



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**JOÃO PAULO CARVALHO DA SILVA**

**CONCRETO GEOPOLIMÉRICO:  
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**NATAL-RN**

**2025**

João Paulo Carvalho da Silva

## Concreto geopolimérico: Uma revisão bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fred Guedes Cunha

Natal-RN

2025



Esta obra está licenciada com uma licença *Creative Commons* Atribuição 4.0 Internacional. Permite que outros distribuam, remixem, adaptem e desenvolvam seu trabalho, mesmo comercialmente, desde que creditem a você pela criação original. Link dessa licença: [creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, João Paulo Carvalho da.

Concreto geopolimérico: uma Revisão Bibliográfica / João Paulo Carvalho da Silva. - 2025.

79f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Natal, 2025.

Orientador: Prof. Dr. Fred Guedes Cunha.

1. Engenharia Civil - TCC. 2. Sustentabilidade - TCC. 3. Ativação alcalina - TCC. 4. Resíduos - TCC. 5. Cimento Portland - TCC. 6. Geopolímeros. I. Cunha, Fred Guedes. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 666

João Paulo Carvalho da Silva

Concreto geopolimérico: Uma revisão bibliográfica

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Monografia, submetido ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fred Guedes Cunha

**Aprovado em 16 de maio de 2025:**

---

Prof. Dr. Fred Guedes Cunha – Orientador

---

Prof. Dr. Marcos Lacerda Almeida – Examinador interno

---

Eng. Me. Hazen Willian Bezerra Pereira – Examinador externo

Natal-RN

2025

## RESUMO

### **Concreto geopolimérico: Uma revisão bibliográfica**

Esta revisão bibliográfica apresenta um panorama do concreto geopolimérico, abordando suas propriedades, composição, mecanismos de reação e condicionantes de desempenho, bem como suas aplicações no setor da construção civil e comparação com o concreto de cimento Portland. A motivação primária para este estudo reside em servir de guia para pesquisas no âmbito nacional e na necessidade de mitigar os impactos ambientais associados à produção de cimento Portland, em particular as emissões de dióxido de carbono. Os geopolímeros constituem uma classe de materiais cimentícios obtidos através da ativação alcalina de precursores ricos em sílica e alumina. Estes precursores são geralmente derivados de resíduos industriais e agrícolas, incluindo metacaulim, cinzas volantes e escória de alto-forno, porém qualquer resíduo que contenha sílica e alumina pode ser utilizado. O trabalho explora os principais parâmetros que influenciam o comportamento dos geopolímeros, tais como a razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , o tipo e concentração do ativador alcalino, a temperatura e tempo de cura, a granulometria dos materiais precursores, a incorporação de cálcio, o uso de aditivos superplastificantes e as variações na formulação. Os estudos analisados indicam que o concreto geopolimérico, quando adequadamente formulado, pode exibir resistência mecânica, durabilidade, estabilidade térmica e resistência química superiores às do concreto convencional. Além disso, sua utilização promove uma redução significativa das emissões de gases e do consumo energético. Contudo, desafios de ordem técnica persistem, notadamente a padronização dos processos produtivos, o custo inicial relativamente elevado e a carência de normatização específica. Portanto, o concreto geopolimérico representa uma alternativa viável e promissora para o desenvolvimento de uma construção civil mais sustentável. O avanço de pesquisas experimentais e o estabelecimento de normas técnicas são fundamentais para sua consolidação em escala industrial.

Palavras-chave: Geopolímeros. Sustentabilidade. Ativação alcalina. Resíduos. Cimento Portland.

## ABSTRACT

### Geopolymer Concrete: A Literature Review

This literature review presents an overview of geopolymer concrete, addressing its properties, composition, reaction mechanisms, and performance parameters, as well as its applications in the construction sector and its comparison with Portland cement concrete. The primary motivation for this study lies in guiding research at the national level and in the need to mitigate the environmental impacts associated with Portland cement production, particularly carbon dioxide emissions. Geopolymers are a class of cementitious materials obtained through the alkaline activation of precursors rich in silica and alumina. These precursors are generally derived from industrial and agricultural wastes, including metakaolin, fly ash, and blast furnace slag; however, any residue containing silica and alumina can be used. The study explores the main parameters that influence the behavior of geopolymers, such as the  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  molar ratio, the type and concentration of alkaline activator, curing temperature and time, particle size distribution of the precursors, calcium incorporation, use of superplasticizer additives, and formulation variations. The reviewed studies indicate that, when properly formulated, geopolymer concrete can exhibit superior mechanical strength, durability, thermal stability, and chemical resistance compared to conventional concrete. Moreover, its use promotes a significant reduction in greenhouse gas emissions and energy consumption. However, technical challenges remain, particularly the standardization of production processes, the relatively high initial cost, and the lack of specific regulations. Therefore, geopolymer concrete represents a viable and promising alternative for the development of a more sustainable construction industry. Advancing experimental research and establishing technical standards are essential for its consolidation on an industrial scale.

Keywords: Geopolymer. Sustainability. Alkaline activation. Waste. Portland cement.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>7</b>
1.1 Considerações iniciais.....	7
1.2 Justificativa.....	9
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo Geral.....	10
1.3.2 Objetivos específicos.....	10
1.4 Estrutura do trabalho.....	10
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
2.1. Geopolímeros.....	12
2.2. Matérias-primas utilizadas na produção dos Geopolímeros.....	14
2.2.1. Precursores.....	15
2.2.1.1. Resíduos industriais.....	15
2.2.1.2. Resíduos agrícolas.....	18
2.2.2. Ativadores.....	19
2.2.2.1. Hidróxido de sódio ou potássio.....	20
2.2.2.2. Silicato de sódio.....	20
2.3. Produção e mecanismos de reação dos geopolímeros.....	20
2.4. Comparação do concreto geopolimérico com o concreto de cimento Portland.....	28
2.5. Aplicações dos geopolímeros.....	37
2.5.1. Infraestrutura e construção civil.....	38
2.5.2. Resistência ao fogo e altas temperaturas.....	40
2.5.3. Contenção de resíduos e durabilidade.....	40
2.5.4. Outras aplicações.....	41
2.6. Condicionantes e variáveis para a geopolimerização.....	42
2.6.1. Razão entre $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	42

2.6.2. Razão entre SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O.....	45
2.6.3. Concentração da solução ativadora.....	46
2.6.4. Temperatura e tempo de cura.....	49
2.6.5. Adições de cálcio .....	52
2.6.6. Variações no teor dos precursores e combinações entre eles .....	53
2.6.7. Adição de superplastificantes .....	58
2.6.8. Granulometria dos precursores .....	59
<b>3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>60</b>
<b>4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

A indústria da construção civil tem buscado incessantemente por materiais que ofereçam durabilidade, segurança e, cada vez mais, sustentabilidade. Nesse contexto, o cimento Portland se destaca como um dos materiais aglomerantes mais utilizados globalmente. No entanto, sua produção é conhecida por ser um processo de alto consumo de energia e que gera impactos ambientais significativos, notadamente a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera. Segundo Davidovits (2013), a produção de uma tonelada de clínquer gera aproximadamente 0,95 toneladas de  $\text{CO}_2$ , enquanto que a produção global de cimento é responsável por cerca de 7% das emissões mundiais de gases de efeito estufa (ABCP, 2021). Não apenas o  $\text{CO}_2$  é liberado na fabricação do cimento, mas também trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), que podem causar o efeito estufa e a chuva ácida (Rashad e Zeedan, 2011).

O cimento é o material mais consumido no mundo, cerca de 150 toneladas por segundo, totalizando 14 bilhões de metros cúbicos de concreto utilizados a cada ano, segundo a Global Cement and Concrete Association (GCCA) (2021). A Construção Civil representa 13% do PIB mundial.

Além das emissões, o processo de clínquerização atinge temperaturas superiores a  $1500^\circ\text{C}$  e consome grande quantidade de combustíveis fósseis (Henrique *et al.*, 2014). Estima-se que, no Brasil, em 2023, o consumo de cimento tenha sido de mais de 62 milhões de toneladas (SNIC, 2023), revelando a escala e o impacto ambiental do setor. A Tabela 1 apresenta o consumo anual de cimento portland e a sua variação anual, evidenciando a necessidade de estudo de materiais menos poluentes ao meio ambiente.

Tabela 1 – Consumo e variação anual de cimento portland no Brasil.

<b>ANO</b>	<b>CONSUMO (T)</b>	<b>VARIAÇÃO</b>
<b>2010</b>	60008000	-
<b>2011</b>	64972000	7,64%
<b>2012</b>	69324000	6,28%
<b>2013</b>	70967000	2,32%
<b>2014</b>	72690000	2,37%
<b>2015</b>	66186000	-9,83%
<b>2016</b>	57968000	-14,18%
<b>2017</b>	53703000	-7,94%
<b>2018</b>	52940000	-1,44%
<b>2019</b>	54794000	3,38%
<b>2020</b>	60598000	9,58%
<b>2021</b>	64524000	6,08%
<b>2022</b>	62768000	-2,80%
<b>2023</b>	62210000	-0,90%

Fonte: SNIC (2023)

Diante desse cenário, pesquisadores e cientistas têm se dedicado, ao longo das últimas décadas, ao desenvolvimento de materiais que possam reduzir tais impactos. Um dos principais focos tem sido os geopolímeros, também conhecidos como polímeros inorgânicos ou materiais cimentícios sem clínquer. Esses materiais apresentam potencial para substituir o cimento portland, uma vez que oferecem resistência mecânica adequada e apresentam emissões significativamente menores durante sua produção. Estudos apontam que a produção de uma tonelada de cimento geopolimérico gera cerca de 0,18 tonelada de CO<sub>2</sub>, quase seis vezes menos que o cimento Portland (Davidovits, 2002).

O termo “geopolímero” foi patenteado por Joseph Davidovits na década de 1970, após suas pesquisas com estruturas antigas, como as pirâmides egípcias, revelarem a presença de materiais inorgânicos altamente resistentes (Davidovits, 2002). Esses ligantes alcalinos, também chamados de polissialatos, são formados a partir da ativação alcalina de materiais ricos em alumínio e silício, como cinzas volantes, escória de alto-forno e metacaulim, muitos deles provenientes de resíduos industriais.

Essa característica confere aos geopolímeros um importante apelo ambiental, pois permite o reaproveitamento de resíduos sólidos, que de outra forma seriam descartados de maneira inadequada. Conforme destacado por Bharath (2014) e Rossetto (2017), os geopolímeros podem ser produzidos a partir de qualquer resíduo com teores adequados de silício (Si) e alumínio (Al), desde que estejam em formas amorfas ou semicristalinas. Isso favorece a economia circular, reduzindo o uso de matérias-primas virgens e contribuindo para

a gestão eficiente de resíduos.

O desempenho técnico também se destaca: geopolímeros apresentam alta resistência inicial, durabilidade em ambientes agressivos, inércia química a patologias comuns ao cimento portland, resistência a altas temperaturas e baixa permeabilidade (Davidovits, 1994; Kong e Sanjayan, 2010; Bakharev, 2005). Essas propriedades os tornam atrativos para aplicações em diversas áreas da construção civil, incluindo obras expostas a ambientes agressivos ou que demandem maior durabilidade a longo prazo.

No entanto, para a utilização de materiais geopoliméricos na indústria da construção civil, é de fundamental importância a caracterização do comportamento estrutural de elementos de concreto armado que utilizem esses materiais como ligante. Contudo, poucos estudos envolvendo a aplicação de cimentos geopoliméricos em elementos estruturais foram reportados.

O desenvolvimento e uso dos geopolímeros vêm ganhando destaque especialmente no contexto da sustentabilidade. Em alguns países da Europa, legislações ambientais têm incentivado a adoção de práticas mais sustentáveis, como a proibição do envio de resíduos de construção e demolição a aterros sanitários e a criação de impostos para extração de recursos naturais (Nogueira, 2015 *apud* Jardel, 2019). No Brasil, estudos também indicam o uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs), como metacaulim e cinzas volantes, como alternativa para reduzir o teor de clínquer e, conseqüentemente, as emissões de CO<sub>2</sub> (Damineli *et al.*, 2010; Juenger e Siddique, 2015).

Portanto, o concreto geopolimérico emerge como uma alternativa inovadora e viável do ponto de vista técnico e ambiental, promovendo uma redução expressiva nas emissões de carbono, reaproveitamento de resíduos e maior desempenho em determinadas aplicações estruturais.

## **1.2 Justificativa**

A justificativa para esse estudo reside na crescente necessidade de buscar práticas e materiais mais sustentáveis na construção civil, impulsionada pela preocupação global com a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e o uso otimizado dos recursos naturais. A contextualização do tema envolve a demanda por materiais de construção ecologicamente corretos e a importância

de aprofundar o conhecimento sobre as características do concreto geopolimérico, visando sua aplicação eficaz em diversas obras.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desse trabalho é realizar uma revisão bibliográfica vasta sobre o concreto geopolimérico, investigando todo o histórico de pesquisas sobre esse material.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, tem-se:

- Evidenciar as vantagens e limitações do uso do concreto geopolimérico frente ao concreto tradicional, com ênfase na sustentabilidade;
- Investigar as aplicações atuais do concreto geopolimérico na engenharia civil e sua viabilidade técnica;
- Apresentar estudos que investigam o comportamento do concreto geopolimérico a partir da variação de seus componentes, como ativadores alcalinos, fontes de aluminossilicato, adições minerais e aditivos;
- Nortear futuras pesquisas a partir de uma análise nesse trabalho de outras pesquisas bibliográficas e experimentais.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho foi organizado em sete capítulos. O capítulo 1 compreende à introdução, apresentando considerações iniciais, justificativa, objetivo geral, objetivos

específicos e sua estrutura.

O capítulo 2 aborda uma vasta revisão bibliográfica sobre os geopolímeros, apresentando a origem e histórico do material, as matérias-primas mais utilizadas, sua produção, comparação do concreto de cimento geopolimérico com o de cimento Portland, bem como as aplicações para esse material e as condicionantes para o processo de geopolimerização, analisando resultados de diversas pesquisas.

O capítulo 3 apresenta as considerações finais sobre a revisão bibliográfica apresentada. Assim, serão comentados sobre os trabalhos destacados nessa produção, apresentando a opinião de cada autor e a divergência entre eles, quando houver.

O capítulo 4 apresenta a conclusão do trabalho apresentado e sugestões de temas para trabalhos posteriores.

Por fim, são apresentadas as referências que possibilitaram a realização desse trabalho.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, será apresentada a origem e evolução dos geopolímeros, as matérias-primas utilizadas na produção dos mesmos, seus aspectos químicos e especificidades, além de uma comparação do concreto de cimento geopolimérico com o concreto de cimento Portland. Ainda nesse capítulo, serão exploradas as aplicações dos geopolímeros na construção civil, bem como uma análise de diversas pesquisas que exploram pequenas modificações na composição do material foco desse trabalho, visando nortear futuras pesquisas na área.

### 2.1. Geopolímeros

A busca por materiais de construção duráveis e seguros tem impulsionado a experimentação com diversos aglomerantes, sendo o cimento Portland o mais utilizado globalmente. No entanto, a produção de cimento Portland é um processo que demanda alto consumo de energia e gera impactos ambientais significativos, notadamente a emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Diante desse cenário, a comunidade científica tem buscado há décadas alternativas mais sustentáveis, surgindo, assim, os geopolímeros como uma opção promissora.

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

O conceito de geopolímeros começou a se desenvolver com a observação de que materiais aluminossilicatos ativados alcalinamente poderiam formar ligantes alternativos ao cimento Portland. Na década de 1940, Purdon notou que escórias reagem com substâncias alcalinas, resultando em uma liga de endurecimento rápido (Davidovits, 2008). Esse fenômeno foi denominado "cimento-solo" ou "solo-cimento" por Glukhovsky (1989) após estudos realizados em amostras de construções antigas. O mesmo autor enfatizou que a partir de

transformações geológicas de determinadas rochas vulcânicas em zeólitas, ocorre a formação de rochas sedimentares em baixa pressão e temperatura (Komnitsas e Zaharaki, 2017 *apud* Boca Santa, 2012). Os primeiros “solos-cimentos” obtidos por Glukhovsky eram sintetizados utilizando resíduos industriais com quantidades atrativas de álcalis e aluminossilicatos moídos (Torgal *et al.*, 2008 *apud* Moura, 2014) e "Geocimentos" por Krivenko (1997), em referência à semelhança desses ligantes aos polímeros orgânicos encontrados na crosta terrestre.

Na década de 1970, Joseph Davidovits popularizou o termo "geopolímero" para descrever essa classe de ligantes alcalinos. Davidovits, incentivado pela necessidade de formular materiais resistentes ao fogo, pois havia uma onda de incêndios na França, iniciou suas pesquisas sobre materiais inorgânicos (Davidovits, 2002), investigou cimentos antigos e identificou a presença de aluminossilicatos amorfos em suas microestruturas. Entre as amostras estudadas, haviam fragmentos de algumas pirâmides do Egito e algumas amostras de Jericó que foram datadas de 7000 a.C. (Boca Santa, 2012). Em suas investigações, atestou que as pirâmides do Egito não são de pedra calcária natural, mas sim de aglomerante feito com o calcário de Gizé com hidróxido de sódio, produzido a partir da mistura de cal, carbonato de sódio e água (Vassalo, 2013). Após conduzir análises químicas e mineralógicas, ele observou que as microestruturas desses materiais apresentavam a presença de um material amorfo constituído por aluminossilicatos (Boca Santa, 2012). Em vista disso, ele propôs que os geopolímeros fossem considerados um novo tipo de material, pasta e cimento, destacando a essencialidade da ativação alcalina no processo (Davidovits, 2005). Davidovits (2002) também apontou que a produção de uma tonelada de cimento geopolimérico gera significativamente menos CO<sub>2</sub> do que a produção da mesma quantidade de cimento Portland, sendo mais uma justificativa para o aprofundamento das pesquisas quanto a esse material.

Em relação à nomenclatura, é conhecido por vários nomes. Dentre eles, cerâmicas alcalinas, hidrocerâmicas, cimentos ativados alcalinamente, polímeros inorgânicos, entre outros (Boca Santa, 2012). Para Duxson *et al.* (2007) *apud* Maccarini (2015), o termo que melhor se aplica para os geopolímeros é “polímeros inorgânicos”. Já para Mehta e Monteiro (2008), os geopolímeros podem ser chamados de adições minerais, em virtude dos benefícios associados às propriedades cimentícias.

## 2.2. Matérias-primas utilizadas na produção dos Geopolímeros

O processo de produção do concreto geopolimérico envolve a ativação alcalina de materiais ricos em sílica (Si) e alumina (Al), geralmente obtidos de resíduos industriais como cinzas volantes, escória de alto-forno ou metacaulim. Esses materiais são misturados com uma solução ativadora alcalina, geralmente composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio, formando uma pasta que passa por uma reação de geopolimerização. Essa reação dá origem a uma matriz polimérica tridimensional, responsável pela resistência e durabilidade do material. A cura do concreto pode ocorrer em temperatura ambiente ou elevada, dependendo da composição adotada. A escolha adequada das matérias-primas é essencial para garantir a eficiência do processo e o desempenho do produto final. A produção do concreto geopolimérico representa uma alternativa viável e sustentável frente aos métodos convencionais à base de cimento Portland. Além disso, promove o aproveitamento de resíduos e reduz significativamente a emissão de CO<sub>2</sub>.

O principal insumo para a produção do geopolímero é o caulim, rocha muito encontrada na região Norte do país, formada por um grupo de silicatos hidratados de alumínio, principalmente caulinita e haloisita. Além disso, pode ser produzido a partir de outros materiais, como resíduos. Tais resíduos podem ser do processamento de minérios, os rejeitos; resíduos das termoelétricas, as cinzas volantes (fly-ash); resíduos da agroindústria, como cinzas do bagaço da cana, da casca do arroz; e rejeitos urbanos, como o lodo de estações de tratamento (Jesus, 2018).

A elaboração do concreto geopolimérico fundamenta-se na reação de materiais precursores, fontes de aluminossilicatos, com soluções ativadoras alcalinas. Os precursores podem ser materiais naturais ou subprodutos industriais que contenham sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e/ou cálcio (CaO) reativos. Essencialmente, qualquer material inorgânico com alumínio e silício, que tenha passado por tratamento térmico, possui potencial como fonte de aluminossilicatos para a geopolimerização (Melo, 2016). A seleção da matéria-prima é crucial e depende de fatores como o teor de sílica reativa (amorfa), a quantidade de fase vítrea e a distribuição granulométrica das partículas (Fernández-Jimenez *et al.*, 2004).

Os ativadores alcalinos mais comuns incluem compostos de pH elevado, como hidróxidos de metais alcalinos (por exemplo, hidróxido de sódio - NaOH), silicatos (como

silicato de sódio -  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), aluminatos, carbonatos e sulfatos. A reação pode seguir dois modelos principais: um para materiais ricos em Si e Ca (como as escórias de alto forno), ativados com soluções de baixa alcalinidade, resultando principalmente em silicato de cálcio hidratado (C-S-H); e outro para materiais ricos em Si e Al (como o metacaulim e as cinzas volantes), ativados com soluções de média a alta alcalinidade, formando principalmente minerais de aluminossilicatos hidratados, como zeólitas.

O uso de materiais cimentícios suplementares, como os utilizados em geopolímeros, pode conferir propriedades pozolânicas, cimentantes ou de filler (Dal Molin, 2005; Mehta e Monteiro, 2008). Materiais pozolânicos reagem com hidróxido de cálcio para formar compostos cimentantes, enquanto materiais cimentantes, como a escória, não necessitam dessa presença para formar produtos como o C-S-H (Dal Molin, 2005). A classificação desses materiais pode seguir normas como a NBR 12653 (ABNT, 2012), que categoriza pozolanas em classes N (naturais ou artificiais calcinadas, como o metacaulim), C (cinzas volantes de carvão mineral) e E (outras). Outra abordagem classifica os materiais em diagramas ternários baseados nos teores de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , relacionando a composição com o tipo de reação e produtos formados (Lothenbach *et al.*, 2011; Scrivener *et al.*, 2011).

A seguir, detalham-se os principais precursores utilizados, classificados por sua origem:

### 2.2.1. Precursores

#### 2.2.1.1. Resíduos industriais

A indústria gera diversos resíduos com potencial para uso em geopolímeros, sendo os mais investigados as cinzas volantes, escórias de alto forno e metacaulim. A adição de materiais ricos em cálcio, como algumas escórias, pode influenciar positivamente a estrutura, aumentando a resistência à compressão e diminuindo a porosidade, especialmente em curas a baixas temperaturas (Davidovits, 1999; Silva, 2006; Silva, 2011; Boca Santa, 2012). Além disso, a adição de cálcio pode diminuir o tempo de pega e facilitar a cura à temperatura ambiente, promovendo endurecimento e ganho de resistência em poucas horas (Davidovits, 2013). O uso de resíduos industriais como adições já é previsto em normas de cimento Portland, como CII-E (com escória) e CII-Z (com pozolana) (Hartmann, 2016).

- **Metacaulim**

O metacaulim provém da calcinação controlada do caulim (Vassalo, 2013). O caulim é uma argila cujo principal constituinte é a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  ou  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) (Bigno, 2008; Azimi *et al.*, 2016; Nita, 2006). O processo de calcinação ocorre tipicamente entre 500°C e 850°C (Melo, 2016; Brito, 2018). Nessa faixa, ocorre a desidroxilação (perda de grupos hidroxila), transformando a estrutura cristalina do caulim em metacaulim ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ), que é amorfo e reativo (Melo, 2016; Boca Santa, 2012; Brito, 2018). A temperatura ideal de calcinação pode variar (500°C a 800°C segundo Cascaes, 2016; 750°C a 800°C por 6 horas, segundo Davidovits, 1988). Temperaturas entre 550°C e 600°C ou acima de 900°C podem resultar em desidroxilação deficiente (Davidovits, 1999), enquanto que temperaturas mais elevadas (1000°C a 1050°C) levam à formação de fases cristalinas como mulita e cristobalita (Bigno, 2008), o que é indesejável para a síntese geopolimérica (Silva, 2000; Melo, 2016). A faixa de 700-800°C confere alta reatividade (Shvarzman *et al.*, 2023 apud Nita, 2006), com perda de massa de cerca de 13,76% (Nita, 2006).

Quimicamente, o caulim aproxima-se de 45,54%  $\text{SiO}_2$ , 39,50%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 13,96%  $\text{H}_2\text{O}$  (Monte *et al.*, 2003). O metacaulim resultante possui cerca de 52% de  $\text{SiO}_2$  e 40% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , com impurezas como quartzo, feldspato, mica, etc. (Nita, 2006). A transformação em metacaulim torna o material muito mais reativo, com propriedades pozolânicas (Davidovits, 1994). A finura e a área superficial podem variar, mas a dispersão das partículas na mistura parece ter pouco efeito no comportamento reológico e grau de reação (Li *et al.*, 2010).

É uma matéria-prima abundante e amplamente utilizada devido à sua alta taxa de dissolução em álcalis e facilidade de controle da razão Si/Al (Cesari, 2015). É frequentemente escolhido como fonte de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , ativado com silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) e hidróxido de sódio (NaOH). O processo de geopolimerização envolve dissolução, formação de oligômeros e polimerização em um gel amorfo (Provis *et al.*, 2005). Estudos (Rashad, 2013) indicam que aumentar a concentração do ativador geralmente melhora a resistência (até um limite); a temperatura ótima de cura (frequentemente 60°C), segundo Davidovits, 1999 e Hardjito *et al.*, 2004; depende de fatores como finura e tipo de ativador; maior finura leva a pega mais rápida e maior resistência; o sistema apresenta boa resistência a sulfatos e água do mar; e boa estabilidade térmica (até 1200-1400°C). Além disso, para o autor, a adição de 10% de NaOH pode melhorar trabalhabilidade e resistência.

- **Cinzas volantes**

Esse material provém de resíduos da combustão de carvão mineral em termelétricas. A produção anual foi estimada em 390 milhões de toneladas no período de 1998 a 2005, com baixa taxa de aproveitamento, cerca de 25%, gerando acúmulo e problemas ambientais (Hardjito *et al.*, 2004; Fernández-Jiménez *et al.*, 2005).

Além disso, são ricas em sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), com propriedades pozolânicas. Sua composição varia com a origem do carvão. Podem cristalizar parcialmente na queima, reduzindo a reatividade para geopolimerização comparado ao metacaulim (Brito, 2018), sendo frequentemente usadas em conjunto com ele. Geralmente possuem material amorfo e tamanho de partícula adequados para ativação. A substituição de 30% de metacaulim por cinza volante pode conferir maior resistência mecânica e imobilizar metais pesados (Rashad, 2013). A cinza pesada (bottom ash), de partículas maiores, também pode ser usada após moagem, tornando-se pozolânica e reativa, embora possa requerer maior concentração de ativador (Chindaprasirt *et al.*, 2009) e a moagem excessiva possa reduzir a trabalhabilidade (Sathonsaowaphak *et al.*, 2009).

- **Escória de alto forno**

A escória de alto forno é um resíduo da produção de ferro gusa, formado pela fusão de impurezas do minério com fundentes e cinzas do coque. É separada do ferro gusa líquido por densidade (Arcellor Mittal, 2019).

Os seus principais constituintes são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . O resfriamento rápido (granulação) produz um material majoritariamente vítreo (cerca de 95%), reativo e termodinamicamente instável, apto para ligantes hidráulicos (Fernández-Jiménez *et al.*, 2009; Moreira, 2006; Masuela, 2016). O resfriamento lento forma fases cristalinas, adequadas para agregado (Moreira, 2006). Ademais, contém silicatos e sílico-aluminatos de cálcio amorfos (Mehta e Monteiro, 2008).

Esse resíduo é considerado potencialmente reativo para ativação alcalina devido à fase vítrea. Glukhovskiy (1957) foi pioneiro na ativação de escórias. Sua reatividade a torna apta para ativação alcalina, sendo rentável e permitindo produção de polímeros em tempo curto e à temperatura ambiente (Davidovits, 2011). Somado a isso, melhora a resistência inicial e a durabilidade. Atualmente, as escórias de alto forno são utilizadas na produção de cimento

Portland, CII-E, promovendo benefícios de impermeabilidade e durabilidade (Mehta e Monteiro, 2008).

- **Escória de aciária**

É um coproduto da fabricação do aço em conversores ou fornos elétricos (Pedrosa, 2010; Barbosa, 2013). Assim, a cada tonelada de aço fabricada, estima-se a geração de 100 a 150 kg (ABM, 2008; Nascimento, 2003). Tais materiais contêm cálcio e sua composição e propriedades físicas variam com o processo e resfriamento (Rohde, 2002). O cálcio presente favorece a compactação da estrutura e o ganho de resistência (Rohde, 2002).

- **Sílica ativa**

A sílica ativa é um subproduto gerado na produção de silício metálico e ligas de ferro-silício em fornos elétricos a arco. Trata-se de um material extremamente fino, composto por partículas esféricas com diâmetro médio cerca de 100 vezes menor que o do cimento Portland e com alto teor de  $\text{SiO}_2$  na forma amorfa. Devido a essas características, atua como microfíler, preenchendo os vazios da matriz e contribuindo para a densificação da pasta (Brito, 2018). Além disso, auxilia na manutenção da razão Si/Al ideal e acelera o processo de geopolimerização, conforme observado por Wan *et al.* (2017).

#### 2.2.1.2. Resíduos agrícolas

A agroindústria também produz resíduos com potencial geopolimérico, aproveitando materiais que seriam descartados.

- **Cinza de casca de arroz**

A cinza da casca de arroz é um resíduo resultante da queima dessa biomassa, processo que gera cerca de 25% de cinzas (Rao *et al.*, 2011). A produção mundial é estimada em 38,5 milhões de toneladas por ano, sendo aproximadamente 649 mil toneladas geradas anualmente no Brasil (Rao *et al.*, 2011). Esse material é rico em sílica amorfa, com teor variando entre 90 e 95% de  $\text{SiO}_2$  (Han, 2012), sendo a sílica o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (Apolônio, 2017). Para se obter uma reatividade pozolânica ideal, a queima da casca deve ocorrer de forma controlada, em temperaturas entre 500 e 700 °C (Metha, 1992). Quando

incorporada ao concreto, essa cinza contribui para a redução da segregação e promove o aumento da resistência mecânica em idades iniciais, atuando também como catalisador nas reações (Cascaes, 2016).

- **Cinza do bagaço da cana-de-açúcar**

A cinza do bagaço de cana é gerada na queima do resíduo sólido resultante da extração do caldo, comumente utilizado na produção de energia em usinas de açúcar e álcool (Castaldelli, 2013). Sua composição é predominantemente formada por  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Farias, 2018), conferindo ao material uma atividade pozolânica que afeta diretamente as propriedades químicas e mecânicas de pastas, argamassas e concretos (Castaldelli, 2013). Essa atividade depende principalmente do tamanho das partículas e do teor de material amorfo presente, como os aluminossilicatos. Além disso, pode atuar como material de preenchimento de vazios, e a fração que não participa da reação pode funcionar como fíler inerte, contribuindo para a densificação da matriz (Farias, 2018).

### 2.2.2. Ativadores

A ativação alcalina é um componente fundamental na síntese de geopolímeros, sendo realizada por meio de soluções que promovem a dissolução dos materiais precursores de aluminossilicato e viabilizam a formação da rede polimérica. O processo ocorre em condições de alta alcalinidade, utilizando bases fortes como hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio (KOH) (Azimi, *et al.*, 2016). Além disso, Azimi *et al.* (2016) comentam que, frequentemente, essas bases são combinadas com silicatos solúveis, como silicato de sódio ou silicato de potássio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ), formando ativadores compostos, considerados mais eficientes que os ativadores simples (apenas hidróxido). A solução ativadora, preparada misturando o hidróxido e/ou silicato com água, é crucial para dissolver os átomos de Si e Al do precursor, formando os monômeros necessários para a geopolimerização. Por fim, reforçam a importância de que a solução seja suficientemente concentrada para favorecer a formação da estrutura geopolimérica amorfa em vez de fases cristalinas como as zeólitas.

### 2.2.2.1. Hidróxido de sódio ou potássio

Os hidróxidos alcalinos, como NaOH e KOH, são os principais responsáveis pela dissolução inicial dos óxidos presentes nos precursores aluminossilicatos. Eles criam o ambiente de alta alcalinidade necessário para quebrar as ligações químicas da matéria-prima (Davidovits, 2009). Para garantir uma dissolução eficaz, é necessária uma concentração elevada do ativador: muitos estudos, por exemplo, apontam que a concentração molar de NaOH deve situar-se na faixa de 5 a 16 mols (Boca Santa, 2012).

### 2.2.2.2. Silicato de sódio

O silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) é um dos silicatos solúveis mais utilizados. Disponível tanto em forma líquida quanto sólida, destaca-se por ser de fácil manipulação, atóxico e não inflamável, sendo uma alternativa considerada ecologicamente correta em diversas aplicações (Silva, 2011). No contexto de materiais cimentícios, como em geopolímeros, o silicato de sódio atua como um aditivo que pode acelerar o processo de cura (Silva, 2011). Além disso, ele contribui diretamente com íons silicato para a reação, participando ativamente na formação e no crescimento da rede geopolimérica tridimensional, o que confere resistência estrutural e estabilidade ao material final.

## 2.3. Produção e mecanismos de reação dos geopolímeros

A partir da leitura de diversos trabalhos científicos, pode-se depreender que os geopolímeros são sintetizados a partir da mistura de duas partes: materiais cimentícios suplementares, também chamados de precursores e os líquidos alcalinos. Embora haja uma variedade de materiais que podem ser utilizados como fonte de aluminossilicatos, os que apresentam resultados mais relevantes na literatura são o metacaulim e as cinzas volantes como materiais precursores. Para Bharath (2017), qualquer material ou resíduo que apresente uma quantidade considerável de silício e alumínio na forma amorfa à semi-cristalina pode ser utilizado para a produção dos geopolímeros. Assim, é possível utilizar para a sua produção

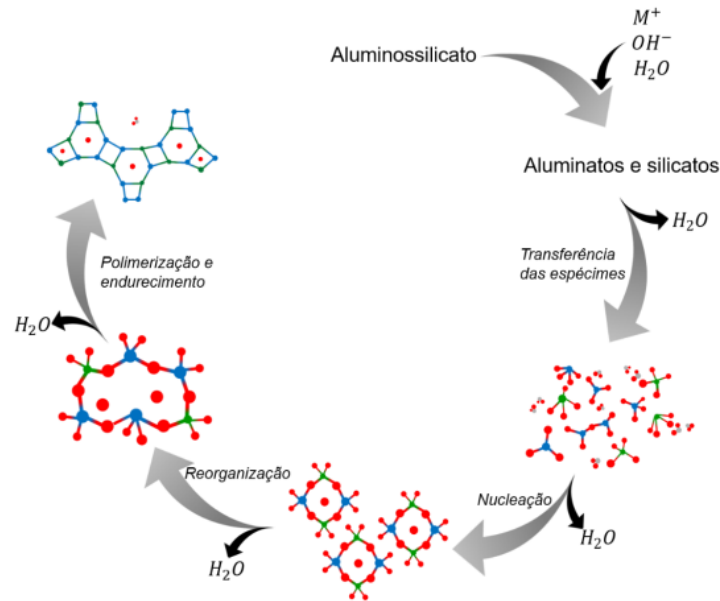
materiais que são rejeitos industriais e não têm um descarte adequado na natureza (Boca Santa, 2012).

Como solução ativadora, pode ser feita utilizando qualquer cátion de origem alcalina, como  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Ba}^{++}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Geralmente, é utilizada uma combinação de hidróxido de sódio e silicato de sódio (Almeida, 2023), além do hidróxido de potássio (Boca Santa, 2012; Goldoni, 2014). Borges (2014) defende a utilização do hidróxido de sódio pelo mesmo apresentar custo de produção inferior aos demais ativadores. A escolha dos materiais depende de fatores como a disponibilidade, o custo, o tipo de aplicação e demanda específica do produto final (Vassalo, 2013). Nesse sentido, Azimi *et al.* (2016) destacam a importância de manter a concentração adequada dos ativadores, visando garantir a dissolução eficiente dos átomos de silício e alumínio e a subsequente formação da malha tridimensional de aluminossilicatos.

Nesse sentido, Jesus (2018) define geopolímeros como polímero inorgânico sintetizado a partir de vários tipos de argilominerais que são fontes de sílica e alumina. Feng *et al.* (2012) definem geopolímeros como estruturas produzidas pela condensação de unidades tetraédricas de aluminossilicato, com íons de metais alcalinos que equilibram as cargas associadas às estruturas tetraédricas de alumínio.

Para Van Jaarsveld *et al.* (1997) e Pinto (2004), o mecanismo de reação do geopolímero ou geopolimerização, dá-se pelo fenômeno exotérmico, devido à policondensação. O mecanismo envolve a dissolução de Al e Si no meio alcalino, onde não só hidrolisa a superfície do material, como também dissolve a pequena quantidade de Al e Si, seguido por uma policondensação, através da reação de condensação, formando um gel que é transformado numa rede tridimensional de estrutura silico-aluminato (Vassalo, 2013). Jesus *et al.* (2019) resume todo o processo na esquematização apresentada na Figura 01.

Figura 01 – Modelo conceitual da geopolimerização



Fonte: Jesus *et al.* (2019)

De acordo com Wallah *et al.* (2006), durante a reação de geopolimerização, ocorre a liberação de água. Essa liberação, ao longo do processo de cura e secagem, é considerada benéfica ao desempenho do geopolímero, pois contribui para a eliminação de nanoporos descontínuos na matriz do material. O autor ainda destaca que, diferentemente do papel desempenhado pela água na hidratação do cimento Portland, no caso dos geopolímeros, a água não participa da reação química. Sua função está restrita a proporcionar a trabalhabilidade necessária à mistura no momento da aplicação. No entanto, os geopolímeros apresentam alta sensibilidade ao processo de cura, especialmente em relação à retração, que pode ocorrer devido à perda de água. Para minimizar esse risco, Granizo *et al.* (1997) e Pinto (2006) recomendam o envolvimento dos corpos de prova com filme plástico de polietileno, como forma de evitar a troca de umidade com o ambiente externo.

Dois principais sistemas ligantes ativados alcalinamente foram estabelecidos na literatura: o primeiro composto por sílica e escória de alto-forno (Si + Ca), e o segundo baseado em metacaulim e cinzas volantes (Si + Al) (Palomo *et al.*, 1999). Para Davidovits (2014), os termos ativação alcalina e geopolimerização devem ser diferenciados. Para o primeiro termo, o pesquisador o define como um processo de estabilização química na qual se obtém uma estrutura resistente à compressão, porém instável e sujeita a corrosões. Já para o segundo termo, ele considera o material resultante mais estável e que apresenta melhores resultados, passando pelas fases de ativação alcalina e inserção de um elemento precursor. Palomo *et al.* (1999)

definem ativação alcalina como um processo químico no qual materiais vítreos (amorfo, parcialmente amorfo ou metaestáveis), ricos em sílica e alumina, reagem com uma solução alcalina, resultando em um material cimentício com propriedades mecânicas e de durabilidade comparáveis ou superiores às do cimento Portland hidratado. Os materiais ativados alcalinamente com intenção de produzir materiais cimentícios, de certo modo, podem ser considerados como uma zeólita em que não foi alcançada a última etapa que é a cristalização (Brito, 2018).

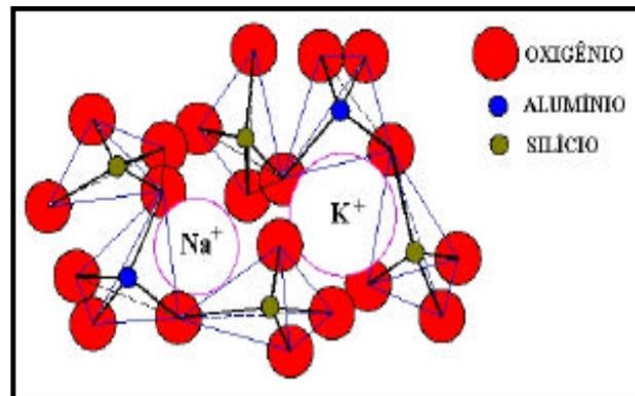
Para que ocorra a formação de zeólitas, é necessário que a reação química seja rápida na fase inicial, mas se torne extremamente lenta após o endurecimento do material, permitindo o desenvolvimento das estruturas cristalinas características (Fernández-Jiménez *et al.*, 2005). Para Maia *et al.* (2007), as zeólitas são definidas como aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos ou alcalinos terrosos de estrutura tridimensional em redes cristalinas compostos de tetraedros do tipo TO<sub>4</sub> (sendo T podendo ser Si, Al, B, Ge, Fe, P ou Co) unidos nos vértices por meio de átomos de oxigênio. A hidroxisodalita é um tipo de zeólita formada a partir da ativação do metacaulim com NaOH (Vassalo, 2013). Na natureza, elas se formam, por exemplo, a partir da interação de cinzas vulcânicas finamente particuladas e com alto grau de amorfismo em ambientes lacustres com pH alcalino, ricos em carbonato e bicarbonato de sódio. Além disso, outras fontes naturais, como sílica biogênica (originada dos esqueletos de radiolários e foraminíferas), determinados tipos de argilas, feldspatos e algumas variedades de quartzo, também podem dar origem à formação de zeólitas sob essas mesmas condições geoquímicas (Pinto, 2004).

Durante esse processo, ocorre inicialmente a lixiviação de íons Al<sup>3+</sup> e Si<sup>4+</sup>, promovida pela ação do meio alcalino, o que leva à quebra das ligações estruturais da matéria-prima (Pinto, 2004; Rattanaask *et al.*, 2009). Esses íons, quando em coordenações tetraédricas com quatro oxigênios, são chamados de “polissialatos” (Davidovits, 2002). A continuidade e eficiência da reação dependem da alta concentração do ativador alcalino, pois soluções diluídas favorecem a formação de zeólitas cristalinas em vez da estrutura amorfa característica dos geopolímeros (Azimi *et al.*, 2016). A solução alcalina é, portanto, um componente essencial na síntese do geopolímero.

Buchwald *et al.* (2005) comentam que quando se faz a mistura do aluminossilicato e a solução alcalina, é desencadeada uma reação, e, após uma variação de tempo, ela irá resultar em uma rede de aluminossilicato. Além disso, os autores destacam que a presença do alumínio

na rede gera um déficit de carga -5 no Al e -4 no Si, fazendo-se necessária a presença de um cátion de compensação para manter a neutralidade. Conforme a base utilizada para ativação, tem-se um íon disponível, por exemplo,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ , que irão equilibrar as cargas de  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  ficando presentes nas cavidades das estruturas. Pereira (2005) ilustra esquematicamente a estrutura de um geopolímero na Figura 02.

Figura 02 – Representação esquemática da estrutura de um geopolímero

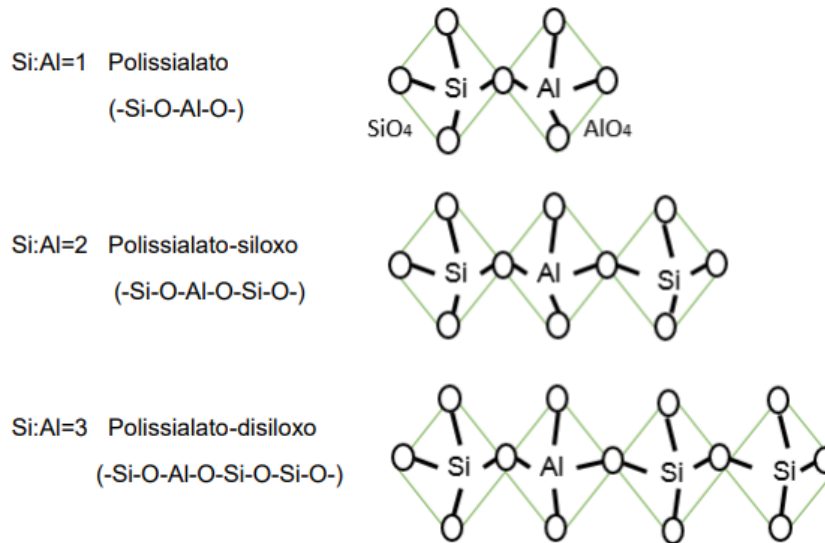


Fonte: Pereira (2005).

Davidovits (1994) apud Vassalo (2013) descreve os polissialatos como polímeros naturais formados por meio de uma reação denominada geossíntese, a qual consiste na produção de uma “rocha artificial” em temperaturas inferiores a 100 °C. Essa reação tem como objetivo conferir ao material características naturais como dureza, durabilidade e estabilidade térmica. A geossíntese ocorre por meio da ativação alcalina do alumínio, que é incorporado a uma matriz rica em sílica. Segundo Pinto (2007), trata-se de um processo amplamente encontrado na natureza.

A estrutura resultante é caracterizada por um arranjo tridimensional no qual átomos de silício (Si) e alumínio (Al) se alternam em coordenação tetraédrica, compartilhando átomos de oxigênio (Vassalo, 2013). A relação molar Si/Al influencia diretamente a formação desses arranjos estruturais. Os arranjos dos polissialatos são apresentados na Figura 03:

Figura 03 – Representação esquemática dos polissialatos



Fonte: Adaptado de Davidovits (2002)

A partir da ilustração, depreende-se a razão silício/alumínio (Si/Al) é a principal variável no processo de geopolimerização. Para Davidovits (1988), os polissialatos são obtidos por um processo semelhante àquele empregado na síntese de zeólitas cristalinas, processo consiste na polimerização hidrotérmica em ambiente altamente alcalino.

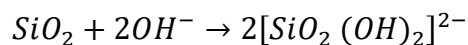
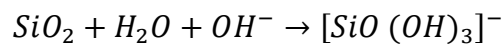
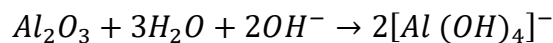
Para Torgal *et al.* (2005), os aglomerantes obtidos por ativação alcalina apresentam, em termos físicos, duas fases principais ao longo de seu processo de formação: inicialmente, ocorre a dissolução da sílica e da alumina da matéria-prima quando esta entra em contato com uma solução alcalina, caracterizando a fase de gelificação. Esse processo de dissolução rompe as ligações químicas originais dos componentes do precursor, dando origem a um gel reativo. A fase gel é altamente reativa e provavelmente produzida pela copolimerização de alumina e sílica individuais dissolvidas pelo hidróxido alcalino das fontes de sílica e alumina (Van Jaarsveld *et al.*, 1997). Em seguida, esse gel é convertido em uma malha tridimensional de silico-aluminato por meio de um processo de reorganização molecular e policondensação, denominado geopolimerização, cuja evolução ocorre de forma acelerada (Cesari, 2015). Na etapa final, desenvolve-se a fase de polimerização e endurecimento, na qual os produtos de reação se solidificam, formando uma estrutura polimérica estável e consolidada (Torgal *et al.*, 2005; Cesari, 2015). Para Pinto (2000), a fase de endurecimento se deve à policondensação do aluminato hidrolisado. Ademais, Vassalo (2013) disserta que esse processo ocorre à temperatura ambiente ou ligeiramente elevada.

No processo de geopolimerização, embora sejam utilizados materiais cimentícios

suplementares com características pozolânicas, a reação ocorre de forma distinta da tradicional reação pozolânica. Não há participação do hidróxido de cálcio, pois este não está presente no sistema. Em vez disso, o que ocorre é a interação entre aluminossilicatos e uma solução alcalina (Vassalo, 2013). Portanto, a geopolimerização não envolve reações pozolânicas convencionais nem adições desse tipo, o princípio está na ativação alcalina desses materiais para a formação do geopolímero (Pinto, 2004).

A respeito da cinza pesada, segundo Boca Santa (2012), embora ela contenha aluminossilicatos em sua composição, apenas a fração amorfa é reativa no processo de geopolimerização. A porção cristalina, por sua vez, é considerada quimicamente inerte durante a formação do polímero.

A etapa inicial da reação de ativação alcalina envolve a dissolução dos aluminossilicatos sólidos quando entram em contato com uma solução alcalina. Considerando os princípios de balanço de massa e carga, Rahier *et al.* (2007) demonstraram que esse processo de dissolução, seguido da hidrólise dos aluminossilicatos em meio alcalino, pode ser representado pelas reações descritas a seguir.



As reações químicas envolvidas demonstram que tanto as moléculas de água quanto os íons hidroxila ( $OH^-$ ) são consumidos ao longo do processo contínuo de dissolução (Severo, 2013). Conforme indicado nas reações, a concentração de íons  $OH^-$  exerce influência significativa sobre a taxa de dissolução dos óxidos de silício ( $SiO_2$ ) e alumínio ( $Al_2O_3$ ). No entanto, além da alcalinidade, a temperatura e a própria reatividade da matéria-prima também desempenham um papel fundamental, conforme apontado por Sagoe-Crentsil (2007) e Van Jaarsveld *et al.* (1999). Sob mesmo viés, Fernandez-Jimenez *et al.* (2004) destaca a importância na escolha da matéria-prima para a produção de geopolímeros, havendo fatores considerados essenciais para o processo de polimerização, entre eles: teor de sílica reativa (amorfa), teor de fase vítrea e distribuição de tamanho de partículas. Ademais, para Vassalo (2013) e Rashad (2013), a eficiência da ativação alcalina depende da composição química e mineralógica da matéria-prima, assim como a proporção das razões molares dos componentes e das condições de cura, influenciando nas propriedades e aplicações dos geopolímeros.

Tais fatores, além de outros, serão discutidos de forma mais detalhada ainda nesse trabalho, porém, exemplificando, foi relatado por alguns autores (Granizo *et al.*, 1997; Granizo *et al.*, 2002; Rashad, 2013) que o produto da ativação do metacaulim com soluções de NaOH é um gel N-A-S-H com boas propriedades mecânicas. Para Rashad (2013), esse gel é formado quando se utiliza hidróxido de sódio com concentração de 5 mol/L ou inferior na ativação do metacaulim na presença de hidróxido de cálcio.

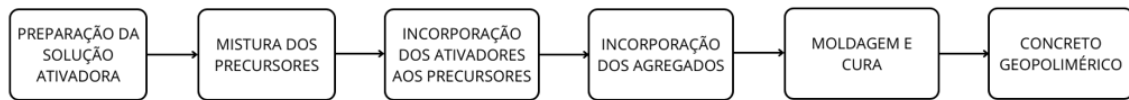
Em relação ao processo de fabricação do concreto geopolimérico, além das etapas já citadas da geopolimerização, envolve a mistura do geopolímero aos agregados. Essa mistura é então moldada e curada em condições específicas para garantir a formação das ligações geopoliméricas (Henrique *et al.*, 2014).

Em síntese, o processo de produção do concreto geopolimérico pode ser descrito nas seguintes etapas:

- **Preparação da solução ativadora:** Dissolve-se o hidróxido de sódio em água, formando uma solução alcalina. Em seguida, adiciona-se o silicato de sódio, formando a solução ativadora completa;
- **Mistura dos precursores:** Os materiais precursores são secos e misturados homogeneamente;
- **Adição da solução ativadora aos precursores:** A solução ativadora é gradualmente incorporada à mistura de precursores, promovendo a reação de geopolimerização. Essa reação resulta na formação de uma pasta homogênea e viscosa;
- **Incorporação dos agregados:** Após a formação da pasta geopolimérica, adicionam-se os agregados (areia, brita) à mistura. A proporção e o tipo de agregado influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do concreto;
- **Moldagem e cura:** A mistura é vertida em formas específicas para adquirir o formato desejado. Para Boca Santa (2012), normalmente o tempo de pega é de cerca de 90 minutos e em quatro horas o material sofre endurecimento. A cura pode ser realizada à temperatura ambiente ou em condições elevadas de temperatura, dependendo dos materiais utilizados e das propriedades almejadas. A cura térmica acelera o processo de geopolimerização, resultando em ganhos mais rápidos de resistência.

Esse processo pode ser facilmente visualizado no fluxograma (Figura 04):

Figura 04 – Etapas de produção do concreto geopolimérico



Fonte: Autor (2025)

Além disso, a Figura 05 apresenta um exemplo de corpos de prova de concreto geopolimérico executados no trabalho de Vassalo (2013):

Figura 05 – Corpos de prova de concreto geopolimérico



Fonte: Adaptado de Vassalo (2013)

## 2.4. Comparação do concreto geopolimérico com o concreto de cimento Portland

Nas últimas décadas, diversos autores realizaram pesquisas em geopolímeros com o objetivo de encontrar um material que apresente propriedades semelhantes ou superiores ao cimento Portland. Assim, neste tópico, serão analisadas as semelhanças e diferenças entre os materiais.

Borges *et al.* (2014), Lima (2011) e Andofalto (2002) comentam que o processo de produção do cimento tem como base a clínquerização, método que consiste na queima das matérias primas calcário e argila sob ação de altas temperaturas, tendo como resultado a obtenção do silicato tricálcico, mais conhecido como clínquer.

O processo de produção do cimento Portland é apresentado de forma simplificada na Figura 06:

Figura 06 – Processo de produção do cimento Portland



Fonte: Cimento Mauá (2021)

Vale ressaltar que o cimento Portland é um tipo de aglomerante cuja principal base são as reações de hidratação entre óxidos de cálcio, silício e alumínio, resultando na formação de fases cristalinas específicas, além de uma matriz amorfa composta por silicato de cálcio hidratado. Sua estrutura química é fundamentalmente distinta daquela observada nos geopolímeros, que se caracterizam pela formação de um gel de aluminossilicato (Davidovits, 1991).

A geopolimerização, por sua vez, ocorre de maneira acelerada. Após a mistura do precursor sólido, rico em aluminossilicatos, com a solução ativadora alcalina, inicia-se rapidamente a etapa de dissolução das partículas, seguida pela reorganização estrutural e formação do gel. O tempo de pega gira em torno de 90 minutos, e o endurecimento da matriz acontece em aproximadamente 4 horas, embora esse intervalo possa variar conforme a natureza da matéria-prima e as condições de cura. Durante esse processo, não há formação significativa de estruturas cristalinas.

A diferença mais pontual entre a produção de ambos, para Oliveira *et al.* (2021), refere-se ao preparo do cimento geopolimérico que, em comparação ao cimento Portland, requer mais materiais no momento da mistura e, portanto, necessita de cuidados adicionais para sua

dosagem e cura. O autor diz ainda que, em relação à fabricação, a moldagem e o adensamento empregam os mesmos métodos tanto para o concreto de cimento geopolimérico quanto para o de cimento Portland. Além disso, diferentemente do concreto de cimento Portland, o geopolímero geralmente apresenta uma coloração alaranjada e um aspecto mais denso (Lima, 2021).

Uma característica importante do concreto geopolimérico ainda fresco é sua trabalhabilidade, que envolve aspectos como plasticidade, consistência e facilidade de manuseio da argamassa. Essa propriedade pode ser ajustada modificando-se a proporção de água na mistura ou a relação líquido/sólido, conforme explicado por Simões *et al.* (2012). Pinto (2006) observou que, em sua fase fresca, os geopolímeros geralmente apresentam boa coesão, excelente trabalhabilidade e acabamento superficial adequado, o que contribui para um rápido aumento da resistência e da dureza do material. No entanto, Vassalo (2013) alertou que pequenas variações na relação sílica/alumina podem comprometer essas propriedades, tornando essencial um estudo aprofundado sobre a reatividade das matérias-primas utilizadas.

Para Davidovits (2013), Khale e Chaudhary (2007), o cimento Portland ocorre com a simples hidratação do silicato de cálcio em silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e cal  $\text{Ca(OH)}_2$  para a formação da matriz e ganho de resistência e o processo de endurecimento do cimento geopolimérico ocorre pela policondensação dos precursores de sílica e alumina e um teor de álcali para atingirem resistência estrutural, formando aluminossilicato hidratado.

Já quanto à cura, segundo Liew *et al.* (2016), o geopolímero deve permanecer em temperatura ambiente ou ligeiramente mais alta. Os mesmos autores citam, também, que os geopolímeros de metacaulim curam e endurecem 3 em 24 horas, sendo que, logo depois de moldado, quanto maior for a temperatura de exposição, mais rápido o geopolímero é endurecido.

Segundo Li *et al.* (2010), esse novo tipo de aglomerante pode ser considerado um “cimento de terceira geração”, surgindo como uma alternativa promissora ao cimento Portland devido ao seu bom desempenho mecânico e às vantagens ambientais que apresenta. Os autores relatam isso a partir de ensaios utilizando cimento geopolimérico ativado com escória de alto forno (Si + Ca) e metacaulim (Si + Al).

Assim, em relação às propriedades mecânicas, para Zhang *et al.* (2018), o concreto de cimento geopolimérico, quando utilizados precursores como metacaulim, combinado ou não

com cinzas volantes, possui propriedades semelhantes ao concreto de cimento Portland. A temperatura e o tempo de cura são condicionantes para um bom comportamento (Palomo *et al.*, 1999). Vassalo (2013) comprovou esse comportamento através de estudos realizados com cinzas volantes, onde o aumento da temperatura e do tempo de exposição da mesma melhoram a resistência à compressão simples. Porém, cabe ressaltar que em resultados obtidos na literatura, não se verificam ganhos significativos para temperaturas além de 60°C e nem após 48 horas de exposição (Davidovits, 1999; Hardjito *et al.*, 2004), com a ressalva de Vassalo (2013) para fatores como finura do metacaulim, tipo de ativador e dosagem, além da superfície específica do pó de metacaulim, fatores os quais podem contradizer os autores citados inicialmente. Já em relação ao concreto de cimento Portland, a pega ocorre naturalmente à temperatura ambiente e a cura em ambiente úmido, sendo, por esse aspecto, mais simples que o concreto geopolimérico para alcançar seu melhor comportamento mecânico.

Exemplificando essas propriedades mecânicas, Pelisser (2022), em seu trabalho, comparou o comportamento mecânico do concreto geopolimérico composto com metacaulim, silicato e hidróxido de sódio aplicado em um elemento estrutural com o concreto de cimento Portland. Desse modo, a resistência à compressão da viga do primeiro material se mostrou 8% superior a da viga do segundo, ambas rompidas aos 28 dias. Além disso, a taxa de ganho de resistência foi maior no concreto de cimento Portland até os 7 dias. Entretanto, vale salientar que a cura foi realizada ao ar e não térmica, como é frequentemente utilizada em geopolímeros, significando um resultado satisfatório. Os resultados de Lima (2021) utilizaram as mesmas matérias-primas (de fontes diferentes) e apresentaram um resultado ainda mais significativo para o concreto de cimento geopolimérico em relação ao de cimento Portland, obtendo a resistência à compressão de 50,47 MPa para o primeiro tipo de concreto e 31,10 MPa para o segundo, sujeitos às mesmas condições e rompidos aos 28 dias, apresentando ainda resistência elevada nas idades iniciais.

Ainda segundo Pelisser (2022), o mesmo experimentou a adição de microfibras de aço no mesmo concreto geopolimérico comentado anteriormente, resultando em um aumento expressivo da resistência à compressão, da resistência à tração na flexão e da relação entre essas duas propriedades, apresentando desempenho superior em comparação ao concreto convencional. Esse ganho de desempenho pode estar relacionado à melhor aderência entre as microfibras e a matriz cimentícia, o que intensifica a atuação das fibras no compósito.

Além disso, Un *et al.* (2015) realizaram comparações entre os dois tipos de concreto em

relação às propriedades mecânicas. Em seu trabalho, utilizaram escória de alto forno e cinzas volantes como precursores e silicato de sódio e hidróxido de sódio como ativadores alcalinos. Assim, afirmaram que as vigas de concreto de cimento geopolimérico testadas são viáveis para uso como elementos estruturais, contudo, foi detectada fissuração na fase de cura, sugerindo análises adicionais a serem realizadas.

Pelisser *et al.* (2018) realizaram a comparação dos tipos de concreto utilizando uma argamassa polimérica a base de metacaulim. Quanto ao valor médio do módulo de elasticidade do concreto geopolimérico, relatou-se o valor de 26 GPa, valor semelhante ao encontrado utilizando a mesma argamassa no trabalho de Ueng *et al.* (2012). Esse valor é cerca de 45% inferior ao estimado para o concreto de cimento Portland, 48 GPa. Nematollahi *et al.* (2014) dizem que essa perda de rigidez ou aumento na deformação é característica de concretos geopoliméricos, estando relacionada à razão Si/Al. No trabalho de Pelisser *et al.* (2018), a razão Si/Al foi de 3,2. Além disso, os autores identificaram no ensaio de aderência que o concreto geopolimérico apresentou escorregamento 40% menor e tensão de aderência 23% maior em relação ao concreto de cimento Portland. Isso permite reduzir o comprimento de ancoragem das armaduras, possibilitando estruturas com menor consumo de aço e, portanto, mais econômicas.

Quanto à capacidade de deformação dos materiais, Pelisser *et al.* (2018) constatou que o concreto geopolimérico utilizando metacaulim com razões molares  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de 6,94 e  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 3,20 apresenta carga máxima de ruptura e momento fletor superior ao concreto convencional, além de maior fator de ductilidade (1,92 contra 1,59). Tais resultados indicaram melhor desempenho estrutural e maior capacidade de deformação de elementos estruturais, como vigas, em concreto geopolimérico antes da ruptura.

Para Nematollahi *et al.* (2014) e Pelisser *et al.* (2018), vigas de concreto geopolimérico apresentam maior deformação plástica, levando a uma ductilidade mais elevada. Desse modo, o concreto geopolimérico pode suportar maiores deformações sem se romper, haja vista que apresenta maior resistência à propagação de fissuras. Ademais, o comportamento entre os dois tipos de concreto é semelhante no regime elástico. No primeiro trabalho, os autores utilizaram cinzas volantes com baixo teor de cálcio como precursor e quatro diferentes combinações de ativadores: duas soluções ativadoras à base de sódio (Na), uma à base de potássio (K) e uma combinação ativadora à base de cálcio (Ca) na forma de pó, além de fibras curtas de álcool polivinílico (PVA). No segundo trabalho, os autores utilizaram as matérias-primas mais comuns (metacaulim, silicato de sódio e hidróxido de sódio).

Além da eficiência mecânica observada, o concreto geopolimérico também oferece outras vantagens importantes, como a coloração geralmente mais clara, que pode contribuir para a mitigação de ilhas de calor em áreas urbanas (Lu *et al.*, 2023).

Em termos de durabilidade, o concreto geopolimérico demonstra uma performance significativamente melhor do que o concreto de cimento Portland. Sua composição química e processo de cura resultam em um material mais resistente à corrosão e com maior vida útil, sendo uma opção atraente para aplicações em ambientes agressivos. Exemplificando, Davidovits (1994) avaliou a resistência à corrosão ácida de diferentes tipos de cimento imersos em soluções de 5% de  $H_2SO_4$  e HCl, e concluiu que o cimento ativado alcalinamente com metacaulim apresentou a melhor resistência. Os cimentos Portland comum e Portland com adição de escória foram destruídos com facilidade em ambientes ácidos. O cimento de aluminato de cálcio perdeu entre 30% e 60% de sua massa, enquanto que o cimento ativado alcalinamente com metacaulim perdeu apenas de 5% a 8%. Assim, Jesus *et al.* (2019) reforçam a ideia de que estruturas de concreto geopolimérico protegem naturalmente os aços quando na presença de intempéries ácidas, básicas e salinas.

Além disso, Lima (2021), em seu trabalho, destacou que o concreto geopolimérico composto com metacaulim, silicato e hidróxido de sódio consegue manter melhor a sua massa em altas temperaturas, podendo ser utilizado como material de proteção. Assim, para o concreto geopolimérico, o autor constatou perda de 8,52% em massa, com o material sujeito à temperatura de 1200 °C, enquanto que nas mesmas condições, o concreto de cimento Portland perdeu 25,03%. Borges *et al.* (2014) reforçam essa característica e afirmam que, mesmo quando aquecido, há ausência de emissão de gases tóxicos.

Somado a isso, Davidovits (1984), Davidovits *et al.* (1994) e Barbosa e Mackenzie (2003) relataram excelentes propriedades de resistência térmica em materiais formulados com metacaulim e silicatos de sódio ou potássio, com estabilidade térmica variando de 1200 a 1400 °C. Ademais, Kuenzel *et al.* (2013) analisaram argamassas geopoliméricas de metacaulim com 50% de areia de sílica, expostas a até 1200 °C por 2 horas. Os resultados indicaram que a resistência à compressão e a microestrutura permanecem estáveis até 800 °C. Acima disso, há formação de fases cristalinas (como nefelina) e, após 1000 °C, ocorre a transformação das amostras em cerâmicas com boa resistência. No entanto, entre 1000 e 1200 °C, as amostras começaram a amolecer, formando poros e perdendo densidade. Também foi observado que areias com granulometria mais fina melhoram a resistência, mesmo após exposição a altas

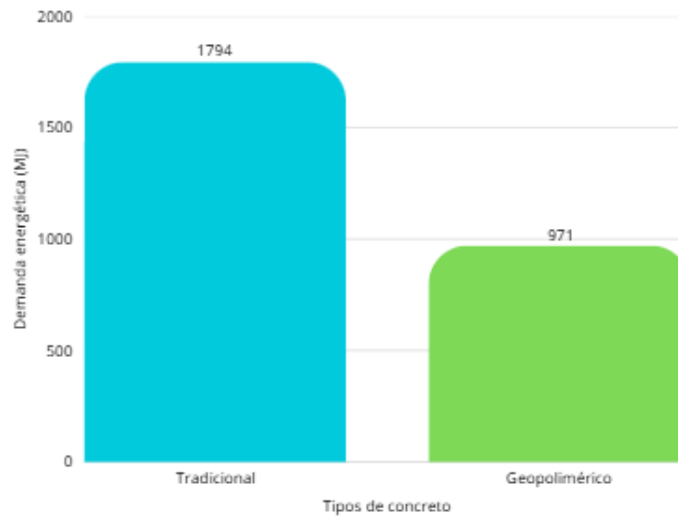
temperaturas. Rashad (2013) observou que geopolímeros com base em metacaulim apresentam alta resistência ao calor. Quando combinados com escória, esses compósitos demonstram melhor resistência residual até 800 °C. No entanto, após o resfriamento a partir de 1000 °C, os sistemas com apenas metacaulim mantêm desempenho superior.

Em relação à sustentabilidade do material em comparação com o concreto de cimento Portland, Borges (2014) e Bichinho (2019) apontam que a demanda energética do concreto geopolimérico é inferior à demanda do concreto à base de cimento Portland, devendo, principalmente, às técnicas de obtenção dos ligantes para o concreto geopolimérico, sendo obtidos em temperaturas inferiores aos materiais utilizados no concreto convencional, além de que o novo concreto utiliza rejeitos de várias indústrias (Lima, 2021). Segundo Alves (2013), a produção dos geopolímeros requer em média 90% menos energia do que a necessária para produzir o cimento Portland, além de gerar baixas emissões de dióxido de carbono na atmosfera.

Tempest *et al.* (2009) analisaram o consumo de energia necessário para a ativação das cinzas volantes na produção de concreto geopolimérico e o compararam com o concreto tradicional à base de cimento Portland, ambos com resistência mecânica equivalente. Os resultados indicaram uma economia energética de aproximadamente 30% em favor do concreto geopolimérico, evidenciando não apenas um menor consumo de energia, mas também uma redução significativa nas emissões de dióxido de carbono, o que representa uma alternativa mais sustentável e economicamente vantajosa.

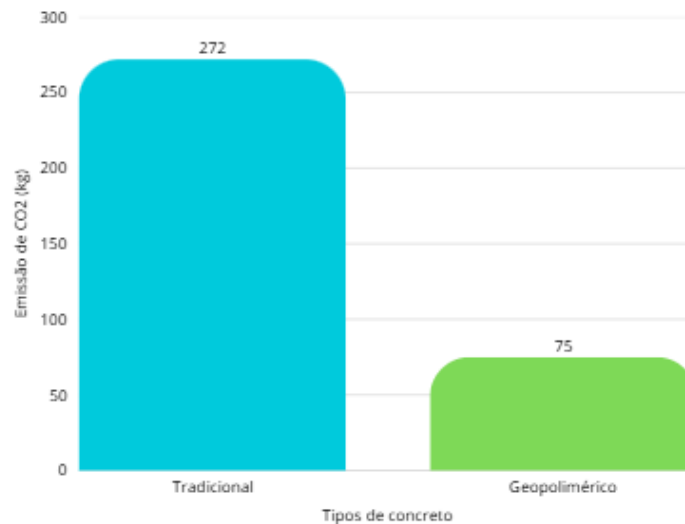
Borges *et al.* (2014), compararam a demanda energética e emissões de CO<sub>2</sub> na produção de um metro cúbico de concreto tradicional (utilizando o CP II-E) e geopolimérico (composto por metacaulim e ativado com hidróxido de sódio e silicato de sódio), apresentados nas Figuras 07 e 08.

Figura 07 – Demanda energética na produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.



Fonte – Adaptado de Borges *et al.* (2014).

Figura 08 – Emissões de CO<sub>2</sub> na produção de 1 m<sup>3</sup> de concreto.



Fonte – Adaptado de Borges *et al.* (2014).

A partir da interpretação das imagens, percebe-se que, o novo tipo de concreto se destaca em ambos os casos, representando 54,12% da demanda energética do concreto convencional e apenas 27,62% das emissões de um metro cúbico do concreto de cimento Portland.

Sob outro aspecto, Lima (2021) relatou que na produção dos concretos, o de cimento Portland emitiu 287,10 kg de CO<sub>2</sub> equivalente, enquanto que o de cimento geopolimérico, com a mesma matéria-prima (de fontes diferentes), emitiu 154,86 kg de CO<sub>2</sub> equivalente, quase o dobro do trabalho de Borges *et al.* (2014). Entretanto, em função da resistência à compressão muito superior à do concreto convencional, o autor afirma que as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas. O mesmo pode ser debatido em relação à demanda energética, 1681,19 MJ e 2010,14

MJ, respectivamente, para o concreto tradicional e para o geopolimérico. Sendo o concreto geopolimérico um material em constante desenvolvimento, novas técnicas e estudos surgem a cada dia (Lima, 2021). Mothé (2004) descreve a forma de sintetizar metaculinita através da calcinação da caulinita com temperaturas entre 400°C e 650°C como uma dessas formas de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e a demanda energética.

Além dessas propriedades e vantagens em relação ao concreto de cimento Portland, Jesus *et al.* (2019) e Borges *et al.* (2014) destacam outras, como a menor ocorrência de reações do tipo álcali-agregado, patologia muito comum em estruturas convencionais; facilidade de moldagem e obtenção de formas variadas; e baixa retração, massa específica e condutividade.

No entanto, uma das desvantagens do concreto geopolimérico em comparação com o concreto de cimento Portland é o custo inicial mais elevado (Lima, 2021). Isso se deve principalmente à complexidade dos materiais e técnicas de produção envolvidas na fabricação do concreto geopolimérico, que ainda não tem sua produção de forma industrializada e normatizada. Porém, em longo prazo, seu custo pode ser compensado devido à sua durabilidade e menor necessidade de manutenção. Além disso, há também a limitação normativa, inexistente no Brasil quanto a esse material geopolimérico. Assim, sem uma norma oficial, os geopolímeros e, por sua vez, o concreto geopolimérico, encontram dificuldade de serem aplicados na indústria da Construção Civil nacional. Como alternativa, pesquisadores têm usado normas internacionais, como as da ASTM (dos Estados Unidos), da RILEM e da BS EN (normas europeias) para realizar os ensaios e avaliar o desempenho do material. Por exemplo, a ASTM C109 é usada para ensaios de compressão, e a BS EN 196-1 também serve como base para avaliar propriedades mecânicas.

A Tabela 2 apresenta um resumo da comparação entre os dois materiais:

Tabela 2 – Comparação entre concreto geopolimérico e o concreto convencional.

Parâmetro	Concreto Geopolimérico	Concreto de Cimento Portland
Mecanismo de endurecimento	Geopolimerização	Hidratação (formação de C-S-H e Ca(OH) <sub>2</sub> )
Temperatura de cura	Ambiente ou elevada (40–85 °C, dependendo da mistura)	Ambiente com umidade
Resistência à compressão	Pode superar o Portland (até 60 MPa ou mais)	Em média 25–40 MPa, dependendo da classe
Resistência química	Alta – resiste a ambientes ácidos, básicos e salinos	Baixa – especialmente vulnerável a ambientes ácidos
Estabilidade térmica	Excelente – mantém resistência até 1200 °C	Fraca – degradação significativa a altas temperaturas
Ductilidade	Maior deformação plástica e fator de ductilidade (até 1,92)	Menor capacidade de deformação (fator em torno de 1,59)
Módulo de elasticidade	Até 45% inferior ao do Portland (ex: 26 GPa)	Mais elevado (ex: 48 GPa)
Emissão de CO <sub>2</sub> (produção)	0,18 t de CO <sub>2</sub> por tonelada de cimento (Davidovits, 2002)	0,95 t de CO <sub>2</sub> por tonelada de clínquer
Tempo de pega	Rápido – pega em 90 min, endurecimento em 4 h	Variável – depende da cura úmida e adições minerais
Trabalhabilidade	Boa – pode ser ajustada com ativadores ou superplastificantes	Boa – já bem dominada na prática
Durabilidade	Elevada – maior vida útil e menor necessidade de manutenção	Menor – sujeito a patologias e deterioração em ambientes agressivos

Fonte: Autor (2025).

## 2.5. Aplicações dos geopolímeros

Os materiais geopoliméricos destacam-se por suas excelentes propriedades físicas e químicas, o que abre um vasto leque de aplicações potenciais. Sua versatilidade permite o uso desde elementos estruturais e não estruturais na construção civil até aplicações em setores de alta tecnologia. A capacidade de serem sintetizados a partir de resíduos industriais ricos em aluminossilicatos amorfos, aliada às suas características vantajosas, os torna substitutos promissores, parcial ou totalmente, para os cimentos tradicionais.

De maneira geral, as propriedades mecânicas do concreto geopolimérico indicam seu forte potencial para uso em elementos estruturais. Esse tipo de concreto apresenta melhor aderência na interface com o aço, além de maior ductilidade e tenacidade, o que contribui para um desempenho estrutural superior das vigas em relação ao concreto tradicional de cimento Portland. Sumajouw *et al.* (2007) destacam que o concreto geopolimérico produzido com cinzas volantes possui excelente viabilidade para uso na indústria de pré-moldados. Além disso, segundo Reed *et al.* (2014), há boas perspectivas para sua aplicação em estruturas moldadas in

loco. Apesar desses avanços, é fundamental a realização de mais testes experimentais que considerem as diversas variáveis envolvidas na execução estrutural, a fim de garantir um uso seguro do material.

#### 2.5.1. Infraestrutura e construção civil

O concreto geopolimérico tem encontrado ampla utilização em obras de infraestrutura, como pontes, viadutos e rodovias (Wincret Designer Concrete Products Ltda, 2016). Isso se deve às suas propriedades mecânicas e químicas superiores, incluindo alta resistência à compressão e durabilidade, características essenciais para a segurança e longevidade dessas estruturas. Projetos de pontes de grande vão e viadutos em condições climáticas adversas têm se beneficiado do desempenho superior do concreto geopolimérico em comparação ao cimento Portland, resultando em estruturas mais duráveis e com melhor custo-benefício a longo prazo.

Além da durabilidade, a sustentabilidade é um fator chave. A menor emissão de CO<sub>2</sub> associada à produção e o consumo reduzido de água tornam o concreto geopolimérico uma opção viável e mais ecológica para grandes obras. Diversos países como Austrália, Canadá e Europa já utilizam concreto geopolimérico em dormentes de ferrovias, painéis pré-fabricados, blocos e outras obras de infraestrutura (Vassalo, 2013).

Um exemplo notável é a reparação de rodovias e pistas de aeroportos. O cimento Pyrament, um tipo de geopolímero, foi utilizado em reparos emergenciais nos aeroportos militares na Arábia Saudita durante a Guerra do Golfo em 1991 (Davidovits, 2002) (Figura 09).

Figura 09 – Utilização do geopolímero Pyrament como material de reparos emergenciais



Fonte: Davidovits (2002)

O maior projeto documentado utilizando concreto geopolimérico é o Aeroporto de Brisbane West Wellcamp, na Austrália, onde foram consumidas 100.000 toneladas (40.000 m<sup>3</sup>) do material, concretado in loco e em condições ambientes (Hartmann, 2016; Institute, 2015) (Figuras 10 e 11). Estima-se que essa escolha evitou a emissão de 6.600 toneladas de CO<sub>2</sub> (Institute, 2015).

Figura 10 – Aeroporto BWWA em construção



Fonte: Concrete Future (2014)

Figura 11 – Aeroporto BWWA em funcionamento



Fonte: Concrete Future (2014)

### 2.5.2. Resistência ao fogo e altas temperaturas

Uma das aplicações mais significativas dos geopolímeros é em materiais resistentes ao fogo e a altas temperaturas. Eles podem ser utilizados em cerâmicas refratárias, compósitos resistentes ao fogo para edifícios, aeronaves (interiores), construção naval e até na indústria de energia nuclear (Komnitsas e Zaharaki, 2007). Painéis de madeira resistentes ao fogo foram uma das aplicações patenteadas por Davidovits. Estudos mostram excelente desempenho termomecânico mesmo após exposição a altas temperaturas, mantendo a integridade estrutural sem mudanças significativas (Porto, 2018). Na Europa, há um mercado focado no retrofit de edifícios de patrimônio cultural, onde a segurança contra fogo é primordial.

### 2.5.3. Contenção de resíduos e durabilidade

Geopolímeros são eficazes na contenção e imobilização de resíduos tóxicos, perigosos e radioativos (Komnitsas e Zaharaki, 2007; Davidovits, 2002; Davidovits, 2008). Sua estrutura densa e estável quimicamente permite encapsular esses materiais de forma segura. Além disso, apresentam excelente aderência a reforços de aço e durabilidade em ambientes agressivos

(Miranda *et al.*, 2005). A busca por materiais de longa duração é outro fator impulsionador, com Davidovits sugerindo a possibilidade de formular geopolímeros capazes de resistir às intempéries por 2500 a 5000 anos (Davidovits, 2002). Essa durabilidade estendida contribui para a redução do impacto ambiental ao longo do ciclo de vida (Torgal e Jalali, 2011).

#### 2.5.4. Outras aplicações

A versatilidade dos geopolímeros depende da sua composição química, especialmente da razão molar Si/Al (Davidovits, 1999; Pinto, 2006). Razões Si/Al mais baixas (1/1, 2/1, 3/1) tendem a formar redes tridimensionais mais rígidas, adequadas para cimentos, concretos, tijolos, cerâmicas e encapsulamento de resíduos. À medida que a razão Si/Al aumenta (até 35/1), formam-se estruturas mais poliméricas (cadeias longas com ligações cruzadas de Al), adequadas para selantes, compósitos resistentes ao fogo e ferramentas para indústria aeronáutica e de fundição.

Outras aplicações incluem:

- Artefatos decorativos de pedra.
- Geopolímero expandido para isolamento térmico.
- Sistemas de resinas de alta tecnologia.
- Ferramentas estruturais avançadas (Komnitsas e Zaharaki, 2007).
- Materiais de fundição.
- Compósitos para interiores de automóveis.
- Reparo e reforço de estruturas de concreto, tijolo e pedra, como o envolvimento de pilares em compósitos de fibra para resistir a terremotos ou furacões.
- Produção de peças com moldes complexos, pois o cimento geopolimérico permite reprodução idêntica ao molde, com precisão, e podem ser usinados ou reparados (Davidovits, 1991).

A viabilidade da produção em larga escala para a construção civil depende de fatores como a origem e constância da matéria-prima, tipo e concentração do ativador, e a relação sólido/líquido que influencia a reologia e resistência (Cascaes, 2016). A pesquisa contínua busca otimizar esses fatores para tornar o processo mais acessível.

## **2.6. Condicionantes e variáveis para a geopolimerização**

O tópico atual apresentará variáveis e fatores que definirão a estrutura e resistência dos geopolímeros. Assim, pequenas alterações na composição das matérias-primas podem resultar em materiais com diferentes aplicações, apresentando propriedades específicas. Nesse sentido, serão apresentados resultados de diversas pesquisas para nortear futuros estudos sobre o tema.

Por se tratar de um material em constante desenvolvimento, há pesquisas sobre muitas variáveis e inserção de novos materiais/resíduos incorporados aos já testados e aprovados cientificamente na produção dos geopolímeros. Pinto (2004) afirma que apesar de existirem muitos estudos, ainda existem diferentes opiniões sobre o uso de diferentes ativadores e diferentes proporções na produção do cimento geopolimérico, não tendo definida a concentração exata do ativador.

Boca Santa (2012) destacou que, além das variáveis principais, existem outros fatores que precisam ser analisados para otimizar os resultados, como o teor de material amorfo, o grau de cristalinidade, o tamanho das partículas e a presença de metais pesados nas matérias-primas, especialmente quando se utilizam resíduos industriais. A combinação de diferentes fontes de aluminossilicatos também constitui uma variável adicional que deve ser cuidadosamente ajustada conforme as características dos materiais empregados. Além disso, variações podem surgir ao se incorporar agregados, como areia e brita, na matriz geopolimérica para a produção de argamassas e concretos.

### **2.6.1. Razão entre $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$**

Para Boca Santa (2012), a variação de tempo para configuração dos sistemas

geopoliméricos é controlada pela alumina e aumenta com o aumento da razão entre  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  na mistura inicial. Desse modo, havendo um aumento de alumina, a razão baixa e os produtos resultantes adquirem menor força. Para Fletcher *et al.*, (2005) *apud* Komnitasas *et al.*, (2007), a alta da alumina na composição provoca redução na resistência. Vassalo (2013) relata que estudos demonstram que as propriedades dos geopolímeros podem ser afetadas por uma pequena alteração na quantidade de Si e Al disponíveis na reação, assim é necessário um estudo completo da reatividade das matérias primas. O mesmo autor afirma que a razão ideal de Si/Al é de 1,5 a 2 para geopolímeros produzidos por ativação do metacaulim. Para valores superiores a esses, as propriedades mecânicas foram minimizadas.

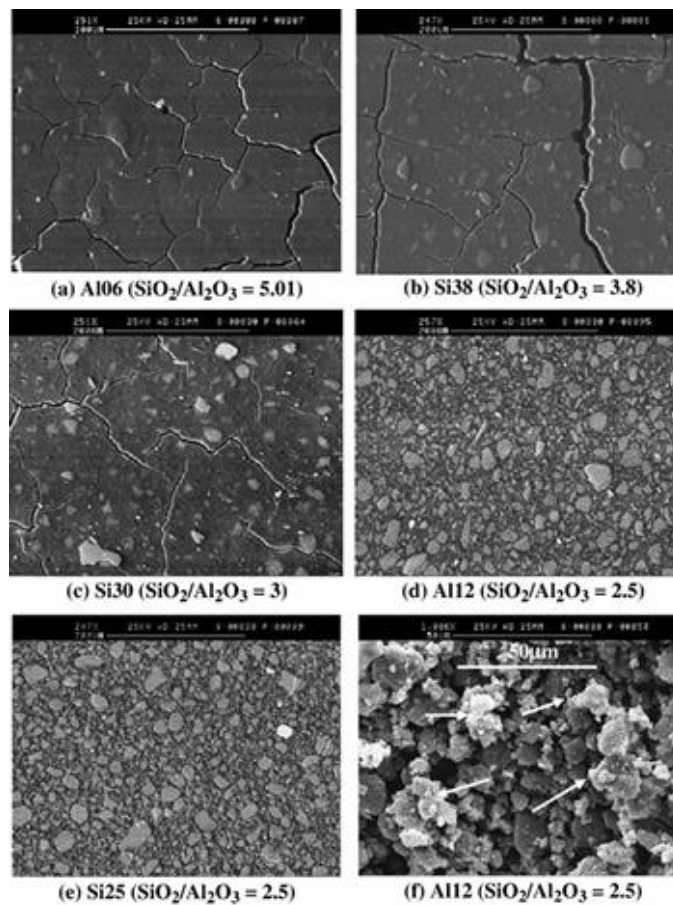
Em 2005, Duxson *et al.* relataram propriedades melhores dos geopolímeros obtidos com razões molares de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  entre 3,0 e 3,8, encontrando resultados com menores resistências em outras proporções. Em outro trabalho, Duxson *et al.* (2007) discorda dos valores propostos por Vassalo (2013) e aumenta o intervalo proposto por si e outros autores, propondo razões ideais de sílica/alumina entre 3,3 e 4,5. Em outras pesquisas, Aquino *et al.* (2001) e Temuujin *et al.* (2009) utilizaram em seus experimentos razões entre 1,2 e 2,5, concluindo que as razões molares ótimas seriam entre 1,5 e 2. Jimenez *et al.* (2006) aumenta esse intervalo para entre 1,4 e 2,38. Pinto (2004) também estudou geopolímeros ativados com metacaulim e constatou que algumas formulações contendo hidróxido de cálcio e razão molar de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  de 5,1 apresentaram desempenho superior em relação à resistência à compressão. Ademais, Zhang *et al.* (2007) investigaram metacaulim com alta razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  e observaram que os produtos de hidratação formados durante a geopolimerização apresentaram uma razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  inferior à do material precursor original.

Para Rashad (2013), os valores ótimos de razões molares variam de 3,5 a 5,5 e acrescenta que o tipo de ativador e o estado de cura têm importância na obtenção do material com boa resistência mecânica. Diaz *et al.* (2012) também investigaram os resultados da variação de 2,64 a 4,04 da razão molar Si/Al, obtendo melhores resultados para uma razão de 2,96. Ademais, Davidovits (1982) e Rashad (2013) indicam que as razões molares ideais para a produção de geopolímeros variam de 3,0 a 5,5. Além disso, vale destacar que essa razão é válida para o metacaulim como precursor, reforçando a ideia de mais pesquisas quanto às proporções para uso de outros materiais.

De acordo com Silva *et al.* (2007) *apud* Vassalo (2013), a condensação entre espécies de aluminato e silicato está diretamente relacionada à concentração de silício no sistema.

Quando a razão Si/Al é igual a 1, predominam reações entre o aluminato e o silicato, originando principalmente estruturas do tipo poli(sialato). À medida que essa razão aumenta, ocorre a hidrólise do  $\text{SiO}_2$ , gerando silicatos oligoméricos que, ao reagirem com  $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ , formam uma rede tridimensional composta por estruturas poliméricas do tipo poli(sialato-siloxo) e poli(sialato-disiloxo). Para esses pesquisadores, razões molares entre 3,4 e 3,8 foram responsáveis pelo ganho de resistência em estágios posteriores, além de destacar tempos de pega mais longos com o aumento dessa razão molar. Silva *et al.* (2007) estudaram ainda sobre razões molares de sílica/alumina variando em 5,01; 3,8; 3,0; e 2,5, respectivamente. Assim, os autores analisaram as imagens pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) e comprovaram que as amostras com maiores concentrações de  $\text{SiO}_2$  são mais homogêneas, com as amostras com menor teor de sílica apresentando presença de grãos, materiais possivelmente não reagidos e predominância cristalina ao invés de fases amorfas. A Figura 12 apresenta os resultados encontrados pelos autores.

Figura 12 – Análise no MEV de geopolímeros com diferentes razões molares de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$



Fonte – Adaptado de Silva *et al.* (2007)

Bernal *et al.* (2011) estudaram a resistência à compressão de argamassas de escória e

metacaulim ativadas com silicatos alcalinos. Para essa pesquisa, em relação às razões molares sílica/alumina, obtiveram que de 3,8 a 4,0, a resistência à compressão foi superior aos resultados dos geopolímeros apenas à base de metacaulim.

#### 2.6.2. Razão entre $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$

Para Olívia *et al.* (2008), a razão molar entre esses componentes é um parâmetro importante para que a reação da geopolimerização ocorra satisfatoriamente. Para eles, o aumento na concentração de  $\text{Na}_2\text{O}$ , ou seja, redução da razão entre  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ , resulta num aumento da resistência mecânica, e a redução na concentração promove a redução do pH e afeta a cinética da reação. O ativador hidróxido de sódio condiciona a variação de óxido de sódio e, conseqüentemente, a razão molar em análise. Duxson (2007) apresenta como razões ideais entre  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  os valores de 2,08 a 5,0.

Além disso, utilizando uma proporção de 0, 1, 1,5 e 2, Burciaga-Diaz *et al.* (2010) estudaram o desenvolvimento da resistência à compressão em pastas de metacaulim e escória, em conjunto, ativadas alcalinamente. Assim, concluíram que razões molares entre 1 e 1,5 foram suficientes para promover uma ativação adequada dos ligantes da escória e do metacaulim e de suas misturas binárias.

Bernal *et al.* (2011) observaram que a razão molar  $\text{SiO}/\text{Na}$  teve influência significativa nas propriedades das misturas de escória e metacaulim ativadas alcalinamente. Soluções com razão  $\text{SiO}/\text{Na}$  de 2,0 apresentaram melhor desempenho em termos de resistência à compressão ao longo do tempo, quando comparadas àquelas com razão 2,4, independentemente da proporção de metacaulim utilizada. A razão mais alta (2,4) levou a uma leve redução na resistência final, sugerindo que valores excessivos de silicato na solução ativadora podem comprometer o desenvolvimento das propriedades mecânicas do material. Além disso, Rashad (2013) enfatiza que a razão  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  influencia diretamente a razão sólido/líquido (S/L), proporcionando resistência mecânica e trabalhabilidade.

### 2.6.3. Concentração da solução ativadora

Em relação à concentração dos ativadores, hidróxidos alcalinos e silicato de sódio, ou uma combinação de ambos, têm sido estudados para cimentos ativados alcalinamente à base de metacaulim. Os cimentos ativados com silicato de sódio geralmente apresentam resistência muito superior àqueles ativados apenas com hidróxidos alcalinos. No entanto, também são necessários altas temperaturas de cura e elevada concentração de álcalis para se alcançar alta resistência a partir da ativação do metacaulim (Krivenko, 1992; Popel, 1999). Exemplificando, Fernandez-Jimenez *et al.* (2005) explicam que quando se mistura hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), o material produzido é sólido, com poucos poros e apresenta forte ligação entre a matriz geopolimérica e os agregados. Ademais, o trabalho de Gharzouni *et al.* (2015) concluiu que os geopolímeros fundamentados em uma mistura de silicato de potássio e hidróxido de potássio mostram propriedades mecânicas mais altas comparadas àquelas baseadas em misturas de silicato de sódio e hidróxido de sódio ou silicato de potássio / hidróxido de sódio.

Altan e Erdogan (2012) analisaram o desenvolvimento da resistência de argamassas produzidas com escória ativada alcalinamente, utilizando hidróxido de sódio, hidróxido de potássio e silicato de sódio, sob diferentes condições de cura. Os autores verificaram que, quando a cura é realizada à temperatura ambiente, a presença combinada do silicato de sódio e do hidróxido de sódio é fundamental para se alcançar elevadas resistências. Nesse caso, a concentração do NaOH influencia diretamente tanto a velocidade de ganho de resistência quanto o valor final obtido, pois afeta a taxa de dissolução da escória. Já em temperaturas elevadas, como a cura a 80 °C, o silicato de sódio torna-se o principal responsável pelo desenvolvimento de resistência, sendo suficiente mesmo sem a presença de NaOH, já que a alta temperatura promove uma dissolução mais intensa da escória.

Phair (2001) observou que, por possuírem menor grau de cristalinidade e maior área de superfície específica, as amostras que contêm íons de potássio ( $\text{K}^+$ ) apresentam resistência à compressão superior. Isso se deve ao fato de que o  $\text{K}^+$  possui uma esfera de hidratação menor em comparação ao  $\text{Na}^+$ , o que favorece a formação de redes de policondensação mais compactas, resultando em uma matriz com maior resistência à compressão.

Na produção dos geopolímeros, a maioria dos autores trabalham com concentração de

hidróxido de sódio de 5 a 16 mols (Rattanasak *et al.*, (2009); Olivia *et al.*, (2008); Hardjito *et al.*, (2004) e de 4 a 8 mols de hidróxido de potássio (Zararaki *et al.*, 2009; Nugteren *et al.*, 2009). De acordo com Rashad (2013), quando se utiliza hidróxido de sódio com concentração de 5 mols ou inferior, na presença de hidróxido de cálcio, o principal produto formado é o gel N–A–S–H. O autor também afirma que cimentos ativados com silicato de sódio geralmente apresentam resistência muito superior aos cimentos ativados com hidróxidos alcalinos. O gel amorfo N–A–S–H apresenta, assim, composição química semelhante à dos materiais zeolíticos naturais, porém sem a estrutura zeolítica cristalina extensiva (Barbosa *et al.*, 2000).

Torgal *et al.* (2011) investigaram a composição, a resistência e a trabalhabilidade de argamassas de metacaulim álcali-ativados. Os fatores analisados foram combinações de argamassas com concentrações de hidróxido de sódio (10, 12, 14 e 16 mol). Os resultados mostraram que a trabalhabilidade diminuiu com o aumento de concentração de hidróxido de sódio. A resistência à compressão e à flexão aumentaram cerca de 35% em função do aumento dos teores molares na concentração de hidróxido de sódio.

Para Rashad (2013), na maioria dos casos na sua pesquisa, o aumento da concentração do ativador conferiu uma maior resistência mecânica, porém até certa molaridade. Ele também relatou que o acréscimo de 10% de hidróxido de sódio na mistura com o metacaulim melhora tanto a trabalhabilidade quanto a resistência à compressão do geopolímero.

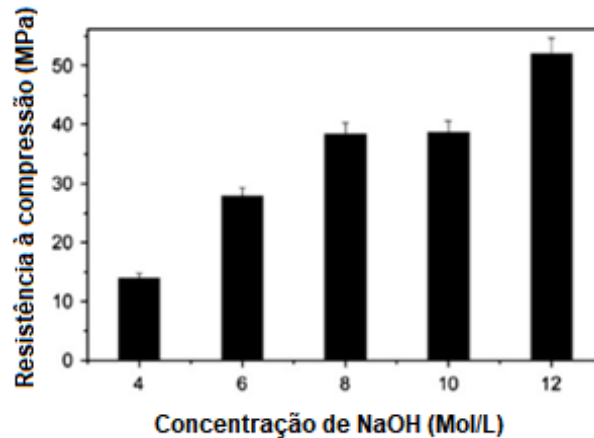
Vargas (2006) pesquisou cimentos álcali-ativados a partir da ativação das cinzas volantes, avaliando a determinação das concentrações do ativador NaOH com o objetivo de promover um melhor desempenho mecânico e estabilidade ao cimento álcali-ativado. Os resultados mostraram que concentrações mais elevadas do ativador alcalino (NaOH) contribuíram para elevar a resistência final à compressão das amostras ativadas.

Vassalo (2013) realizou testes do comportamento dos geopolímeros variando a concentração dos ativadores de 12, 15 e 18 mol, rompendo os corpos de prova aos 7, 14, 21 e 28 dias e realizando a cura em condições ambientes e em estufa. Como resultado, a autora constatou que as amostras de 12 mol de concentração obtiveram maiores resistências à compressão em ambas as condições de cura, seguidas pelas amostras de 15 mol e pelas de 18 mol, as quais apresentaram resistência consideravelmente inferiores às demais.

Wang *et al.* (2005) estudaram geopolímeros de metacaulim ativados com hidróxido de sódio. Relataram que as propriedades mecânicas dos geopolímeros dependem fortemente da

concentração da solução de NaOH. A resistência à flexão, a resistência à compressão (Figura 13) e a densidade aparente do geopolímero aumentaram conforme a concentração de NaOH variou entre 4 e 12 mol/L. Isso foi atribuído à maior dissolução das partículas de metacaulinita e, conseqüentemente, à aceleração da condensação dos monômeros na presença de NaOH em concentrações mais elevadas.

Figura 13 – Resistência à compressão do concreto geopolimérico em função da concentração de NaOH



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2005)

Granizo *et al.* (2007) apoiaram a ideia de que a ativação alcalina do metacaulim, utilizando uma solução contendo silicato de sódio e NaOH, resulta na produção de materiais com resistência mecânica superior em comparação à ativação com apenas NaOH. Além disso, observou-se que a resistência à flexão aumentou com o incremento da concentração de sódio. Pinto (2004) estudou materiais ativado alcalinamente à base de metacaulim e constatou que a resistência mecânica aumentou ao se utilizar uma concentração de 12 mol de NaOH como ativador, juntamente com a adição de hidróxido de cálcio variando de 0% a 20%. No entanto, para a concentração de 15 mol, verificou-se que a adição de hidróxido de cálcio não influenciou a resistência. Também foi relatado que a ativação alcalina do metacaulim com o uso de um ativador alcalino contendo silicato de sódio provocou um aumento na resistência mecânica, de 30 para 60 MPa na resistência à compressão e de 5 para 7 MPa na resistência à flexão. O autor ainda expôs que ativadores simples, como o hidróxido de sódio, são de natureza gelatinosa, conferindo às pastas frescas uma elevada viscosidade, que se reflete em dificuldade na mistura, da homogeneização da pasta e, conseqüentemente, na dificuldade de expulsão das bolhas de ar. Sob aspecto semelhante, Alonso e Palomo (2001) investigaram a resistência à flexão de geopolímeros à base de metacaulim com pequenas adições de hidróxido de cálcio e ativados com hidróxido de sódio em diferentes concentrações: 10, 12, 15 e 18 mol. Os resultados

mostraram que a resistência cresceu com a diminuição da concentração de hidróxido de sódio.

Torgal *et al.* (2011) investigaram o efeito da concentração do ativador sobre a trabalhabilidade de argamassas à base de aluminossilicatos ativadas alcalinamente à base de metacaulim. As concentrações de NaOH foram de 10, 12, 14 e 16 mol. Os resultados indicaram que a trabalhabilidade das argamassas frescas diminuiu com o aumento da concentração de hidróxido de sódio.

Burciaga-Diaz *et al.* (2010) estudaram o desenvolvimento da resistência à compressão em pastas de metacaulim/escória ativadas alcalinamente, utilizando teores de Na<sub>2</sub>O de 5%, 10% e 15%. Os autores concluíram que os corpos de prova com 10% de Na<sub>2</sub>O apresentaram maior resistência à compressão.

#### 2.6.4. Temperatura e tempo de cura

Quanto à influência da temperatura e do tempo de cura do cimento geopolimérico, inicialmente, destaca-se o objetivo fundamental de realizar a cura em temperatura ambiente, para que não haja gasto energético e permitindo uma comparação equivalente aos cimentos tradicionais, visando a aceitação desse material na indústria (Hardjito *et al.*, 2006).

No trabalho de Boca Santa (2012), nos ensaios de resistência à compressão da pasta geopolimérica, em todas as amostras foi observado que, quanto maior o tempo de cura, maior a resistência dos materiais. Os ensaios foram analisados em triplicata com 24 horas, 7, 28 e 90 dias de cura, em temperatura ambiente, e os resultados de resistência à compressão obtidos foram de aproximadamente 10 a 25 MPa.

Vassalo (2013), em seu trabalho, observou que os corpos de prova curados à temperatura ambiente não sofreram retração, permanecendo com as mesmas dimensões, enquanto que os corpos de prova curados em estufa apresentaram uma diminuição de dimensões proporcional ao teor do ativador utilizado devido à retração. Assim, esse efeito foi percebido desde as primeiras idades, perdendo cerca de 20% de massa em todos os corpos de prova ensaiados que realizaram a cura em estufa. A Figura 14 apresenta a diferença entre os corpos de prova curados a temperaturas diferentes.

Figura 14 – Análise visual dos corpos de prova curados aos 28 dias, em a) estufa; b) temperatura ambiente



a) b)

Fonte: Adaptado de Vassalo (2013)

Além disso, Vassalo (2013) realizou ensaios de difratogramas de raios-X do geopolímero. Com os resultados, para a autora, indicou que a temperatura durante a polimerização afeta o comportamento de cristalização dos geopolímeros. O comportamento de cristalização de geopolímeros depende não só da temperatura, mas também das condições do ativador e tempo de cura (Yao *et al.*, 2009).

Em sua pesquisa, Vassalo (2013) obteve que as amostras curadas em estufa apresentaram uma maior resistência nas idades iniciais e aos 28 dias apresentou resistência muito próxima. Segundo Diaz *et al.* (2011), tal resultado estaria relacionado à dissolução do metacaulim, que é mais intensa a temperaturas mais elevadas, e à condensação dos produtos de reação. As amostras curadas à temperatura ambiente apresentaram resultados diferentes, porém, aos 28 dias, semelhantes a resistência obtida nas amostras curadas em estufa. A dissolução do metacaulim ocorreu mais lentamente e a condensação dos produtos de reação foi realizada de forma mais homogênea, devido à maior retenção de água dentro da microestrutura. Como consequência, os processos de difusão e formação do geopolímero continuam até certo ponto e o consumo dos reagentes e a densificação da matriz de reação tornam-se fatores limitantes para ganho de resistência inicial.

Segundo Palomo *et al.* (1999), a temperatura e o tempo de cura condicionam o comportamento mecânico. Assim, os autores comprovaram isso em seus estudos trabalhando com cimentos ativados alcalinamente à base de cinzas volantes, tendo como resultado a resistência à compressão de 40 MPa para amostras ativadas por duas horas a 85°C. Hardjito *et al.* (2006) e Hardjito *et al.* (2007) dissertam que a cura acelerada aumenta a resistência mecânica em virtude da energia necessária para dissolução de cinzas ser um processo endotérmico, já o aumento na temperatura pode acelerar a velocidade da reação, resultando numa maior

resistência à compressão. Vale destacar também que embora vários pesquisadores, como Davidovits (1999) e Hardjito *et al.* (2004) acreditem que a cura ótima ocorre à 60°C, esta temperatura depende de fatores como finura do metacaulim, tipo de ativador e dosagem e à superfície específica do pó de metacaulim (Rashad, 2013). Para Thakur *et al.* (2009), a temperatura ideal de cura para o máximo de resistência à compressão obtida é de 85°C, por um período de 4 a 72 horas.

Alonso e Palomo (2001) substituíram parcialmente o metacaulim por hidróxido de cálcio nos teores de 30% ou 50%. Os corpos de prova foram curados por 24 horas a diferentes temperaturas: 35, 45 e 60 °C. Após a cura, os corpos de prova foram testados à flexão. Os resultados mostraram que a resistência aumentou com o aumento da temperatura de cura.

Muñiz-Villarreal *et al.* (2011) estudaram o efeito da temperatura de cura no processo de geopolimerização de geopolímeros à base de metacaulim ativados com hidróxido de sódio e silicato de sódio. Foram analisadas temperaturas de cura de 30, 40, 50, 60, 75 e 90 °C. Os autores relataram que a temperatura ótima de cura foi de 60 °C, que proporcionou o melhor desempenho na geopolimerização.

Diaz *et al.* (2012) analisaram a resistência à compressão de um geopolímero à base de metacaulim, composto por 70% de caulim e 30% de quartzo, previamente calcinado e ativado quimicamente por meio de soluções de silicato de sódio e hidróxido de sódio. A pesquisa avaliou o desenvolvimento da resistência conforme a temperatura de cura, comparando 20°C e 80°C. Verificou-se que a cura realizada a 80°C proporcionou melhores resultados, especialmente em idades iniciais. Em relação à microestrutura, foram identificadas partículas de metacaulim transformadas em uma matriz de sílico-aluminato, além da formação de gel de sílica proveniente da condensação do silicato de sódio residual.

Villa *et al.* (2010) avaliaram o tempo e temperatura de cura na resistência mecânica dos geopolímeros obtidos por meio de ativação de zeólita natural com soluções de silicato e hidróxido de sódio. Os resultados demonstraram que as amostras curadas a 60° e 80°C favoreceram um aumento da resistência nas primeiras idades, concordando com Diaz *et al.* (2012), porém não avançaram ao longo do período de cura. Os melhores resultados de resistência à compressão foram obtidos nas amostras curadas a 40°C, principalmente ao longo das idades de cura.

Rovnanik (2010) *apud* Boca Santa (2012) avaliou a influência da temperatura (10, 20,

40, 60 e 80 °C) e do tempo de cura (0, 1, 3, 7 e 28 dias) nas propriedades de geopolímeros formulados com metacaulim álcali-ativado por silicato de sódio. Foram analisadas a resistência mecânica, a distribuição de poros e a microestrutura do material. Os resultados demonstraram que a temperatura de cura exerce papel determinante na definição e endurecimento do geopolímero. A elevação da temperatura promoveu aumento significativo da resistência à compressão nas idades iniciais; contudo, aos 28 dias, verificou-se redução da resistência nas amostras curadas a altas temperaturas, em comparação àquelas mantidas em temperatura ambiente. As análises por porosimetria indicaram diminuição do tamanho médio dos poros em todas as amostras, com variações influenciadas diretamente pela temperatura de cura. A aplicação de calor nas fases iniciais do processo resultou na formação de poros maiores, impactando negativamente o desempenho mecânico final do compósito.

#### 2.6.5. Adições de cálcio

Em relação ao comportamento dos geopolímeros quando adicionadas pequenas quantidade de cálcio em sua estrutura (nos precursores ou nos ativadores alcalinos), diversos autores realizaram pesquisas, objetivando entender a modificação nas propriedades e guiar outros trabalhos. Exemplificando, alguns trabalhos apresentaram que a resistência à compressão foi reduzida com acréscimo de óxido de cálcio na composição do geopolímero (Vargas *et al.*, 2006) e outros sugerem que a presença de cálcio nas cinzas volantes pode interferir na taxa de polimerização e alterar a microestrutura dos materiais geopoliméricos formados (Golley, 2003; Wallat e Rangan, 2006).

A adição de uma quantidade suficiente de cálcio ao aluminossilicato ativado alcalinamente à base de metacaulim, na forma de hidróxido de cálcio, pode levar à formação de fases separadas de C-S-H substituído por alumínio e géis N-A-S-H (Granizo *et al.*, 2002; Yip *et al.*, 2005; Davidovits, 1999). Além disso, observa-se que tal comportamento é mais comum em sistemas com baixa alcalinidade, uma vez que concentrações reduzidas de íons OH<sup>-</sup> favorecem a dissolução do hidróxido de cálcio. Em contrapartida, ambientes altamente alcalinos tendem a inibir essa dissolução, podendo inclusive promover a decomposição de fases tipo C-S-H eventualmente formadas no sistema (Rashad, 2013).

Torgal *et al.* (2011) investigaram a trabalhabilidade de argamassas de metacaulim álcali-

ativados com a substituição do metacaulim por hidróxido de cálcio em porcentagens de 5 e 10%. Os resultados mostraram que a trabalhabilidade diminuiu com o aumento da concentração do hidróxido de cálcio.

Alonso e Palomo (2001) substituíram parcialmente o metacaulim por hidróxido de cálcio nos teores de 30% ou 50%. Os compósitos foram ativados com hidróxido de sódio. Após a cura, os corpos de prova foram testados à flexão e os resultados mostraram que a inclusão de 50% de hidróxido de cálcio proporcionou maior resistência à flexão do que 30%.

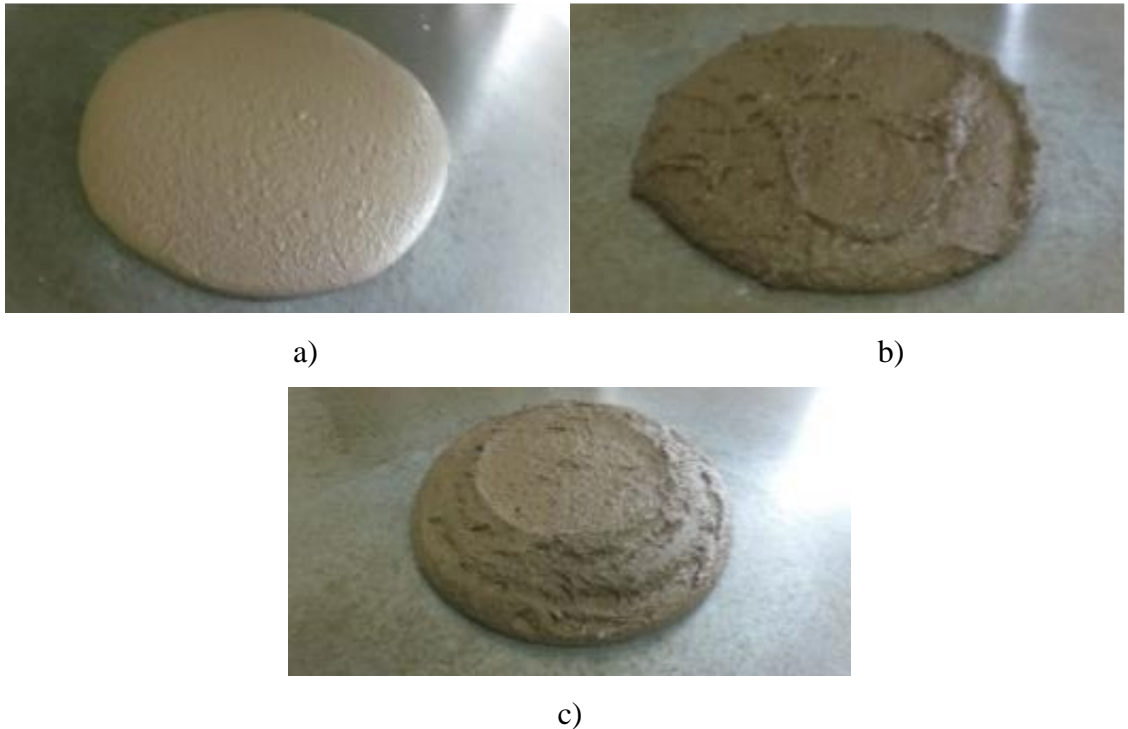
Buchwald *et al.* (2005) investigaram como a presença de cálcio afeta a resistência à compressão de geopolímeros à base de metacaulim ativados com solução de hidróxido de sódio a 8 mol/L. Para isso, o teor de cálcio foi progressivamente elevado por meio da substituição parcial do aluminossilicato por hidróxido de cálcio, até um limite de 40% em massa. As resistências à compressão foram analisadas aos 28 e 111 dias de cura. Os resultados revelaram que a adição de cálcio influenciou significativamente o desempenho mecânico dos materiais, sendo que o teor ótimo observado foi de aproximadamente 10%.

#### 2.6.6. Variações no teor dos precursores e combinações entre eles

Quanto à variação no teor dos precursores, tem-se que o estudo dessas condicionantes é fundamental para a industrialização desse material, haja vista que pequenas variações, bem como adições e substituições nos materiais precursores podem produzir materiais com características consideravelmente diferentes entre si.

Nesse contexto, Rosseto (2017) verificou os efeitos da adição e/ou substituição de metacaulim por lodo de estações de tratamento de água nas argamassas geopoliméricas. Assim, o autor realizou análises sobre a trabalhabilidade, resistência mecânica e propriedades físicas de amostras com adição de 10% a 20% de lodo ao metacaulim como precursores e também a substituição do metacaulim de 10% a 30%. Como resultados, foi percebido que a trabalhabilidade foi reduzida com o acréscimo de adição e de substituição, tendo valores mais próximos à amostra de referência nos casos de substituição. A Figura 15 ilustra o resultado do autor.

Figura 15 – Ensaio Flow Table: a) formulação de referência; b) 30% de substituição; c) 20% de adição



Fonte: Adaptado de Rosseto (2017)

Em relação à resistência mecânica das amostras, Rosseto (2017) relatou que a resistência à compressão aos 28 dias teve redução de seus valores em relação à referência na ordem de 25% a 50% quando analisadas as amostras de substituição, enquanto que as de adição proporcionaram um aumento de 17% para a formulação de 15% e de aproximadamente 5% acima do valor de referência nas outras adições. Somado a isso, o comportamento dos valores de resistência à flexão obtidos nas amostras apresentou semelhança ao da resistência à compressão, uma vez que as amostras de substituição tiveram redução em relação à referência na ordem de 25% a 40% e as de adição obtiveram um aumento de 10% para a formulação de 10% e valores consideravelmente próximos nas outras adições. Ademais, Rosseto (2017) ainda destaca que a relação dos valores de resistência à flexão e à compressão obtidos na pesquisa são muito superiores se comparada às argamassas de cimento Portland, alcançando, em média, 22,4%.

Quanto às propriedades físicas, comparadas à amostra de referência, para substituição, a absorção cresceu até 20% e reduziu para 25% e 30%. A densidade aparente e a porosidade aberta sempre diminuíram. No caso de adição, a absorção, densidade aparente e porosidade aberta decresceram em todas as formulações. De maneira geral, a incorporação do lodo gerou queda nos índices de propriedades físicas (Rosseto, 2017).

Em outros estudos realizando a incorporação do lodo ao concreto, Hoppen *et al.* (2005) atingiram resistência à compressão aos 28 dias, de 39 MPa, 34 MPa, 33 MPa, 29 MPa e 12 MPa para 0%, 3%, 5%, 7% e 10% de incorporação, respectivamente, enquanto que Gomes *et al.* (2010) atingiu 19,95 MPa, 17,80 MPa, 15,40 MPa, 7,84 MPa e 3,76 MPa para 0%, 3%, 5%, 10% e 15% de adição de lodo.

Zhang *et al.* (2009) modificaram geopolímeros à base de metacaulim com cinzas volantes. O metacaulim foi parcialmente substituído por cinzas volantes nos teores de 0%, 33,3%, 50% e 66,7%, em massa. Os autores concluíram que a adição adequada de cinzas volantes (33,3%) aumentou a fluidez da pasta fresca, prolongou o tempo de pega e melhorou a resistência à compressão do geopolímero endurecido. A resistência à compressão do geopolímero contendo 33,3% de cinzas volantes curado a vapor por 6 dias foi melhorada em 35,5%.

Aguilar *et al.* (2010) desenvolveram concretos leves utilizando ligantes compostos por metacaulim, com substituição parcial de 0% e 25% por cinzas volantes. Foram produzidos concretos com densidades de 1200, 900 e 600 kg/m<sup>3</sup> por meio de aeração obtida com a adição de pó de alumínio. Em algumas composições, incorporaram-se agregados leves de escória de alto-forno, na proporção ligante/agregado de 1/1. Os autores concluíram que é tecnicamente viável produzir concretos geopoliméricos à base de metacaulim com diferentes densidades. Além disso, a substituição de 25% do metacaulim por cinzas volantes demonstrou ser eficaz na formação de pastas cimentícias reativas.

Yunsheng *et al.* (2008) investigaram a durabilidade de argamassas à base de metacaulim e cinzas volantes ativadas alcalinamente, modificadas com fibras curtas de PVA, formando compósitos produzidos por extrusão (SFRGC – Compósitos Geopoliméricos Reforçados com Fibras Curtas). O metacaulim foi parcialmente substituído por cinzas volantes nos teores de 0%, 10%, 30% e 50% em massa. Os resultados indicaram que a substituição de 10% de metacaulim por cinzas volantes proporcionou menor porosidade e maior resistência ao impacto.

Yunsheng *et al.* (2009) investigaram o comportamento de imobilização de argamassas geopoliméricas formadas por diferentes proporções de metacaulim e cinzas volantes (100/0, 90/10, 70/30, 50/50 e 30/70), submetidas a distintas condições de cura. Os resultados demonstraram que a composição com 70% de metacaulim e 30% de cinzas volantes, curada a vapor a 80 °C durante 8 horas, apresentou o melhor desempenho mecânico, atingindo

resistência à compressão de 32,2 MPa e à flexão de 7,15 MPa. Além do desempenho mecânico superior, esse geopolímero também mostrou-se eficaz na imobilização de metais pesados, como cobre e chumbo.

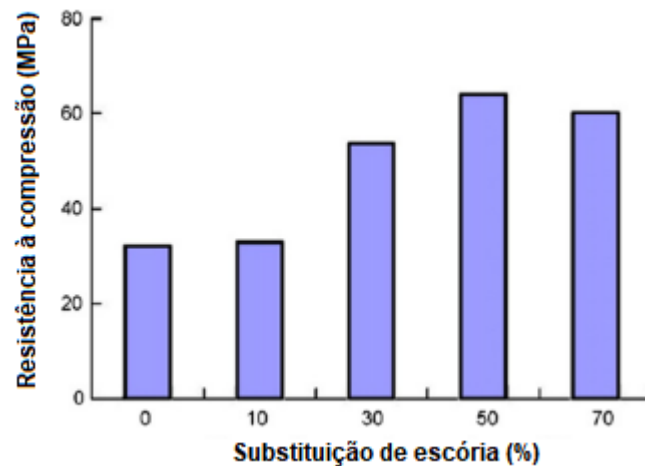
Cheng e Chiu (2003) estudaram geopolímeros de escória combinados com metacaulim. Os resultados indicaram que quanto mais metacaulim era adicionada ao sistema, maior era o tempo de pega. Além disso, a resistência à compressão também aumentou com o aumento do teor de metacaulim. Isso foi atribuído à maior formação de gel de alumínio no sistema, resultando em um grau mais elevado de reação geopolimérica, haja vista que os resultados de densidade mostraram uma diminuição com o aumento do teor de metacaulim.

Burciaga-Diaz *et al.* (2010) também estudaram o desenvolvimento da resistência à compressão em pastas de metacaulim/escória ativadas alcalinamente. Os principais parâmetros foram as proporções em massa metacaulim/escória de 100/0, 80/20, 50/50, 20/80 e 0/100 e tempo de cura. Os corpos de prova foram curados a 20 °C por 360 dias. Os resultados indicaram que a composição com 20% de escória e 80% de metacaulim apresentou a maior resistência à compressão.

Yunsheng *et al.* (2007) testaram a resistência mecânica de argamassas geopoliméricas produzidas com diferentes proporções, em massa, de metacaulim e escória: 100/0, 90/10, 70/30, 50/50 e 30/70. Os corpos de prova foram curados a 20 °C e 100% de umidade relativa por 28 dias. Os resultados mostraram que a formulação contendo 50% de escória apresentou a maior resistência à compressão, seguida pelas formulações com 70% e 30% de escória, conforme ilustrado na Figura 16. A resistência à flexão das amostras acompanhou a mesma tendência observada para a resistência à compressão.

Com base nesses resultados, a mistura 50/50 foi selecionada para uma segunda etapa do estudo, em que os corpos de prova foram curados a 80 °C por 8 horas, com o objetivo de avaliar o comportamento de imobilização de metais pesados, como chumbo e cobre. Os testes de lixiviação indicaram que a matriz geopolimérica metacaulim/escória foi eficaz na imobilização desses metais, atingindo uma eficiência superior a 98,5% quando a concentração de metais pesados variava entre 0,1% e 0,3% da massa do ligante. Observou-se, ainda, que o chumbo apresentou melhor eficiência de imobilização em relação ao cobre, especialmente nas formulações com maiores teores desses contaminantes.

Figura 16 – Gráfico de resistência à compressão do concreto geopolimérico com substituições de escória



Fonte: Adaptado de Yunsheng *et al.* (2007)

A evolução estrutural em pastas produzidas a partir de misturas de escória e metacaulim ativadas com silicato alcalino foi avaliada por Bernal *et al.* (2011). Para isso, diferentes quantidades de metacaulim foram incorporadas à escória, adotando-se proporções escória/(escória + metacaulim) de 1,0, 0,9 e 0,8. As resistências à compressão foram monitoradas ao longo do tempo, com medições realizadas até 180 dias. Os resultados revelaram que o aumento do teor de metacaulim nos ligantes provocou uma redução nas resistências à compressão. Esse efeito, por sua vez, mostrou-se ainda mais acentuado quando se utilizou um ativador com maior razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ .

Maranan *et al.* (2015) investigaram o desempenho estrutural de cinco vigas de concreto geopolimérico reforçadas com polímero reforçado com fibras de vidro (GFRP), comparando seus resultados com uma viga de controle reforçada com armadura de aço. Os ensaios demonstraram que as vigas com GFRP apresentaram capacidades de momento fletor no colapso, por esmagamento do concreto, entre 1,2 e 1,5 vezes superiores à da viga reforçada com aço, mesmo mantendo uma razão de armadura semelhante. Esses resultados indicam o potencial do uso combinado de concreto geopolimérico e armaduras poliméricas como alternativa viável e eficiente ao sistema convencional.

Complementando esse panorama, Oliveira (2005) avaliou a microestrutura e a tenacidade à fratura de geopolímeros produzidos com metacaulim, areia, escória de alto-forno e fibras de polipropileno, em comparação ao cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI). A análise microestrutural e os ensaios de compressão revelaram que o cimento geopolimérico apresentou comportamento elástico não linear antes da ruptura, além de boa aderência entre fibras e matriz nos compósitos avaliados. Comparado ao cimento Portland, o

material geopolimérico obteve desempenho superior em todas as propriedades mecânicas analisadas, destacando-se especialmente pela maior capacidade de absorção de cargas no compósito com fibras.

Bigno (2008) *apud* Vassalo (2013) utilizou a cinza da casca de arroz e casca de ovo calcinada como fontes de Si/Al e CaO, respectivamente, para fabricação de um cimento geopolimérico. Nesse estudo, a escória granulada de alto forno e o hidróxido de potássio foram usados como ativadores. O autor concluiu que a substituição parcial da escória por cinza da casca de arroz e casca de ovo calcinada promoveu um aumento da resistência à compressão para as idades de 1 e 3 dias, destacando que a ausência da escória promoveu redução na resistência à compressão da argamassa. Mesmo assim, tal alternativa de substituição indicaram uma boa alternativa para obtenção de cimento geopolimérico de alto desempenho e baixo custo.

#### 2.6.7. Adição de superplastificantes

Em relação ao uso de aditivos superplastificantes, Boca Santa (2012) relata que são utilizados, em alguns casos, no processo de geopolimerização como retardadores de pega, pois aumentam a fluidez do material sem a adição de água. Desse modo, o efeito causado pela adição de superplastificantes nos materiais geopoliméricos é semelhante ao da adição de água, pois eles podem melhorar a trabalhabilidade, porém alguns autores acreditam que ocorra a redução da resistência mecânica (Sathonsaowaphak *et al.*, 2009). Ademais, ele complementa que o resultado ao testar a adição de superplastificante em geopolímeros ativados com hidróxido de sódio não foi positivo. Boca Santa (2012) acrescenta ainda que se o uso de superplastificantes for necessário, é importante conhecer exatamente a quantidade a ser adicionada na pasta cimentícia para não interferir de forma deletéria na reação.

Exemplificando, Torgal *et al.* (2011) investigaram a resistência de argamassas de metacaulim álcali-ativados com adições de superplastificantes no teor de 1, 2 e 3%. Os resultados com o uso de superplastificante mostraram uma redução na resistência mecânica, colaborando com as análises de Boca Santa (2009) e Sathonsaowaphak *et al.* (2009).

#### 2.6.8. Granulometria dos precursores

Em relação à granulometria dos precursores, como o metacaulim, as cinzas volantes e a escória de alto forno, para Rashad (2013), a maior finura do grão dá um ajuste mais rápido de tempo, maior resistência à compressão e homogeneidade da microestrutura. Boca Santa (2012) concorda com isso, afirmando que caso a matéria-prima tenha em sua maioria partículas menores, a área de contato aumenta para que ocorra a geopolimerização.

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

Temuujin *et al.* (2009) estudaram o efeito da ativação de cinzas volantes em condições de temperatura ambiente, ativadas com NaOH e Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Esses precursores sofreram processo de moagem por vibração mecânica, foi reduzido o tamanho e forma das partículas, mas com pouca mudança na composição mineralógica. Os resultados mostraram que o tamanho das partículas influencia no aumento da reatividade da cinza com o líquido alcalino, uma vez que, aos 28 dias, a resistência à compressão de argamassas com cinzas moídas foi 80% maior em relação às argamassas com cinzas não moídas. Vassalo (2013) atribui à redução do tamanho das partículas e à mudança em sua morfologia permitindo uma taxa de dissolução superior das partículas de cinzas principal como a principal contribuição para o aumento da resistência à compressão do geopolímero.

Ademais, Sathonsaowaphak e Chindaprasirt (2009) investigaram o desempenho de geopolímeros formulados com cinza pesada submetida a diferentes processos de moagem. Os resultados mostraram que a maior eficiência de reação geopozolânica ocorreu quando apenas 3% do material ficou retido na peneira de abertura de 45 µm, correspondendo a um diâmetro médio de partícula em torno de 15,7 µm. Nessas condições, observou-se o desenvolvimento de maiores resistências mecânicas. Porém, quando o material apresentou granulometrias médias superiores, entre 24,5 µm e 32,2 µm, a resistência à compressão foi significativamente reduzida, indicando menor grau de reatividade e conversão para a fase geopolimérica.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Visando apresentar um panorama geral sobre o concreto geopolimérico, esta pesquisa bibliográfica abrangeu fontes nacionais e internacionais, priorizando estudos com fundamentação experimental e técnica consolidada, e abordou desde os conceitos gerais dos geopolímeros até os aspectos práticos de desempenho e aplicação. Essa organização permitiu a comparação sistemática entre os dois tipos de concreto, facilitando a identificação das potencialidades dos geopolímeros para uso estrutural.

Entre os autores discutidos, destaca-se Joseph Davidovits (1982), pioneiro na formulação teórica dos geopolímeros. Seu trabalho foi essencial para a definição dos princípios da reação de geopolimerização e para a caracterização das estruturas moleculares que diferenciam os geopolímeros dos cimentos tradicionais à base de clínquer. Sua contribuição oferece uma base sólida para os estudos mais recentes que aprofundam o entendimento das propriedades desses materiais.

Duxson *et al.* (2007) também desempenham papel fundamental ao explorar os mecanismos químicos e a influência dos materiais precursores na resistência e durabilidade dos geopolímeros. Seu trabalho destacou que a combinação adequada entre a fonte de aluminossilicato e a solução ativadora permite a obtenção de produtos com desempenho superior ao concreto Portland em diversas propriedades técnicas, como resistência mecânica e resistência química.

Diversos pesquisadores destacam que a razão molar entre sílica e alumina ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) exerce papel decisivo na formação, resistência mecânica e estabilidade microestrutural dos geopolímeros. De modo geral, os estudos apontam que razões mais altas de sílica tendem a gerar produtos com maior homogeneidade e desempenho, embora existam divergências sobre os intervalos ideais. Vassalo (2013) e Aquino *et al.* (2001) sugerem que proporções entre 1,5 e 2,0 seriam mais adequadas para geopolímeros ativados com metacaulim, enquanto Duxson *et al.* (2005, 2007) e Rashad (2013) propõem intervalos maiores, de 3,0 a 5,5, argumentando que formulações mais ricas em sílica favorecem a formação de estruturas mais densas e resistentes.

Por outro lado, Boca Santa (2012) e Fletcher *et al.* (2005) *apud* Komnitsas e Zaharaki (2007) relatam que o aumento excessivo de alumina, que reduz a razão Si/Al, compromete o

ganho de resistência, reforçando a importância do equilíbrio químico. Silva *et al.* (2007) associam esse equilíbrio à evolução microestrutural, indicando que teores mais elevados de sílica promovem a formação de redes tridimensionais complexas e homogêneas, com melhor desempenho a longo prazo. Já Bernal *et al.* (2011) demonstram que, em misturas com metacaulim e escória, razões entre 3,8 e 4,0 proporcionaram maiores resistências à compressão, superiores inclusive às de geopolímeros com metacaulim isolado.

Entende-se, desse modo, que apesar da variabilidade nos resultados experimentais, há consenso entre os autores de que a razão molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  influencia fortemente a reatividade, o tempo de pega, a estrutura do gel formado e, principalmente, a resistência mecânica final dos geopolímeros. Ainda assim, ressalta-se que os intervalos ótimos variam conforme o tipo de precursor e as condições de ativação, reforçando a necessidade de estudos específicos para diferentes composições.

A razão molar entre sílica e óxido de sódio ( $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ) também é amplamente reconhecida como fator determinante no desempenho dos geopolímeros. Olívia *et al.* (2008) ressaltam que a redução dessa razão, via aumento da concentração de  $\text{Na}_2\text{O}$ , eleva o pH e acelera a reação, resultando em maiores resistências mecânicas. Duxson *et al.* (2007) propõe razões ideais entre 2,08 e 5,0, enquanto Burciaga-Diaz *et al.* (2010) identificam desempenho satisfatório para valores entre 1,0 e 1,5, especialmente em misturas com escória e metacaulim. Já Bernal *et al.* (2011) observaram que razões em torno de 2,0 proporcionam maior resistência à compressão do que proporções mais elevadas, como 2,4, as quais podem comprometer o desempenho mecânico. Por fim, Rashad (2013) reforça que essa razão influencia diretamente a proporção sólido/líquido, impactando tanto a resistência quanto a trabalhabilidade.

Sob outro aspecto, diversos estudos mostram que a resistência mecânica dos geopolímeros à base de metacaulim depende fortemente do tipo e da concentração dos ativadores alcalinos utilizados. Em geral, a combinação de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) com silicato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) resulta em materiais mais resistentes e densos, conforme apontado por Krivenko (1992), Popel (1999), Fernandez-Jimenez *et al.* (2005) e Granizo *et al.* (2007). Gharzouni *et al.* (2015) destacam que misturas com hidróxido e silicato de potássio proporcionam resistências superiores às de base sódica, enquanto que Altan e Erdogan (2012) observaram que, sob cura a temperatura ambiente, a combinação de  $\text{NaOH}$  e  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  é essencial para alcançar elevadas resistências, porém em altas temperaturas ( $80\text{ }^\circ\text{C}$ ), o silicato de sódio atua de forma mais eficaz mesmo isoladamente. Phair (2001) atribuiu melhores

resultados ao uso de íons  $K^+$  devido à sua menor esfera de hidratação, favorecendo uma matriz mais compacta.

Torgal *et al.* (2011) e Rashad (2013) mostraram que o aumento da concentração de NaOH tende a elevar a resistência à compressão e à flexão até certo limite, embora prejudique a trabalhabilidade. Resultados semelhantes foram reportados por Vargas (2006), Wang *et al.* (2005) e Pinto (2004), que observaram melhor desempenho com concentrações entre 10 e 12 mol/L, sendo o último autor destacando a importância do silicato de sódio em conjunto com o hidróxido de sódio, afirmando que melhora significativamente as resistências à compressão e flexão. Concentrações muito altas (como 18 mol/L), segundo Vassalo (2013) e Alonso e Palomo (2001), podem comprometer a resistência final. Por fim, Burciaga-Diaz *et al.* (2010) identificaram que um teor intermediário de  $Na_2O$  (10%) proporciona melhores resultados em misturas com escória.

A maioria dos autores concorda que tanto a temperatura quanto o tempo de cura influenciam diretamente a resistência e a microestrutura dos geopolímeros. Hardjito *et al.* (2006) defendem a cura em temperatura ambiente por viabilizar comparações com o cimento Portland e evitar consumo energético, enquanto Boca Santa (2012) observou que a resistência aumenta com o tempo, mesmo em temperatura ambiente. Vassalo (2013) identificou que a cura térmica acelera o ganho inicial de resistência, mas causa retrações e perda de massa, além de influenciar a cristalização do material, o que também é confirmado por Yao *et al.* (2009).

Diaz *et al.* (2012) explicam que temperaturas elevadas intensificam a dissolução do metacaulim e aceleram a condensação dos produtos de reação, favorecendo o desempenho inicial. No entanto, segundo Rovnanik (2010), curas muito quentes podem gerar poros maiores e comprometer a resistência a longo prazo. Embora autores como Palomo *et al.* (1999), Hardjito *et al.* (2006, 2007) e Thakur *et al.* (2009) indiquem temperaturas ideais entre 60 °C e 85 °C para resistências mais altas, Villa *et al.* (2010) observaram que temperaturas intermediárias, como 40 °C, oferecem melhor evolução da resistência com o tempo. Assim, entende-se que temperaturas elevadas favorecem o ganho rápido de resistência, mas o desempenho final depende do equilíbrio entre temperatura, tempo de cura e composição do geopolímero.

Também salienta-se que a adição de cálcio em geopolímeros à base de metacaulim pode afetar significativamente suas propriedades. Desse modo, Vargas *et al.* (2006) observaram redução na resistência à compressão e interferência na polimerização, respectivamente. Já

Granizo *et al.* (2002) e Yip *et al.* (2005) indicaram que, em meios de baixa alcalinidade, o cálcio pode formar fases C–S–H e géis N–A–S–H. Em ambientes altamente alcalinos, entretanto, essa formação é inibida (Rashad, 2013). Torgal *et al.* (2011) relataram piora na trabalhabilidade com mais hidróxido de cálcio, enquanto Alonso e Palomo (2001) observaram ganho na resistência à flexão com maiores teores. Buchwald *et al.* (2005) apontaram 10% de cálcio como teor ótimo para resistência à compressão.

Além disso, essa revisão bibliográfica proporcionou entender que a influência da variação no teor e na natureza dos precursores é um fator determinante no desempenho dos materiais geopoliméricos, sendo essencial para sua viabilização em escala industrial. Rosseto (2017) demonstrou que a incorporação de lodo de ETA ao metacaulim afeta significativamente as propriedades das argamassas geopoliméricas: as substituições reduziram a trabalhabilidade e resistência mecânica, enquanto adições moderadas (até 15%) resultaram em ganhos na resistência à compressão e à flexão. No aspecto físico, a adição de lodo contribuiu para a redução da absorção, porosidade e densidade aparente, indicando efeito benéfico na compactação da matriz. Outros estudos com incorporação de lodo ao concreto geopolimérico (Hoppen *et al.*, 2005; Gomes *et al.*, 2010) revelaram queda acentuada na resistência com o aumento do teor de resíduo, reforçando a necessidade de controle rigoroso da proporção utilizada.

Quanto à substituição parcial do metacaulim por cinzas volantes, diversos autores destacam melhorias no desempenho mecânico e na trabalhabilidade. Zhang *et al.* (2009) e Aguilar *et al.* (2010) evidenciaram que teores moderados (25–33%) favorecem a fluidez, prolongam o tempo de pega e aumentam a resistência à compressão. Estudos como os de Yunsheng *et al.* (2008, 2009) reforçam essa tendência, indicando que proporções equilibradas entre metacaulim e cinzas volantes não apenas melhoram as propriedades mecânicas, como também aumentam a durabilidade e a capacidade de imobilização de metais pesados. Por outro lado, Cheng e Chiu (2003) e Bernal *et al.* (2011) observaram que substituições excessivas podem reduzir o desempenho estrutural, exigindo ajustes no tipo de ativador utilizado.

A combinação entre metacaulim e escória também mostrou resultados promissores. Burciaga-Diaz *et al.* (2010) e Yunsheng *et al.* (2007) indicaram que proporções em torno de 50% de escória proporcionam as maiores resistências à compressão e à flexão, mantendo boas propriedades ambientais e mecânicas. Além disso, estudos mais aplicados, como os de Maranan *et al.* (2015) e Oliveira (2005), confirmam o potencial estrutural dos geopolímeros com

diferentes composições, inclusive em aplicações com armaduras poliméricas e fibras, superando em desempenho o cimento Portland em diversos aspectos. Por fim, Bigno (2008) demonstrou a viabilidade de utilizar resíduos como cinza da casca de arroz e casca de ovo calcinada na formulação de cimentos geopoliméricos, destacando a possibilidade de produzir materiais sustentáveis e de alto desempenho com baixo custo.

Em relação aos superplastificantes, observa-se que seu uso, embora proporcione aumento da fluidez sem adição de água, pode comprometer o desempenho mecânico do material. Autores como Boca Santa (2012) e Torgal *et al.* (2011) apontam que a adição de tais aditivos, especialmente em sistemas ativados com hidróxido de sódio, resultou em redução da resistência mecânica, reforçando a necessidade de controle rigoroso das dosagens e do entendimento do comportamento do sistema geopozolânico diante de sua adição.

No tocante à granulometria, destaca-se que a finura das partículas dos precursores tem influência direta na reatividade e, conseqüentemente, no desempenho mecânico dos geopolímeros. Pesquisas como as de Rashad (2013) e Temuujin *et al.* (2009) apontam que partículas mais finas aumentam a área de contato com o ativador alcalino, promovendo maior taxa de dissolução e formação da matriz geopolimérica, o que resulta em maior resistência à compressão. Isso é corroborado por Vassalo (2013), ao destacar que o controle granulométrico, especialmente com partículas em torno de 15  $\mu\text{m}$ , favorece o desenvolvimento de melhores propriedades mecânicas, sendo, portanto, uma variável crítica para o aprimoramento das formulações.

Além disso, autores como Fernández-Jiménez *et al.* (2006) e Duxson *et al.* (2007) destacam que a aplicação em larga escala do concreto geopolimérico ainda enfrenta importantes desafios, como a ausência de padronização técnica, a variabilidade das matérias-primas utilizadas e a necessidade de maior controle sobre parâmetros de cura e dosagem. Essas limitações dificultam a repetibilidade dos resultados e impõem barreiras à normatização e industrialização do material.

#### 4. CONCLUSÃO

A realização deste trabalho permitiu uma análise abrangente e crítica sobre o concreto geopolimérico, a partir de uma revisão bibliográfica que reuniu os principais estudos sobre suas características, vantagens, limitações e possibilidades de aplicação em comparação com o concreto de cimento Portland. Com base nos dados levantados e nos estudos analisados, foi possível identificar os principais pontos de convergência e divergência entre esses dois materiais, além de refletir sobre sua viabilidade técnica e ambiental no contexto da engenharia civil contemporânea.

A comparação entre os dois tipos de concreto evidencia que o concreto geopolimérico apresenta um desempenho técnico compatível, e, em muitos casos, superior, ao do concreto convencional. Dentre as vantagens mais relevantes do concreto geopolimérico, destacam-se a alta resistência mecânica, a durabilidade frente a agentes agressivos e, sobretudo, a significativa redução na emissão de CO<sub>2</sub> durante sua produção, o que o posiciona como uma alternativa ambientalmente mais sustentável. Além disso, o uso de resíduos industriais como matéria-prima contribui para a valorização de subprodutos e para a redução do impacto ambiental da construção civil.

Por outro lado, o concreto Portland continua sendo amplamente utilizado devido à sua consolidação no mercado, ao domínio técnico sobre sua produção e aplicação, e à existência de normativas bem estabelecidas, o que não acontece com o concreto geopolimérico, o qual ainda não tem normatização específica e proporções entre os materiais de utilização ainda não consolidadas na literatura, além da necessidade de maior controle na execução, gerando dificuldade de expansão do material para produção em escala industrial.

De maneira geral, considera-se que o desenvolvimento do trabalho foi positivo, tanto pela organização lógica e técnica das informações quanto pela clareza com que foram tratados os temas. A revisão bibliográfica possibilitou não apenas entender o atual estágio de desenvolvimento do concreto geopolimérico, mas também identificar os caminhos necessários para sua consolidação como uma alternativa viável e sustentável ao concreto tradicional.

Assim, como sugestão para trabalhos posteriores, tem-se:

- Estabelecer um método de dosagem do concreto geopolimérico, uma vez que esse

aspecto ainda tem pesquisas exploratórias quanto à melhor proporção entre os materiais;

- Elaborar uma normativa que estabeleça limites e intervalos para a produção do material, por exemplo, limitar as adições de cinzas volantes quando o precursor principal for o metacaulim e estabelecer um intervalo nas razões molares permitido de acordo com a posterior utilização do concreto, para, assim, guiar outras produções e profissionais para posterior industrialização do material.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Disponível em: <<https://encurtador.com.br/rFxdD>> . Acesso em: 28 de abril de 2025.
- ABNT, NBR 12653. **Materiais pozolânicos — Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 4, 2012.
- AGUILAR, Maria Teresa P.; GUMIERI, Adriana Guerra; VASSALO, Érica Antunes de S.; Caracterização Microestrutural do Geopolímero Obtido de Metacaulim Rico em Ferro. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. 2014. p. 598-605.
- ALONSO, Santiago; PALOMO, Angel. Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxide–metakaolin solid mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 1, p. 25-30, 2001.
- ALTAN, Ekin; ERDOĞAN, Sinan T. Alkali activation of a slag at ambient and elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 2, p. 131-139, 2012.
- ALVES, T. M. R. Potencial refratário de concretos geopoliméricos. **Undergraduate thesis, CEFET, UFMG, Belo Horizonte, MG**, 2013.
- ANDOLFATO, Rodrigo Piernas. Controle tecnológico básico do concreto. **Ilha Solteira**, 2002.
- APOLONIO, P. H. et al. Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. **Cerâmica**, v. 66, p. 172-178, 2020.
- AQUINO W., LANGE D.A., OLEK J., **The influence of metakaolin and silica fume on the chemistry of alkali–silica reaction products**. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 23, p.485-493, 2001.
- AZIMI, Emy Aizat et al. Processing and properties of geopolymers as thermal insulating materials: A review. **Rev. Adv. Mater. Sci**, v. 44, p. 273-285, 2016.
- BAKHAREV, Tanya. Resistance of geopolymer materials to acid attack. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 4, p. 658-670, 2005.
- BARBOSA, Valeria FF; MACKENZIE, Kenneth JD; THAUMATURGO, Clelio. Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. **International journal of inorganic materials**, v. 2, n. 4, p. 309-317, 2000.
- BARBOSA, Valeria FF; MACKENZIE, Kenneth JD. Synthesis and thermal behaviour of potassium sialate geopolymers. **Materials Letters**, v. 57, n. 9-10, p. 1477-1482, 2003.
- BARBOSA, R. M. **Caracterização Geoambiental da Escória de Aciaria de Cinco Estados Brasileiros**. 2013. 158p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UFOP, Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia - Nugeo., Universidade Federal de

Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

BERNAL, Susan A. et al. Activation of metakaolin/slag blends using alkaline solutions based on chemically modified silica fume and rice husk ash. **Waste and Biomass Valorization**, v. 3, p. 99-108, 2012.

BHARATH, R. R. **Rheology of geopolymer concrete**. 2014. Disponível em: <[http://www.kscst.iisc.ernet.in/spp/37\\_series/spp37s/synopsis\\_seminar/025\\_37S1026.pdf](http://www.kscst.iisc.ernet.in/spp/37_series/spp37s/synopsis_seminar/025_37S1026.pdf)> Acesso em: 26 jan. 2025.

BICHINHO, Melina Cavalcanti de Melo et al. Avaliação do desempenho ambiental, energético, termomecânico e microestrutural de estruturas de concretos sustentáveis submetidas a ambiente marinho. 2019.

BIGNO, I. C. **Geopolímeros à base de resíduos agrícolas e agroindustriais**. 2008. 208 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

BOCA SANTA, R. A. A. **Desenvolvimento de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineral e metacaulim sintetizado a partir de resíduo da indústria de papel**. 2012. 34 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2012.

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

BRITO, W. S. **Ativação Alcalina Para a Produção De Geopolímeros a Partir de Resíduo Industrial**. 2018. 20 p. 2018. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará-UFPA, Belém.

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

BURCIAGA-DÍAZ, Oswaldo et al. Statistical analysis of strength development as a function of various parameters on activated metakaolin/slag cements. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 93, n. 2, p. 541-547, 2010.

CASCAES, M.E.L. **Desenvolvimento de geopolimeros a partir do uso de metacaulim e cinza de casca de arroz**. Trabalho de conclusão de curso em curso em Engenharia de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Joinville, 2016.

CASTALDELLI, V. N. **Estudo de geopolímeros utilizando cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, SP, 2013.

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

CHENG, T.W.; CHIU, J.P. **Fire-resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag**. *Minerals Engineering*, vol.16, p.205-210, 2002.

CHINDAPRASIRT, Prinya et al. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. **Waste management**, v. 29, n. 2, p. 539-543, 2009.

DAMINELI, Bruno L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 555-562, 2010.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições minerais para concreto estrutural. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, v. 1, p. 345-379, 2005.

DAVIDOVITS, Joseph. **Mineral polymers and methods of making them**. U.S. Patent n. 4,349,386, 14 set. 1982.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer chemistry and properties**. Proceedings of 88 Geopolymer Conference, (1988).

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis and calorimetry**, v. 37, n. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, Joseph. Properties of geopolymer cements. In: **First international conference on alkaline cements and concretes**. 1994. p. 131-149.

DAVIDOVITS, Joseph. Chemistry of geopolymeric systems, terminology. In: **Geopolymer**. sn, 1999. p. 9-39.

DAVIDOVITS, Joseph. years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In: **Geopolymer 2002 conference**. Saint-Quentin, France; Melbourne, Australia: Geopolymer Institute, 2002. p. 29.

DAVIDOVITS, Joseph (Ed.). **Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions: proceedings of the world congress geopolymer 2005**. Geopolymer Institute, 2005.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer chemistry and applications. **Geopolymer Institute**, 2008.

DAVIDOVITS, J. Geopolymer: Chemistry and applications. 3. ed. St-Quentin: **Institut Géopolymere**, 2011.

DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymer cement. **A review**. **Geopolymer Institute, Technical papers**, v. 21, p. 1-11, 2013.

DAVIDOVITS, Joseph. Chimie des géopolymères. **Techniques de l'ingénieur N**, v. 3300, p. V1, 2014.

DIAZ, Oswaldo Burciaga; ESCALANTE-GARCIA, Jose Ivan; GOROKHOVSKY, Alexander. Geopolymers based on a coarse low-purity kaolin mineral: Mechanical strength as a function of the chemical composition and temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 18-24, 2012.

DUXSON, Peter et al. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.

DUXSON, Peter et al. Geopolymer technology: the current state of the art. **Journal of materials science**, v. 42, p. 2917-2933, 2007.

FARIÁS, O. O., RANGEL, J.M.M., ZAMORA, M. A. B., “**Influência da inclusão de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar sobre a compactação, CBR e resistência à compressão de um material de granulometria fina**”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 194 - 208, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.282>. 2018.

FENG, Dingwu; PROVIS, John L.; VAN DEVENTER, Jannie SJ. Thermal activation of albite for the synthesis of one-part mix geopolymers. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 95, n. 2, p. 565-572, 2012.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M.. **Microstructure Development of Alkali-Activated Fly Ash Cement: a Descriptive Model**. Cement And Concrete Research, Madrid, n. , p.1204-1209, 30 ago. 2004.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, Ana; PALOMO, A. Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. **Cement and concrete research**, v. 35, n. 10, p. 1984-1992, 2005.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. et al. Alkali activation of industrial by-products to develop new earth-friendly cements. In: **Proceedings of the 11th International Conference on Non-Conventional Materials And Technologies (NOMAT 2009)**. 2009.

GHAZOUNI, Ameni et al. Effect of the reactivity of alkaline solution and metakaolin on geopolymer formation. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 410, p. 127-134, 2015.

GOLDONI, A. G. **Resistência à flexão e compressão em geopolímero com incorporação de nanotubos de carbono**. 2014. 85 f. 2014. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GRANIZO, M. L. et al. Alkaline activation of metakaolin; influence of synthesis parameters. In: **Proceeding of the Tenth International Congress on Chemistry of Cement, Göteborg**. 1997. p. 3ii113.

GRANIZO, Maria Luz et al. Alkaline activation of metakaolin: effect of calcium hydroxide in the products of reaction. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 85, n. 1, p. 225-231, 2002.

GRANIZO, M. Luz; BLANCO-VARELA, María Teresa; MARTÍNEZ-RAMÍREZ, Sagrario. Alkali activation of metakaolins: parameters affecting mechanical, structural and microstructural properties. **Journal of materials science**, v. 42, p. 2934-2943, 2007.

HARDJITO, Djwantoro et al. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. **Materials Journal**, v. 101, n. 6, p. 467-472, 2004.

HARDJITO, Djwantoro; RANGAN, B. Vijaya. Development of Fly Ash Based Geopolymer Concrete: Progress and Research Needs. In: **2nd Asian Concrete Federation Conference, Bali, Indonesia**. 2007.

HARDJITO, Djwantoro. The use of fly ash to reduce the environmental impact of concrete. In: **Engineering Conference**. 2007.

HARTMANN, A. E. **Argamassa Geopolimérica Utilizando Pó de Alumínio como Agente Formador de Poros**. 54p. TCC (Graduação) -Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

HE, Jian. **Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications**. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2012.

HENRIQUE, P.; BORGES, R.; PACHECO, L. S. Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). n. **Cp II**, p. 153-168, 2014.

HOPPEN, Cinthya.; PORTELLA, Kleber F.; ANDREOLI, Cleverson V.; SALES, Almir.; JOUKOSKY, Alex. Estudo de Dosagem para Incorporação de Lodo de ETA em Matriz de Concreto, Como Forma de Disposição Final. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 23., 2005. Campo Grande. **Anais eletrônicos**.

INSTITUTE, Geopolymer. **Visit to Geopolymer Concrete Airport and Eco Building**. 2015. Disponível em: <<https://www.geopolymer.org/news/visit-airport-eco-building/>>. Acesso em: 04 maio 2025.

JESUS, Aedjota Matos de. Utilização de lodo de estação de tratamento de água para produção de geopolímeros. 2018.

JESUS, Aedjota Matos de et al. Geopolímero: Um novo cimento para construção civil. **Pesquisa, Inovação e Tecnologia do Estado de Rondônia**. p. 139-145. Ed. Stricto Sensu Editora. 2019

JIMÉNEZ, Ana et al. The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. **Microporous and Mesoporous materials**, v. 91, n. 1-3, p. 111-119, 2006.

JUENGER, Maria CG; SIDDIQUE, Rafat. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. **Cement and concrete research**, v. 78, p. 71-80, 2015.

KHALE, Divya; CHAUDHARY, Rubina. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **Journal of materials science**, v. 42, n. 3, p. 729-746, 2007.

KOMNITSAS, Kostas; ZAHARAKI, Dimitra. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals engineering**, v. 20, n. 14, p. 1261-1277, 2007.

KONG, Daniel LY; SANJAYAN, Jay G. Effect of elevated temperatures on geopolymer paste,

mortar and concrete. **Cement and concrete research**, v. 40, n. 2, p. 334-339, 2010.

KRIVENKO, PV. Alkalen cements. In: 9th International congress on the chemistry of cement, New Delhi, India, vol. IV; 1992. p. 482–8.

KUENZEL, C. et al. Influence of sand on the mechanical properties of metakaolin geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 442-446, 2014.

LI, Chao; SUN, Henghu; LI, Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+ Ca) and metakaolin (Si+ Al) cements. **Cement and concrete research**, v. 40, n. 9, p. 1341-1349, 2010.

LIEW, Yun-Ming et al. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, v. 83, p. 595-629, 2016.

LIMA, André Barbosa de. O processo produtivo do cimento Portland. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

LIMA, Jardel Santos; GOMES, João Lucas. Concreto sustentável aplicado à construção civil. **RECIMA21-Revista Científica Multidisciplinar-ISSN 2675-6218**, v. 3, n. 1, p. e3122376-e3122376, 2022.

LOTHENBACH, Barbara; SCRIVENER, Karen; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

MAIA, A. A. B. et al. Utilização de rejeito de caulim da Amazônia na síntese da zeólita A. **Cerâmica**, v. 53, p. 319-324, 2007.

MARANAN, G. B. et al. Evaluation of the flexural strength and serviceability of geopolymer concrete beams reinforced with glass-fibre-reinforced polymer (GFRP) bars. **Engineering Structures**, v. 101, p. 529-541, 2015.

MASUELA, Fábio Blas. **Estudo da água não evaporável na hidratação do cimento Portland com escória de alto forno por meio de análise térmica**. 2016. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado em Engenharia civil, área de construção. Universidade Estadual de Campinas.

MEHTA, P. Kumar. Rice husk ash--A unique supplementary cementing material. **Advances in concrete technology**, p. 419-443, 1994.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. Ibracon, 2008.

MELO, M. L. **Desenvolvimento de geopolímero a partir de cinza de olaria e metacaulim ativado com adição de cinza de ossos bovinos**. 53p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Instituto de Geociências e Engenharias, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2016.

MIRANDA, J. M. et al. Corrosion resistance in activated fly ash mortars. **Cement and**

**Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1210-1217, 2005.

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

MOREIRA, Cristiano Costa. Características e desempenho da escória de alto forno como agregado para utilização em camadas granulares de pavimentos. **37ª Reunião Anual de Pavimentação/11º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, 37ª RAPv/11º ENACOR, Goiânia, Brasil**, 2006.

MOTHÉ, Leonardo Paes. Avaliação das condições ideais para a produção de metacaulinita através da análise da sua atividade pozolânica. **Campos dos Goytacazes: Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil–Universidade Estadual do Norte Fluminense**, 2004.

MOURA, J. **Desenvolvimento de geopolímero a partir de cinza de olaria, refratário dolomítico post-mortem e metacaulim**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2014.

MUÑIZ-VILLARREAL, M. S. et al. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, v. 65, n. 6, p. 995-998, 2011.

NASCIMENTO, J.F. **Estudo da Expansibilidade da Escória de Aciaria para Uso em Pavimentação Rodoviária**. 2003. 177p. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2003.

NEMATOLLAHI, Behzad; SANJAYAN, Jay; SHAIKH, Faiz Uddin Ahmed. Comparative deflection hardening behavior of short fiber reinforced geopolymer composites. **Construction and building materials**, v. 70, p. 54-64, 2014.

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

NUGTEREN, Henk W. et al. High strength geopolymers from fractionated and pulverized fly ash. 2009.

OLIVEIRA, F. A. **Tenacidade à Fratura em Compósito Geopolimérico Reforçado por Fibra de Polipropileno**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia. 122 p, Rio de Janeiro, 2005.

OLIVEIRA , Gabrielli Tápia de; Renã Zavitzki SCHIMANOWSKI , Eric; Claro PEDROZO , Éder. CONCRETO GEOPOLIMÉRICO: UMA REVISÃO. **Salão do Conhecimento**, [S. l.], v. 7, n. 7, 2021. Disponível em: <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/20655>. Acesso em: 11 abril. 2025.

OLIVIA, Monita; SARKER, Prabir; NIKRAZ, Hamid. Water penetrability of low calcium fly ash geopolymer concrete. **Proc. Iccbt2008-A**, v. 46, p. 517-530, 2008.

PALOMO, Angel; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. **Cement and concrete research**, v. 29, n. 8, p. 1323-1329, 1999.

PEDROSA, R. A. A. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente**. 2010. Dissertação de Mestrado no NUGEO, Área de concentração: Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010.

PELISSER, Fernando et al. Structural analysis of composite metakaolin-based geopolymer concrete. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, p. 535-543, 2018.

PELISSER, Fernando. (2022). Concreto geopolimérico: do cimento ao uso estrutural. **CONCRETO & Construções**. XLIX. 54-59. 10.4322/1809-7197.2022.105.0005.

PEREIRA, D. S. T. **Concreto de Cimento Geopolimérico Reforçado com Fibras de Aço para Pavimentação**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Instituto Militar de Engenharia, p. 202, Rio de Janeiro, 2006.

PHAIR, J. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. **Minerals Engineering**, v. 14, n. 3, p. 289-304, 2001.

PINTO T. A., **Novos Sistemas Ligantes Obtidos por Activação Alcalina**. Construção Magazine. Tese de Doutorado da Universidade de Minho, Portugal 2004.

PINTO, Amândio Teixeira. Introdução ao estudo dos geopolímeros. **Vila Real, Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro**, 2006.

POPEL, GN. Synthesis of a mineral-like stone on alkaline aluminosilicate binders to produce the materials with the increased corrosion resistance. In: Krivenko, editor. 2nd International conference on alkaline cements and concretes, Kiev, Ukraine; 1999. p. 208–19.

PORTO, A. B. R. **Estudo do Concreto Geopolimérico a partir de Metacaulim da Região Norte com Adição de Escória de Alto-forno**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Pará, Ananindeua, 2019.

PROVIS, J. L. et al. The role of mathematical modelling and gel chemistry in advancing geopolymer technology. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 83, n. 7, p. 853-860, 2005.

RAHIER, Hubert et al. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers. **Journal of materials science**, v. 42, p. 2982-2996, 2007.

RASHAD, Alaa M.; ZEEDAN, Sayieda R. The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 7, p. 3098-3107, 2011.

RASHAD, Alaa M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition—A comprehensive overview. **Construction and building materials**, v. 41, p. 303-318, 2013.

RATTANASAK U., CHINDAPRASIR P.T., **Influence of NaOH Solution on the Synthesis of Fly Ash Geopolymer**. Minerals Engineering, Vol.22, No. 12, 2009.

REED, Mark; LOKUGE, Weena; KARUNASENA, Warna. Fibre-reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in situ applications. **Journal of materials science**, v. 49, p. 4297-4304, 2014.

ROHDE, L. **Escória de Aciaria Elétrica em Camadas Granulares de Pavimentos–Estudo Laboratorial**. 2002. 2002. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia–Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.

ROSSETTO, M. **Desenvolvimento de geopolímeros com incorporação de lodo de Estação de Tratamento de Água**. 2017. p 4. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura). Centro Tecnológico de Joinville. Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville 2017.

ROVNANÍK, Pavel. Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. **Construction and building materials**, v. 24, n. 7, p. 1176-1183, 2010.

SAGOE-CRENTSIL, K.; WENG, L. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part II. High Si/Al ratio systems. **Journal of materials science**, v. 42, p. 3007-3014, 2007.

SATHONSAOWAPHAK, Apha; CHINDAPRASIRT, Prinya; PIMRAKSA, Kedsarin. Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar. **Journal of hazardous materials**, v. 168, n. 1, p. 44-50, 2009.

SCRIVENER, Karen L.; NONAT, André. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 7, p. 651-665, 2011.

SILVA, FELIPE J. **Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada**. 2000. Tese de Doutorado. Tese D. Sc., IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, A. C. R. Comportamento do concreto geopolimérico para pavimento sob carregamento cíclico. **Instituto Militar Engenharia do Rio de Janeiro**, 2006.

SILVA, Pre; SAGOE-CRENTSIL, Kwesi; SIRIVIVATNANON, Vute. Kinetics of geopolymerization: Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 4, p. 512-518, 2007.

SILVA, J.P.P., **Mecanismo de ação do Silicato de Sódio como Depressor em Flotação**. 2011. Dissertação(Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - Universidade Federal do Pernambuco - UFP, Recife, 2011.

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

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Relatório sobre produção anual de cimento

Portland. 2023.

SUMAJOUW, D. M. J. et al. Fly ash-based geopolymer concrete: study of slender reinforced columns. **Journal of materials science**, v. 42, p. 3124-3130, 2007.

TEMPEST, Brett et al. Compressive strength and embodied energy optimization of fly ash based geopolymer cement concrete. 2009.

TEMUUIJIN, Jadambaa; VAN RIESSEN, Arie; MACKENZIE, K. J. D. Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. **Construction and Building materials**, v. 24, n. 10, p. 1906-1910, 2010.

THAKUR, Ravindra N.; GHOSH, Somnath. Effect of mix composition on compressive strength and microstructure of fly ash based geopolymer composites. **ARPJ. Eng. Appl. Sci.**, v. 4, n. 4, p. 68-74, 2009.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Ligantes obtidos por ativação alcalina. Parte 1 – durabilidade. Universidade do Minho, Unidade de Investigação C-TAC, v. 37, Guimarães, Portugal, 2011.

TORGAL, F. P.; CASTRO-GOMES, J. P.; JALALI, S. Cimento Portland Normal Versus Ligantes Geopoliméricos: Considerações Econômicas Sobre as Implicações do Mercado do Carbono no Custo dos Betões. **Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal**, 2005.

TORGAL, F. P.; GOMES, J. C.; JALALI, S., Alkali-Activated Binders: A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms and Hydration Products. Science Direct, Elsevier, **Construction and Building Materials**, 1305–1314. 2008.

UENG, Tzuu-Hsing et al. Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 204-210, 2012.

UN, C. H. et al. Predictions of long-term deflection of geopolymer concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 10-19, 2015.

VAN JAARVELD, J. G. S.; VAN DEVENTER, J. S. J.; LORENZEN, L. The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. **Minerals engineering**, v. 10, n. 7, p. 659-669, 1997.

VARGAS, A.S. **Cimento Ecológico: Um Compromisso da Indústria da Construção Civil para com as Gerações Futuras**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

VARGAS, A. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, ACF. Cimento Ecológico: um compromisso da indústria da construção civil para com as gerações futuras. 2006.

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

VILLA, Claudia et al. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural

- zeolite. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, p. 2084-2090, 2010.
- WALLAH, S. E.; RANGAN, B. Vijaya. Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties. **Curtin University of Technology**, v. 108, 2006.
- WAN, Q.; FENG, R.; SHAOXIAN, S.; DIANA, F.; CHOLICO-GONZALEZ, E.; NOEMÍ, L.O. **Combination formation in the reinforcement of metakaolin geopolymers with quartz sand**. *Cement and Concrete Composites*, v. 80 p. 115-122 mar. 2017.
- WANG, Hongling; LI, Haihong; YAN, Fengyuan. Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 268, n. 1-3, p. 1-6, 2005.
- YAO, Xiao et al. Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. **Thermochimica Acta**, v. 493, n. 1-2, p. 49-54, 2009.
- YIP, C. K. et al. The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1688-1697, 2005.
- YUNSHENG, Zhang; WEI, Sun; ZONGJIN, Li. Preparation and microstructure of K-PSDS geopolymeric binder. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 302, n. 1-3, p. 473-482, 2007.
- YUNSHENG, Zhang et al. Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 3, p. 370-383, 2008.
- YUNSHENG, Zhang; WEI, Sun; ZONGJIN, Li. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. **Applied Clay Science**, v. 47, n. 3-4, p. 271-275, 2010.
- ZHANG, Zu-hua et al. Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined kaolin-fly ash based geopolymer. **Journal of Central South University of Technology**, v. 16, n. 1, p. 49-52, 2009.
- ZHANG, Peng et al. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. **Composites Part B: Engineering**, v. 152, p. 79-95, 2018.