizem com os de Zhou *et al.*, (2021) o qual traz como explicação a solução de NaOH tem a capacidade de superplastificante.

Figura 15: Viscosidade x Taxa de cisalhamento - amostras com 20% de álcalis



Fonte: Autor (2022)

Esse efeito o qual é explicado pelo Efeito Trelça causado por partículas do precursor utilizado. Essas partículas possuem carga negativa na superfície e uma carga positiva na extremidade se atraindo entre si e formando uma estrutura de trelça (Efeito Trelça), onde as moléculas de água ficam presas dificultando o fluxo livre como demonstrado na Figura 16. As moléculas de água ficam presas na trelça, dificultando o fluxo livre. Já ativador no caso o NaOH dissocia os íons sódio adsorvidos pelo precursor e a extremidade atrai os íons de hidróxido carregados negativamente enfraquecendo o efeito trelça, fazendo com que a água escape e diminua a viscosidade.



Para uma melhor compreensão das propriedades reológicas em relação das propriedades mecânicas dos geopolímeros na Tabela 15, fez -se uma comparação com os resultados de resistência a compressão de Casagrande (2021), a qual utilizou os traços condizentes com o do estudo.

Tabela 15: Comparação da viscosidade inicial com o ensaio de resistência a compressão de Casagrande (2021).

| Amostras   | Relação SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15% álcali          |  | 20% álcali          |  |
|------------|--|---------------------|--|---------------------|--|
|            |  | Viscosidade Inicial | Resistência a compressão (Mpa) (CASAGRANDE 2021) | Viscosidade Inicial | Resistência a compressão (Mpa) (CASAGRANDE 2021) |
| Referência | 1,3  | 39,5                | 22,7   | 3,21                | 47,09  |
| 25% CBCA   | 1,5  | 107                 | 20   | 810                 | 32   |
| 50% CBCA   | 1,8  | 891                 | 16,3   | 236                 | 23,5   |
| 75% CBCA   | 1,3  |                     | 16   | 386                 | 17,9   |

Fonte Autor (2022).

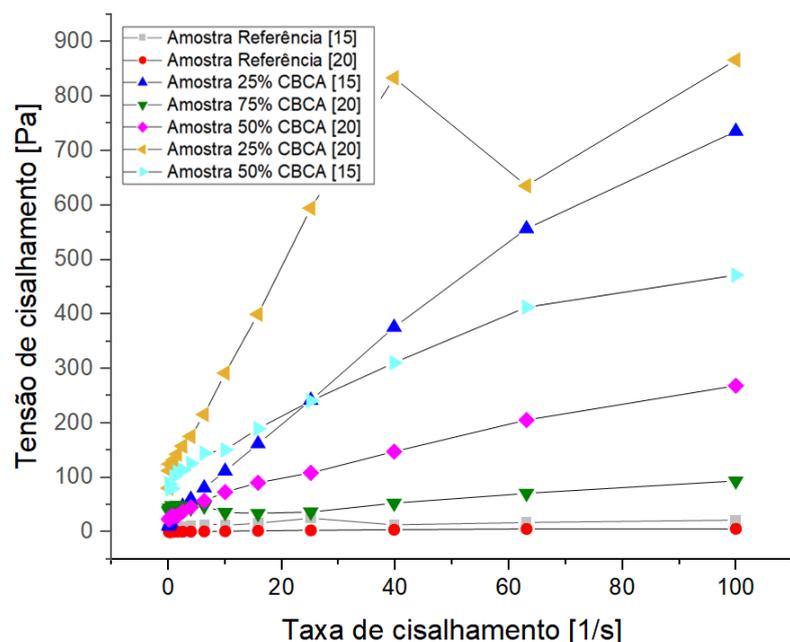
É constatado que no geral, quando comparado a viscosidade e a resistência a compressão, observou-se que não houve uma tendência em seus resultados quando comparado a porcentagem de álcali dentro da pasta geopolimérica. Porém quando comparado o teor de CBCA dentro do material geopolimérico contendo 15% de álcali, é notável que quanto maior a quantidade de cinza do bagaço da cana de açúcar menor minha resistência a compressão e maior a viscosidade da pasta geopolimérica que pode estar relacionado a fluidez da pasta quando está sendo moldado o corpo de prova.

#### 4.4.2 Tensão de cisalhamento versus taxa de cisalhamento

O tipo de fluido obtido pode ser melhor compreendido visualizando o comportamento de taxa de cisalhamento x tensão de cisalhamento (Figura 17). A amostra livre de cinza de cana de açúcar, isto é, o traço de referência, com o teor de álcalis em 20% apresentou um comportamento de um fluido pseudoplásticos que trazem como principal característica a curva reológica saindo da taxa e tensão de cisalhamento em 0 ocorrendo um aumento da tensão de cisalhamento conforme minha taxa de cisalhamento aumenta até certo ponto após ocorre a diminuição progressiva da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento. O mesmo refere-se a amostra que possui 25% cinza (15% álcalis) e 50% de CBCA (20% álcalis).

Por outro lado, as amostras com teor de álcalis em 15% com 0% teor de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, a amostra com 50 % cinza do bagaço de cana-de-açúcar e as amostras com 20% de teor de álcalis apresentaram um comportamento diferente entre elas. Uma tensão inicial é necessária para o fluido começar a escoar sendo característico de um fluido Binghamiano. Isso pode ser devido a maior concentração de teor de álcalis (teor de álcali em 20) e uma maior porcentagem de substituição do metacaulim. Nesse caso o material se comporta como um corpo rígido em baixas tensões, porém flui como um líquido viscoso em maiores tensões.

Figura 17: Tensão de Cisalhamento x Taxa de cisalhamento



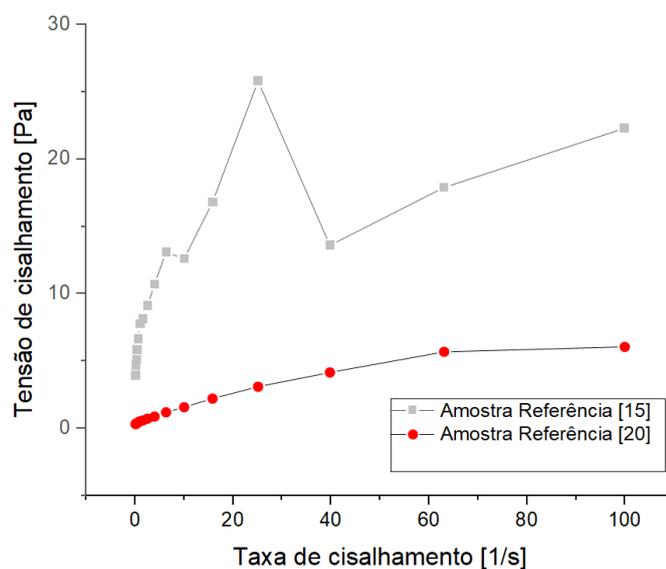
Fonte Autor (2022)

Analisando a classificação do comportamento do fluido através das curvas reológicas comparando com as curvas de fluxos conhecidas pela literatura, é perceptível a ligação da mudança de comportamento do fluido e a cinza da cana-de-açúcar. Foi observado que o aumento da porcentagem de CBCA promoveu a mudança do comportamento um fluido Pseudoplástico para Binghaminiano .

O comportamento reológico do fluido variou devido à rigidez da cinza dentro do geopolímero. As amostras com maiores teores de cinza do bagaço da cana-de-açúcar possuíram uma maior rigidez inicial comparados com as amostras com metacaulim. necessitando uma maior força para começar a escoar. Segundo Girish et al 2021, com o aumento de cálcio oriundo do precursor acelera a reação do gel Ca-Al-Si ocasionando uma mistura mais rígida. o resultado corroborou com a composição química encontrada na FRX, onde o metacaulim não possui CaO em sua composição e a cinza do bagaço de cana de açúcar (CBCA) possui cerca de 4% de CaO. Portanto quanto maior a porcentagem de CBCA no traço maior será a viscosidade. Também é encontrado na literatura que quanto maior a inclinação do gráfico tensão x taxa de cisalhamento maior será a viscosidade do material colaborando com os resultados encontrados no gráfico de viscosidade.

Para uma melhor visualização das amostras de referência (0% CBCA) foi realizado a reescala do gráfico (Figura 18), com isso foi compreendido a influência do teor de álcalis no comportamento reológico da pasta geopolimérica.

Figura 18: Curva reológica dos traços de referência (0% CBCA)



Fonte (Autor 2022).

Como demonstrado na Figura 18, o comportamento reológico da curva sem a incorporação do resíduo houve mudança do comportamento reológico o fluido com 20% de álcalis se comportou como um fluido pseudoplástico tendo o início da sua curva em zero já o fluido com o teor em 15% de álcalis foi necessária uma força inicial para o material começa a escoar melhor.

## 5 CONCLUSÃO

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 por meio da análise comprovou-se a ineficácia do processo de calcinação adotado corroborando com os resultados do MEV onde apresenta partículas irregulares sendo aparentemente porosas.
- 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. Também se destaca a presença de  $\text{CaO}$  com o aumento de cálcio oriundo do precursor acelera a reação do gel Ca-Al-Si ocasionando uma mistura mais rígida.
- O teor de ativação alcalina influenciou diretamente na reologia do material quanto maior a concentração de álcalis dentro da pasta geopolimérica com o aumento da concentração de álcalis ( $\text{NaOH}$ ) ocorrem uma diminuição na viscosidade inicial de todos os traços.
- A quantidade de cinza do bagaço de cana-de-açúcar influenciou diretamente no comportamento reológico aumentando a rigidez da pasta geopolimérica e a viscosidade do mesmo. Conforme foi aumentado a % de cinza de cana de açúcar houve a passagem de um fluido Binghamiano para Pseudoplástico com limite de escoamento.
- Analisando as amostras foi perceptível através de referências compreender que quanto maior a viscosidade da pasta geopolimérica menor é a resistência do material.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como continuação do presente trabalho sugerem-se alguns estudos complementares:

- Investigar outro resíduo ou outro aditivo que visem a obtenção de materiais com densidades diferentes
- Investigação de outras temperaturas de cura e de tempo nas propriedades mecânicas visando entender as influências das viscosidades obtidas.
- Fazer um comparativo das propriedades reológicas oriundas de matrizes cimentícias provindas do cimento Portland com o geopolímero

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Materiais pozolânicos - Requisitos. NBR 12653.** Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. NBR 7215: 1996.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4534>

ALMEIDA, R.P.A Propriedades de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar produzidas com lixiviação com vinhoto, queima controlada e moagem ultrafina. Rio de Janeiro, 2020. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2014.

AMARAL, M. C. **Avaliação da incorporação de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em tijolo solo-cimento.** Rio de Janeiro, 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2014.

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.

AUSTIN, S. A. ROBINS P. J. and GOODIER C. I., **The rheological performance of wet-process sprayed mortars.** Magazine of Concrete Research, no. 5, (1999) 341-352.

ALVES N. J. D., **Avaliação dos Aditivos Incorporadores de Ar nas Argamassas de Revestimento.** Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, (2002)

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh cement and concrete –a review.** In. Proceedings of the 11th international cement chemistry congress, 2003

BIGNO, I. C. **Geopolímeros À Base De Resíduos Agrícolas E Agro-Industriais.** [s.l.] Instituto Militar de Engenharia, 2008.

BOCA SANTA, R. A. A. et al. Microstructural evaluation of initial dissolution of aluminosilicate particles and formation of geopolymer material. **Particuology**, v. 41, p. 101–111, 2018.

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

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 1377.** Determination by Liquid limit by Cone Penetrometer Method. London, BSI, 1975.

BRETAS, R. E.; D'AVILA, M. A. **Reologia de Polímeros Fundidos.** São Carlos: EdUFPRSCAR, 2000.

BRITO, W. DA S. et al. Evaluation of the rheological and mechanical behavior of the synthesized geopolymer with residue waste. **Revista Materia**, v. 23, n. 3, 2018a.

CARDOSO, Dilson Nazareno Pereira. **Influência do teor de cinza volante na reologia de argamassa de assentamento: fabricado com reciclagem de resíduos**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2014. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

CASANOVA, R. F. **Análise da resistência mecânica de pastas geopoliméricas produzidas com cinza do bagaço de cana-de-açúcar como precursor alternativo**. 2021. Dissertação (Mestrado)- Faculdade Meridional- IMED, Passo Fundo, 2021 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo De Geopolímeros Utilizando Cinzas Residuais Do Bagaço De Cana-De-Açúcar**. [s.l.] Universidade Federal Paulista Julio de Mesquita Filho, 2013.

CASTRO, A. L. DE. **APLICAÇÃO DE CONCEITOS REOLÓGICOS NA TECNOLOGIA DOS CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2007.

CAVALCANTI, B. T. DE V. **Comportamento reológico de materiais cimentícios para poços de petróleo contendo naftaleno condensado ou policarboxilato** Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ciências Exatas e da Terra.. 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 6, n. 4, 2020.

CORDEIRO, G. C.; ANDREÃO, P. V.; TAVARES, L. M. Pozzolanic properties of ultrafine sugar cane bagasse ash produced by controlled burning. **Heliyon**, v. 5, n. 10, p. 0–5, 2019.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. D. M. R. Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 82–86, 2009.

CRIADO, M.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; BANFILL, P.F.G. Alkali activated fly ash: effect of admixtures on paste rheology. **Rheological Acta**, v. 48, i. 4, p. 447-455, 2009.

CRUZ, M. A. **Caracterização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar calcinado sob diferentes temperaturas para aplicação em geopolímeros**. 2021. Dissertação (Mestrado)- Faculdade Meridional- IMED, Passo Fundo, 2021 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

CRUZ, M. A. et al. Análise da viabilidade do uso de resíduos de cana-de-açúcar para produção de aglomerantes sustentáveis. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 26, n. 4, 2021.

DAVIDOVITS, J. Geopolymers - Inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991a.

DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs . **Geopolymer 2002 Conference, October 28-29, 2002, Melbourne, Australia**, p. 1–16, 2002.

DE CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFEG, V. C. Review article: Rheology of high performance concretes applied in building site. **Ceramica**, v. 57, n. 341, p. 63–75, 2011.

DEVENTER, J. L. P. A. J. S. J. VAN (ED.). **Geopolymers : Structure, processing properties and industrial applications**. New Yourk: Woodhead Publishing Limited, 2009.

DOUBA, A. E.; MA, S.; KAWASHIMA, S. Rheology of fresh cement pastes modified with nanoclay-coated cements. **Cement and Concrete Composites**, v. 125, p. 104301, 1 jan. 2022

DUXSON, P. et al. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 19 maio 2007.

FAVIER, A. et al. RHEOLOGY OF GEOPOLYMER : **COMPARATIVE STUDY BETWEEN PORTLAND RHEOLOGY OF GEOPOLYMER : COMPARATIVE STUDY BETWEEN**. n. January 2015, 2013.

FRANÇA, M. S. **Comportamento de mistura de sistemas cimentícios multifásicos reativos**. São Paulo 2013. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FENG, DINGWU; PROVIS, JOHN L. AND VAN DEVENTER, JANNIE S. J. **Thermal Activation of Albite for the Synthesis of One-Part Mix Geopolymers**. Journal Am. Ceram. Soc., vol.95 [2], 565–572, 2012.

FERNANDES FILHO, P. **UTILIZAÇÃO DA CINZA RESIDUAL DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA PRODUÇÃO DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS ALCALINAMENTE ATIVADOS**. [s.l.] Universidade Federal da Paraíba, 2012.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; PALOMO, Ángel. Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. **Revista Ingeniería de Construcción**, Madri, v. 24, n. 3, p. 213-232, dez. 2009. SciELO Agencia Nacional de Investigacion y Desarrollo (ANID). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50732009000300001>.

FILHO, J. S. et al. Estudo da reologia de pastas cimentícias contendo resíduo de tijolo cerâmico moído e metacaulim. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, 6 abr. 2020.

FIRDOUS, R.; STEPHAN, D.; DJOBO, J. N. Y. Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 190, p. 1251–1263, 2018.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluídos**. Tradução de

Alexandre Matos de Souza Melo. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1998. 662p.

GUEDES, C. L. B., ADÃO, D. C., QUESSADA, T. P., BORSATO, D., GALÃO, O. F. Avaliação de biocombustível derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, v.33, n.4, p.781-786, 2010.

GÜLLÜ, H. et al. On the rheology of using geopolimer for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 196, p. 594–610, 30 jan. 2019.

Habert, G., J. B. D’Espinose De Lacaillerie, e N. Roussel. 2011. “**An environmental evaluation of geopolimer based concrete production: Reviewing current research trends**”. *Journal of Cleaner Production* 19(11):1229–38.

HALASTA, L.; ROVNANIK, P.; MIKHAILOVA, O. Effect of geopolimer composition on the mechanical and rheological properties. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 583, p. 012002, 14 ago. 2019.

JESUS, L. DE et al. **PROPRIEDADES REOLÓGICAS E FÍSICAS DE PASTAS DE CIMENTO MODIFICADAS COM PÓ DE BORRACHA DE PNEU**. [2019.].

JITTIN, V.; BAHURUDEEN, A. Evaluation of rheological and durability characteristics of sugarcane bagasse ash and rice husk ash based binary and ternary cementitious system. **Construction and Building Materials**, v. 317, p. 125965, 24 jan. 2022.

KOUTNÍK, P. et al. Low viscosity metakaolinite based geopolimer binders. **Construction and Building Materials**, v. 230, 2020.

LIMA, J. S. **EFEITO DA RELAÇÃO MOLAR  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  E DAS CONDIÇÕES DE CURA NAS PROPRIEDADES DE GEOPOLÍMEROS OBTIDOS COM SILICATO DE CINZA DA CASCA DE ARROZ**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

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>

MA, C.-K.; AWANG, A. Z.; OMAR, W. Structural and material performance of geopolimer concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 90–102, out. 2018.

MACKENZIE, K. J. D.; WELTER, M. **Geopolimer (aluminossilicate) composites: Synthesis, properties and applications**. [s.l.] Woodhead Publishing Limited, 2014.

MELO, K. A. **Contribuição à Dosagem de Concreto Auto-adensável com Adição**

**de Fíler Calcário.** Florianópolis/SC: Dissertação de mestrado -UFSC, 2005

MENDES, Everton Luiz da Silva. **Caracterização e composição de agregados reciclados para obtenção de concreto autoadensável leve reciclado com fins estruturais.** 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil Estruturas) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016

MORENO, R. **Reología de suspensiones cerâmicas.** Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, 2005.

OLIENICK FILHO, E. G. **Caracterização dinâmica de materiais viscoelásticos termoreologicamente simples em função dos efeitos da temperatura, frequência e pré-carga.** [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDONFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas – princípios e aplicações em processamento cerâmico.** Fazendo Arte Editorial, 2000. 195p.

OLIVEIRA, A. M. A. DE. **Determinação das propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas à base de metacaulim ativado por NaOH, KOH e NaOH + KOH.** [s.l: 2018.].

OLIVEIRA, C. **Análise das propriedades reológicas de materiais cimen//tícios associando o conceito de empacotamento de partículas.** Ilha Solteira: Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2013.

PALACIOS, M.; BANFILL, P. F. G ; PUERTAS, F. **Rheology and setting of alkali-activated slag pastes and mortars:effect of organic admixture.** ACI Materials Journal. March-April, 2008.

Pacheco-Torgal, F. **-Desenvolvimento de ligantes obtidos por activação alcalina de lamas residuais das Minas da Panasqueira.** Tese de Doutorado, Universidade da Beira Interior, Julho de 2007, 423pp

PANDA, B.; UNLUER, C.; TAN, M. J. Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 307–314, 1 nov. 2018.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. 1 - Introduction to geopolymers. In: PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. B. T.-G. (Eds.). **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.** [s.l.] Woodhead Publishing, 2009. p. 1–11.

PUERTAS, F.; VARGA, C.; ALONSO, M.M. **Rheology of alkaliactivated slag pastes. Effect of the nature and concentration of the activating solution.** Cement & Concrete Composites 53 (2014) 279– 288.

RAMOS, G. A. **Cimento geopolimérico contendo resíduo do polimento das placas cerâmicas.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

RIFAAI, Y. et al. Rheology of fly ash-based geopolymer : Effect of NaOH

concentration. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 583–594, 2019<sup>a</sup>.

ROMAGNOLI, M; LEONELLI, C; KAMSE, E; LASSINANTTI GUALTIERI, M.  
**Rheology of geopolymer by DOE approach**. *Construction and Building Materials*, n 36, 251–258, 2012.

ROMAGNOLI, M; SASSATELLI, P; LASSINANTTI GUALTIERI, M; TARI G.  
**Rheological characterization of fly ashbased suspensions**. *Construction and Building Materials*. n 65, 526–534, 2014.

ROMANO, Roberto Cesar de Oliveira; CARDOSO, Fábio Alonso; PILEGGI, Rafael Giuliano. **Propriedades do concreto no estado fresco**. In: *Concreto: ciência e tecnologia*[S.l: s.n.], 2011.

SANTOS, Eylisson André dos. **Influência da adição de diatomita em pastas geopoliméricas para poços de petróleo**. 2012. 125f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SANTOS, T. A. **Avaliação do potencial calorífico do bagaço de cana de açúcar e da atividade pozolânica das cinzas geradas**. 2017. 167 f. Dissertação (Mestrado – Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017

SAMPAIO, R. B. **COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE PASTAS GEOPOLIMÉRICAS COM USO DE ADITIVOS DISPERSANTES**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

SATO, V. Y.; EVANGELISTA, K. T. C.; TEIXEIRA, J. E. S. L.; TRISTÃO, F. A.  
**Estudo das propriedades reológicas de pastas de cimento de concretos bombeados**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 54., 2012, Maceió. Anais... Maceió: IBRACON, 2012

SENN, L.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Rheological behaviour of cement pastes with addition of silica fume, nanosilica and polycarboxylic dispersant. **Revista Materia**, v. 15, n. 1, p. 12–20, 2010.

SEVERO C. G. COSTA S., BEZERRA D. L., MENEZES I. M. T., NEVES. R. R., G. A. **Características, particularidades e princípios científicos dos materiais ativado alcalinamente**. *Revista Eletronica de Materiais e Processos*, 8.2: 55- 67, 2013.

SHI, C.; JIMÉNEZ, A. F.; PALOMO, A. New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.

SILVA, E. J. DA et al. Avaliação por análise de DRX da influência do beneficiamento de moagem na atividade pozolânica da cinza do bagaço de cana-de-açúcar. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 24, n. 4, p. e12497, 2019..

SIQUEIRA, Thaís Pinto Lobo et al (ed.). **Reologia de Materiais Cimentícios**. In: RIBEIRO, Daniel Verás et al (org.). *Princípios da ciências dos materiais cimentícios*:

produção, reações, aplicações e avanços tecnológicos. Curitiba: Appris, 2021. p. 269-302.

SOUSA, J. G. G.; BAUER, E. **Estudo da reologia das argamassas de revestimento no estado frescocongresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais**Natal, 2002.

TATTERSALL, G. H. Progress in measurement of workability by two-point test. In: **PROPERTIES OF FRESH CONCRETE**, 1990, Hanover/Germany. Proceedings... London: Chapman and Hall, 1990. p. 203-212.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 89–104, 1 mar. 2012.

VALLURUPALLI, K. et al. Effect of graphene oxide on rheology, hydration and strength development of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 265, p. 120311, 30 dez. 2020.

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

Xiao, Q., Long, G., Feng, R., Zeng, X., Dong, R., Xiang, Y., & Yang, K. (2022). Effect of alternating current field on rheology of fresh cement-based pastes. **Journal of Building Engineering**, 48, 103771. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103771>

ZHANG, D. W. et al. Rheology, agglomerate structure, and particle shape of fresh geopolymer pastes with different NaOH activators content. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 674–680, 2018.

ZHOU, S. et al. Upcycling of natural volcanic resources for geopolymer: Comparative study on synthesis, reaction mechanism and rheological behavior. **Construction and Building Materials**, v. 268, p. 121184, 25 jan. 2021.