

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS**

MARCELLE FERNANDES DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE GEOPOLÍMEROS
PRODUZIDOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO PARA POTENCIAL
APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**RIO DE JANEIRO
2024**

MARCELLE FERNANDES DA COSTA

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE GEOPOLÍMEROS
PRODUZIDOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO PARA POTENCIAL
APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(es): Prof. Marcelo Henrique Prado da Silva,
D.C.
Prof. Ana Paula dos Santos Pereira, D.C.

Rio de Janeiro

2024

©2024

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha
Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

Costa, Marcelle Fernandes da.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA DE GEOPOLÍMEROS PRODUZIDOS COM ESCÓRIA DE ALTO FORNO PARA POTENCIAL APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL / Marcelle Fernandes da Costa. – Rio de Janeiro, 2024.

86 f.

Orientador(es): Prof. Marcelo Henrique Prado da Silva e Prof. Ana Paula dos Santos Pereira.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Ciência e Engenharia de Materiais, 2024.

1. Geopolímeros; Escória de Alto Forno; Cimento geopolimérico; Eflorescência. i. Prado da Silva, Prof. Marcelo Henrique (orient.) ii. dos Santos Pereira, Prof. Ana Paula (orient.) iii. Título

MARCELLE FERNANDES DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MECÂNICA
DE GEOPOLÍMEROS PRODUZIDOS COM ESCÓRIA
DE ALTO FORNO PARA POTENCIAL APLICAÇÃO NA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador(es): Prof. Marcelo Henrique Prado da Silva e Prof. Ana Paula dos Santos Pereira.

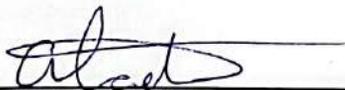
Aprovada em 22 de novembro de 2024, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Marcelo Henrique Prado da Silva - D.Sc. do IME - Presidente



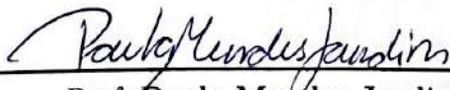
Prof. Ana Paula dos Santos Pereira - D.Sc. da Universal Engenharia



Prof. Alaelson Vieira Gomes - D.Sc. do IME



Prof. Fábio Grisólia de Ávila - D.Sc. do IME



Prof. Paula Mendes Jardim - D.Sc. da COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro

2024

Dedico este trabalho aos meus pais, meus maiores incentivadores.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me honrou e capacitou para chegar até aqui, o meu mais sincero agradecimento. À Ele minha eterna gratidão por ter me concedido sabedoria, determinação e força para perseverar nessa jornada. Ao meu alicerce, meus pais, que foram minha maior rede de apoio até aqui. Obrigada por me fazerem enxergar o meu potencial e por não permitirem que eu desistisse em meio aos obstáculos. Vocês são meu porto seguro e essa conquista também é de vocês. Obrigada por tanto! Ao meu irmão, que mesmo sem notar, sempre enche as palavras de orgulho e carinho ao falar da minha trajetória: isso é muito motivador, obrigada! Aos meus avós, que vibram com brilho nos olhos com cada conquista minha, vocês me inspiram demais. E também em memória da minha avó, meu avô e padrinho, que com certeza estão orgulhosos de onde estiverem. Ao meu amor, que também acompanhou essa trajetória desde o início, lidando com minhas impaciências e momentos de estresse ao longo do caminho: obrigada pelo companheirismo e por não me deixar abaixar a cabeça. A toda minha família, que acreditou no meu potencial e na minha conquista: vocês não têm ideia do quanto me senti amada e amparada, obrigada! Aos meus amigos que foram capazes de compreender a minha ausência em muitos momentos que precisei abdicar para concluir essa etapa da minha vida. Obrigada pelos momentos de distração que recarregaram as minhas energias para seguir firme, tornando tudo um pouco mais leve. Aos meus colegas de curso pelas horas de estudos que partilhamos juntos e pelo aprendizado compartilhado. Agradeço ao Instituto Militar de Engenharia (IME) e ao Exército Brasileiro, em especial à Seção de Ensino de Ciências e Engenharia de Materiais (SE-8), por fornecer subsídios e acesso aos laboratórios, fundamentais para minha pesquisa. Obrigada a todos os professores da instituição, à qual tive a excelente oportunidade de partilhar momentos de aprendizado e conhecimento. Ao meu orientador e coorientadora, agradeço imensamente pelo apoio prestado e por acreditarem no meu trabalho. Tudo isso foi essencial para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Agradeço também ao CEFET/RJ, por todo conhecimento e experiências adquiridas ao longo da graduação, bem como pelo incentivo dos professores, que foram fundamentais para eu avançar na minha jornada acadêmica no mestrado. Por fim, agradeço à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa, essenciais para a realização deste trabalho.

*“Consagre ao Senhor tudo o que você faz
e os seus planos serão bem-sucedidos.”
(Provérbios, 16:3)*

RESUMO

A indústria do cimento enfrenta desafios significativos para atender à demanda da construção civil, enquanto busca reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO_2). Nesse contexto, os geopolímeros, compostos à base de resíduos industriais, surgem como uma alternativa promissora ao cimento convencional, devido às suas propriedades atrativas e custo reduzido. Este estudo analisa o processo de geopolimerização e realiza a caracterização físico-química e mecânica dos geopolímeros, avaliando sua viabilidade como produto sustentável na construção civil. As amostras caracterizadas foram elaboradas com escória granulada de alto-forno, ativadas com silicato de sódio (Na_2SiO_3), em razões de sólido/líquido de 1.6, 1.8 e 2.0, e analisadas em tempos de cura de 7, 14 e 28 dias. A análise por Fluorescência de Raios X (FRX) indicou uma alta concentração de óxido de sódio (Na_2O) na escória. Esse fato, aliado ao óxido de sódio presente no ativador, contribuiu para a formação de compostos carbonatados de sódio na superfície da matriz. Tal fenômeno, conhecido como eflorescência, foi confirmado por análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS). Os grupos funcionais dos geopolímeros foram analisados por Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). A Difração de Raios X (DRX) identificou fases cristalinas típicas da escória e dos geopolímeros, evidenciando a formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), um dos principais indicadores do processo de geopolimerização. A morfologia, analisada por MEV, mostrou uma matriz mais densa e compacta aos 28 dias para a razão 2.0. Os ensaios de compressão indicaram resistência superior nas amostras com razão 2.0, mas a alta porosidade e a difícil trabalhabilidade, podem limitar sua aplicação estrutural na construção civil, sugerindo uso em argamassas de assentamento.

Palavras-chave: Geopolímeros; Escória de Alto Forno; Cimento geopolimérico; Eflorescência.

ABSTRACT

The cement industry faces significant challenges in meeting the demand of the construction sector while striving to reduce carbon dioxide (CO_2) emissions. In this context, geopolymers, composed of industrial waste, emerge as a promising alternative to conventional cement due to their attractive properties and low cost. This study analyzes the geopolymerization process and performs physical-chemical and mechanical characterization of the produced geopolymers, assessing their viability as a sustainable product in the construction industry. The characterized samples were made from granulated blast furnace slag activated with sodium silicate (Na_2SiO_3) in solid/liquid ratios of 1.6, 1.8, and 2.0, and analyzed at curing time of 7, 14, and 28 days. The X-Ray Fluorescence (XRF) analysis revealed a high concentration of sodium oxide (Na_2O) in the slag. This, combined with the sodium oxide in the activator, contributed to the formation of sodium carbonate compounds on the matrix surface. This phenomenon, known as efflorescence, was confirmed through Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) analyses. The functional groups of the geopolymers were analyzed by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The X-ray Diffraction (XRD) identified typical crystalline phases of the slag and geopolymers, highlighting the formation of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel, one of the main indicators of the geopolymerization process. The morphology analyzed by SEM showed a denser and more compact matrix at 28 days for the 2.0 ratio. Compression tests indicated higher strength in the samples with a 2.0 ratio; however, high porosity and difficult workability may limit their structural application in the construction industry, suggesting use in bedding mortars.

Keywords: Geopolymers; Blast Furnace Slag; Geopolymer cement; Efflorescence.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo acumulado de cimento	18
Figura 2 – Processo produtivo do cimento Portland	20
Figura 3 – Tipos de cimento Portland normalizados, siglas e classes	22
Figura 4 – Produtos cimentícios	23
Figura 5 – Total da produção bruta de aço	27
Figura 6 – Processo produtivo do aço	29
Figura 7 – Tipos de escória de alto forno	30
Figura 8 – Estrutura das redes de alguns geopolímeros	32
Figura 9 – Processo de Geopolimerização sintetizado na presença de sulfato de sódio	36
Figura 10 – Preparo da escória de alto forno.	45
Figura 11 – Preparo das amostras.	46
Figura 12 – Determinação da densidade aparente pelo princípio de Arquimedes. . .	48
Figura 13 – Equipamento de ensaio à compressão.	50
Figura 14 – Dimensões do corpo de prova	50
Figura 15 – Amostras nos moldes cilíndricos.	51
Figura 16 – Difratoograma da escória de alto forno.	54
Figura 17 – Espectro de FTIR da escória de alto forno.	55
Figura 18 – Micrografias (MEV) da escória de alto forno.	56
Figura 19 – EDS da escória de alto forno.	56
Figura 20 – Amostra de geopolímero GeoE1.	57
Figura 21 – Amostra de geopolímero GeoE2.	58
Figura 22 – Amostra de geopolímero GeoE3.	58
Figura 23 – Amostra de geopolímero GeoE4.	59
Figura 24 – Trabalhabilidade das amostras.	59
Figura 25 – Micrografia (MEV) dos cristais.	60
Figura 26 – Análise semiquantitativa dos cristais por EDS.	60
Figura 27 – Difratoogramas dos geopolímeros em 7, 14 e 28 dias.	63
Figura 28 – Geopolímeros com presença de microfissuras porosidade.	64
Figura 29 – Espectro de FTIR dos geopolímeros em 7, 14 e 28 dias.	66
Figura 30 – Micrografias dos geopolímeros aos 7 dias de cura.	68
Figura 31 – EDS do geopolímero (1.8 - 7 dias) com evidências da formação do gel CSH.	69
Figura 32 – Micrografias dos geopolímeros aos 14 dias de cura.	70
Figura 33 – Micrografias dos geopolímeros aos 28 dias de cura.	71
Figura 34 – Resistência à compressão dos geopolímeros.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razões molares entre óxidos na mistura de reagentes	33
Tabela 2 – Características do NaOH	44
Tabela 3 – Características do Na_2SiO_3	44
Tabela 4 – Composição química da escória de alto forno	53
Tabela 5 – Fases cristalinas do DRX da escória	53
Tabela 6 – Densidade aparente e porosidade dos geopolímeros	61
Tabela 7 – Fases cristalinas dos geopolímeros	62
Tabela 8 – Resistência à compressão dos geopolímeros	72
Tabela 9 – Módulo de Elasticidade dos Geopolímeros	74
Tabela 10 – Classes de resistência à compressão segundo a NBR 13281	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IME	Instituto Militar de Engenharia
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
CP	Cimento Portland
CP I	Cimento Portland comum (sem adição)
CP I-S	Cimento Portland comum (com adição)
CP II-E	Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno
CP II-F	Cimento Portland composto com material carbonático
CP II-Z	Cimento Portland composto com material pozolânico
CP III	Cimento Portland de alto forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V- ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CPB	Cimento Portland Branco
RS	Resistente a sulfatos
BC	Baixo calor de hidratação
PSS	Polissiloxossilato
NaPSS	Polissiloxossilato de sódio
CaO	Óxido de Cálcio
MgO	Óxido de Magnésio
CO ₂	Dióxido de carbono
Al ₂ O ₃	Alumina
SiO ₂	Sílica
K	Potássio

Na	Sódio
Ca	Cálcio
Si	Silício
Al	Alumínio
Na_2O	Óxido de sódio
K_2O	Óxido de potássio
H_2O	Água
NaOH	Hidróxido de sódio
KOH	Hidróxido de potássio
Na_2SO_4	Sulfato de sódio
OH	Hidroxila
SiO_2	Dióxido de silício
AlO_2	Óxido de alumínio
K_2SiO_3	Silicato de potássio
Na_2SiO_3	Silicato de sódio
Na_2CO_3	Carbonato de sódio
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
FeO_3	Óxido de ferro
Co	Cobalto
FRX	Espectroscopia de fluorescência de raios X
DRX	Difração de raios X
FTIR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de fourier
MEV	Microscopia eletrônica de varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

2θ - Ângulo de difração

Co-K α - Fonte de radiação

MPa - Megapascal

kV - Quilovolt

m³ - Metro cúbico

mm - Milímetro

cm - Centímetro

s - Segundo

min - Minuto

kg - Quilograma

mA - Miliampére

kN - Quilonewton

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	CIMENTO PORTLAND	18
2.1.1	TIPOS DE CIMENTO PORTLAND	20
2.2	PROPRIEDADES DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND	23
2.3	IMPACTO DA PRODUÇÃO DO CIMENTO NO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	25
2.4	PRODUÇÃO DO AÇO	27
2.4.1	ESCÓRIA DE ALTO FORNO	29
2.5	GEOPOLÍMEROS	31
2.5.1	ATIVADORES ALCALINOS	33
2.5.2	PROCESSO DE GEOPOLIMERIZAÇÃO	35
2.5.3	PROCEDIMENTO DE CURA	37
2.5.4	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS GEOPOLIMÉRICOS	37
2.5.5	EFLORESCÊNCIA EM GEOPOLÍMEROS	40
2.5.6	APLICAÇÃO DO GEOPOLÍMERO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: CIMENTO GEOPOLIMÉRICO	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	MATERIAIS	43
3.1.1	ESCÓRIA DE ALTO FORNO	43
3.1.2	ATIVADORES ALCALINOS	43
3.1.2.1	HIDRÓXIDO DE SÓDIO	43
3.1.2.2	SILICATO DE SÓDIO	44
3.2	MÉTODOS	44
3.2.1	PROCESSAMENTO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO	44
3.2.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	45
3.2.3	DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E DENSIDADE APARENTE DA ESCÓRIA E DOS GEOPOLÍMEROS	46
3.2.4	TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO	48
3.2.4.1	ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	48
3.2.4.2	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	48

3.2.4.3	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	49
3.2.4.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	49
3.2.5	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	49
3.2.5.1	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ESCÓRIA DE ALTO FORNO	52
4.1.1	DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E DENSIDADE APARENTE	52
4.1.2	ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	52
4.1.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	53
4.1.4	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	54
4.1.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	55
4.2	CARACTERIZAÇÃO DAS PASTAS GEOPOLIMÉRICAS	56
4.2.1	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS GEOPOLÍMEROS	57
4.2.1.1	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DOS CRISTAIS	59
4.2.2	DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE E DENSIDADE APARENTE DOS GEOPOLÍMEROS	61
4.2.3	DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)	62
4.2.4	ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	65
4.2.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	67
4.2.6	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	71
4.2.6.1	MÓDULO DE ELASTICIDADE	73
4.3	VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO GEOPOLÍMERO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	74
5	CONCLUSÕES	76
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento econômico e social tem impulsionado avanços cada vez mais significativos na indústria da construção civil e no mercado de obras em geral. Conseqüentemente, a demanda de produção do cimento Portland cresceu consideravelmente, tornando o cimento um dos materiais mais consumidos no mundo atualmente (1, 2), com estimativa de crescimento de 10% ao ano até 2060 (3). No entanto, a produção desse material gera efeitos negativos para o meio ambiente, especialmente no que se refere à emissão de gases poluentes como o dióxido de carbono (CO_2).

Em 2020, o cimento Portland representou aproximadamente 50% do consumo mundial de materiais, 40% da demanda energética e 50% da geração de resíduos (2, 4). Sua produção consome uma quantidade elevada de recursos naturais provenientes da extração de minérios, além da emissão de quantidades elevadas de CO_2 derivado dos fornos da etapa de clínquerização, que requerem temperaturas muito altas, em torno de 1450°C (5). Segundo Davidovits (6), a síntese de 1 tonelada de clínquer gera 0,95 toneladas de dióxido de carbono.

Esses efeitos negativos somados à crescente busca por sustentabilidade, têm impulsionado o desenvolvimento de pesquisas e tecnologias sustentáveis que visam mitigar os impactos adversos da produção do cimento convencional. Nesse cenário, surgem investigações que analisam a viabilidade da incorporação de resíduos na produção de compósitos cimentícios, buscando soluções viáveis e atrativas técnica e financeiramente, no intuito de reduzir custos e o impacto ambiental.

Neste cenário, o geopolímero passa a ser estudado por Davidovits, na década de 1970, como uma alternativa promissora e sustentável para aplicação na construção civil, como aglomerante alternativo ao cimento Portland (7, 8). Esse material é proveniente da ativação alcalina de precursores aluminossilicatos que podem ser resíduos agrícolas ou industriais. A escória granulada de alto forno, um resíduo da produção do aço, pode ser utilizada como precursor na síntese de geopolímeros, sendo ativada por hidróxido e silicato de sódio (3). Esse resíduo é considerado uma ótima fonte de cálcio na matriz geopolimérica, o que torna a estrutura do produto final mais compacta, resistente, com melhor trabalhabilidade e menos porosa (9, 10).

Contudo, a aplicação de geopolímeros não é isenta de desafios. Um dos problemas frequentemente observados é a eflorescência, que pode ocorrer devido à migração de sais solúveis para a superfície do material (11). Esse fenômeno é comum tanto em concretos convencionais quanto em geopolímeros, resultando na formação de depósitos brancos que podem afetar a estética e a durabilidade das estruturas. Para mitigar esse efeito, é essencial

o ajuste da proporção de ativadores utilizados na formulação, garantindo um melhor controle das propriedades finais do geopolímero.

Apesar disso, concretos desenvolvidos com geopolímeros podem apresentar resistências ainda maiores que as apresentadas por concretos produzidos por cimento Portland. Além de excelentes propriedades mecânicas, também são resistentes ao fogo, à ambientes agressivos e apresentam baixa retração (8, 12). Essas características, aliadas ao potencial sustentável de sua aplicação, destacam os geopolímeros como materiais promissores para a construção civil e incentivam a pesquisa contínua sobre sua viabilidade prática.

Nesse contexto, a análise das propriedades físico-químicas e mecânicas dos materiais geopoliméricos torna-se essencial para compreender a relação entre sua estrutura e desempenho. Este trabalho se justifica pela necessidade de investigar não apenas as vantagens em termos de custo e desempenho que os geopolímeros podem oferecer, mas também os desafios, como a eflorescência, que pode limitar sua aplicação. Dessa forma, a pesquisa busca contribuir para a redução do impacto ambiental, promovendo avanços na construção sustentável e desenvolvendo soluções inovadoras e ecológicas para a construção civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um geopolímero utilizando escória de alto forno e avaliar suas propriedades físico-químicas e mecânicas visando sua aplicação na construção civil como possível substituto do cimento Portland (CP II E).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a composição química da escória por Fluorescência de Raios-X (FRX), suas fases cristalinas por Difração de Raios X (DRX), grupos funcionais por Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) e a sua morfologia microestrutural por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV);
- Estudar o comportamento mecânico dos geopolímeros de escória de alto forno produzidos com silicato de sódio em diferentes proporções sólido/líquido (s/l) (1.6, 1.8, 2.0) para três tempos de cura (7, 14 e 28 dias);
- Avaliar a morfologia da fratura dos geopolímeros e correlacionar as fases cristalinas e grupos funcionais com as diferentes proporções s/l para os tempos de cura distintos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cimento Portland

O cimento Portland é o material da construção civil mais utilizado no mundo, sendo empregado na composição de argamassas e concretos. Confere boa trabalhabilidade quando em estado fresco e elevada resistência mecânica quando em estado endurecido. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC), as vendas de cimento no Brasil apresentaram um crescimento acumulado de 2% nos primeiros sete meses de 2024. Em julho de 2024, foram comercializadas 5,9 milhões de toneladas, um aumento de 6,6% em comparação ao mesmo mês do ano anterior. Comparando os valores acumulados de produção de cimento de 2023 e 2024 apresentados no gráfico do SNIC (2024) (Figura 1), podemos observar uma tendência de crescimento na produção de cimento no Brasil. Esse aumento pode ser atribuído à expansão do setor da construção civil e à crescente demanda por materiais de construção no país (13).

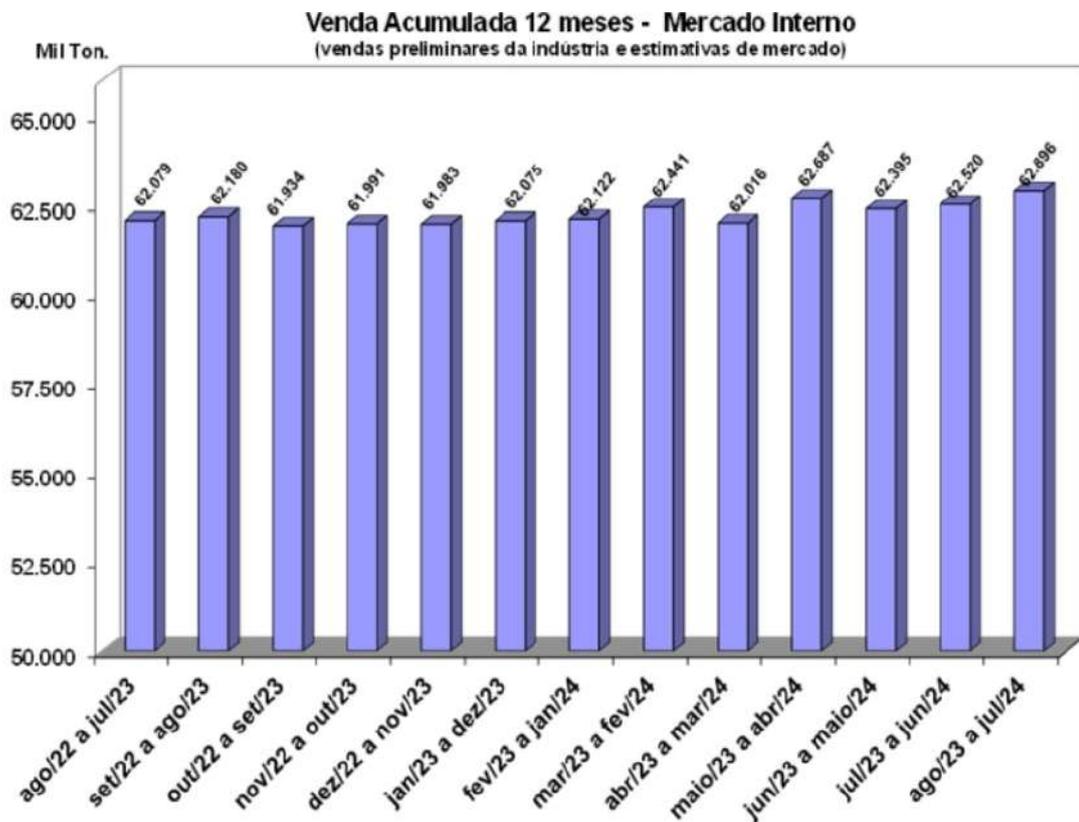


Figura 1 – Consumo acumulado de cimento (13).

O cimento é um material pulverulento constituído por silicatos e aluminatos de cálcio anidros que, ao serem hidratados, se transformam em uma pasta com características

aglomerantes. Por meio de reações exotérmicas, essa pasta libera calor e dá origem a uma massa rígida, garantindo sua resistência mecânica. O cimento possui como principais ingredientes o calcário (que fornece óxidos de cálcio) e a argila (que fornece sílica, alumina e óxido de ferro) (14). Conforme descrito na norma ABNT NBR 16697 (15), o cimento Portland também pode ser definido como: “Ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos nesta Norma”.

Os principais componentes do cimento, cuja determinação pode ser feita a partir de análises químicas são: cal (CaO), sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3). A cal é a componente essencial dos cimentos, presente em cerca de 60 a 67% da sua composição, sendo responsável por conferir o aumento das propriedades mecânicas do cimento. A sílica, constituinte básico de muitas rochas naturais, tais como arenitos, quartzitos, areias e argilas, está presente no cimento com uma proporção variando de 17 a 25%. Ela reage com a cal formando silicatos de cálcio que, ao passar por hidratação, conferem o efeito aglomerante ao cimento. A alumina, também proveniente da argila, tem seu teor variando de 3 a 8% no cimento. Ela reage com a cal e forma aluminatos de cálcio que, ao passarem por hidratação, formam coloides rígidos responsáveis por acelerarem a pega do aglomerante. No entanto, reduzem a resistência aos sulfetos e, por conta disso, devem estar presentes em pequenas quantidades na composição do cimento. O óxido de ferro, combinado com outros óxidos, aparece na composição do cimento em quantidades bem baixas, cerca de 0,5 a 6% apenas, desempenhando um papel de fundente com ação mais enérgica do que a alumina (16).

O processo produtivo do cimento Portland inicia-se com a extração da matéria prima. O calcário, um dos principais ingredientes do cimento, é misturado e moído com argila e pequenas quantidades de óxidos de ferro e alumínio, gerando um pó fino. Em seguida, esse material é introduzido em um forno rotativo e aquecido entre temperaturas de 1400 a 1600 °C, a fim de desidratar a argila e decompor o calcário para que ocorra a formação de cal. A cal reage com os silicatos desidratados e forma o clínquer, que é subitamente resfriado ao ar e posteriormente moído. Em seguida, é misturado com gesso e outras adições (como calcário, pozolana ou escória) dando origem aos diversos tipos de cimento que são, por fim, ensacados para serem comercializados (Figura 2).

O clínquer contém quatro fases principais: silicato de tricálcio (C_3S), silicato de dicálcio (C_2S), aluminato de tricálcio (C_3A) e solução sólida de ferrita ($C_2(A,F)$). Na terminologia da química do cimento, C é CaO , S é SiO_2 , A é Al_2O_3 e F é Fe_2O_3 . Durante a hidratação do clínquer, os principais produtos formados no cimento Portland incluem: uma fase amorfa a semi-cristalina, conhecida como silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que se origina da hidratação dos compostos C_3S e C_2S e é responsável por conferir

a resistência à pasta; e o hidróxido de cálcio (também chamado de Portlandita), que não possui características cimentícias. Esse processo produtivo exige um alto consumo energético, seja por energia térmica, através de combustíveis para aquecer os fornos para a produção do clínquer, seja por energia elétrica, consumida em todo o processo para movimentar as máquinas (17, 18).

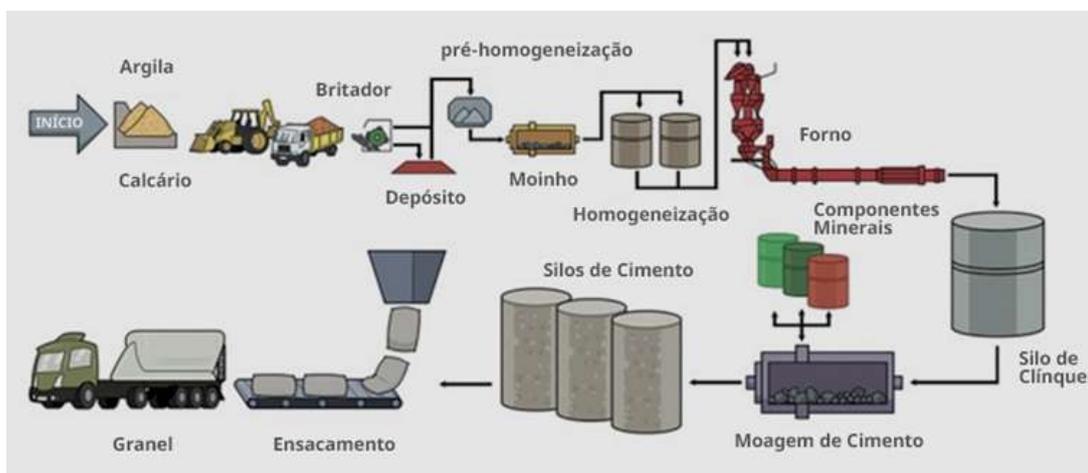


Figura 2 – Processo produtivo do cimento Portland (19).

2.1.1 Tipos de Cimento Portland

Os cimentos são caracterizados em diversos tipos que correspondem a adições e propriedades específicas de cada um. O tipo de cimento a ser utilizado é selecionado de acordo com as características que cada cimento apresenta, ou seja, as diferentes composições químicas de cada um possibilitam o desenvolvimento de propriedades específicas, tais como: maior trabalhabilidade, durabilidade, resistência, dentre outras (20). Atualmente, o cimento Portland é dividido em diversos tipos, conforme descrito na norma ABNT NBR 16697 (Figura 3) (15):

- CP I – Cimento Portland comum (sem adição):

O CP I é um tipo de cimento sem adição, com exceção do gesso, que é utilizado como retardador de pega. Costuma ser utilizado em obras em que não há exposição a ambientes agressivos, como por exemplo a presença de sulfatos do solo ou de águas subterrâneas.

- CP I-S – Cimento Portland comum (com adição):

O CP I-S tem as características semelhantes do CP – I, porém, apresenta menor permeabilidade devido a sua adição de, no máximo, 5% de material pozolânico em massa.

- CP II-E – Cimento Portland composto com escória granulada de alto forno:
É um dos tipos de cimento mais utilizados em obras convencionais. É aplicado em estruturas que apresentam necessidade de liberação de calor moderadamente lento, para que não ocorra fissuras por retração ou estruturas que possam ser atacadas por sulfatos. O CP II-E é constituído por 66% à 94% de clínquer e gesso e 6% à 34% de escória granulada de alto forno.
- CP II-F – Cimento Portland composto com material carbonático:
É utilizado para diversas aplicações tais como: preparo de argamassas de assentamento, de revestimento, estruturas de concreto armado, pisos, pavimentos de concreto, dentre outros. É constituído por 90% à 94% de clínquer e gesso e de 6% a 10% de material carbonático ou filler (material obtido pela moagem fina de calcário, materiais carbonáticos, etc).
- CP II-Z – Cimento Portland composto com material pozolânico:
É um tipo de cimento geralmente utilizado em obras marítimas, industriais e subterrâneas, principalmente pela sua composição de 6% a 14% de pozolana, material responsável por garantir uma maior impermeabilidade e durabilidade ao concreto.
- CP III – Cimento Portland de alto forno:
É um cimento muito utilizado para execução de obras de grande porte e que sofrem agressividades, tais como: barragens, esgoto, pavimentação de estradas, dentre outras obras de arte especiais. No entanto, também costuma-se fazer uso deste cimento na aplicação de argamassas de assentamento e revestimento, em estruturas de concreto armado, protendido, projetado, dentre outros. Ele apresenta características de maior impermeabilidade e durabilidade, resistência a sulfatos e à expansão, além de baixo calor de hidratação. Tais características são obtidas pela presença da escória em sua composição, presente na faixa de 35% a 70%.
- CP IV – Cimento Portland pozolânico:
Este cimento apresenta em sua composição 15% a 50% de material pozolânico. Apresenta baixo calor de hidratação e, portanto, tem uma grande aplicação em obras que requeiram grandes volumes de concreto. Além disso, também apresenta baixa porosidade, o que faz com que seja muito utilizado em obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos.
- CP V – Cimento Portland de alta resistência inicial:
O CP V – ARI, como também é chamado, é um dos tipos de cimentos que não contém adições em sua composição, ainda que em alguns casos bem específicos possa conter até 5% de material carbonático. As alterações nas dosagens de calcário e argila na

produção do clínquer garante a este cimento uma alta resistência inicial do concreto, podendo atingir, já no primeiro dia de aplicação, resistências de, aproximadamente, 26 MPa. Por conta disso é muito utilizado em obras que necessitam de uma resistência elevada inicial para uma rápida desforma dos elementos de concreto, sendo de pequeno ou grande porte.

- CPB – Cimento Portland Branco (estrutural ou não estrutural):

Este tipo de cimento é constituído de clínquer Portland branco, devido às matérias-primas com baixo teor de manganês e ferro, bem como a substituição da argila por caulim. As adições deste tipo de cimento (sulfato de cálcio ou outras) não altearam sua coloração além dos limites estabelecidos em norma. O cimento branco estrutural apresenta as mesmas características dos outros tipos de cimento, porém, com a pigmentação branca. Já o cimento branco não estrutural é indicado para rejuntamento de cerâmica.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo		
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40 ^c	RS ^a ou BC ^b –		
	Com adição	CP I-S				
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II-E				
	Com material carbonático	CP II-F				
	Com material pozolânico	CP II-Z				
Cimento Portland de alto-forno		CP III				
Cimento Portland pozolânico		CP IV				
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V			ARI ^d	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB			25, 32 ou 40 ^c	
	Não estrutural	CPB			–	–

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^c As classes 25, 32 e 40 representam os valores mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de idade, em megapascals (MPa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 MPa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Figura 3 – Tipos de cimento Portland normalizados, siglas e classes (15).

Além da designação normalizada e das siglas utilizadas para cada tipo de cimento, a norma também prevê que a sigla seja acompanhada da classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI) que é empregada para cada tipo de cimento, acrescida dos sufixos RS (resistente a sulfatos) e BC (baixo calor de hidratação), quando aplicáveis (15).

2.2 Propriedades do concreto de cimento Portland

O cimento Portland, ao ser misturado com água, forma uma pasta cuja fluidez varia conforme a quantidade de água adicionada. Esta pasta pode envolver os agregados de diferentes tamanhos, produzindo um material que, inicialmente, é moldável em diversas formas e, com o tempo, endurece devido à reação química com a água. Quando a pasta é misturada com agregados miúdos, como a areia, dá origem a uma argamassa. Quando além da areia são adicionados agregados graúdos, como a brita, forma-se o concreto, um material estruturalmente resistente e adequado para diferentes condições ambientais (Figura 4) (21).



Figura 4 – Produtos cimentícios (3).

A composição do concreto de Cimento Portland inclui cimento, água e agregados, podendo também incorporar aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais. A proporção dos componentes é responsável por garantir as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto, além de atender às exigências de trabalhabilidade necessárias para seu manuseio, transporte e aplicação (21). A relação água/cimento é um dos fatores determinantes para garantir a trabalhabilidade da pasta de cimento. Pastas com relação água/cimento menores, apresentam propriedades mecânicas superiores comparadas às de relações maiores (22).

À medida que o grau de hidratação do cimento aumenta, o volume das fases que favorecem o desempenho mecânico da pasta, cresce, enquanto o volume das fases que comprometem sua resistência, diminui. No entanto, mesmo quando o cimento está completamente hidratado, pastas que utilizam mais água do que a necessária para a hidratação total, terão uma quantidade significativa de poros preenchidos com água. Esses poros, somados aos poros formados pela contração do gel hidratado e ao volume inicial de

ar aprisionado ou incorporado na mistura, podem constituir mais de 21% de fases não resistentes, resultando em uma estrutura com propriedades mecânicas reduzidas. Portanto, a melhoria das características mecânicas da pasta e a redução de sua porosidade estão diretamente relacionadas à redução da relação água/cimento (22).

Os concretos de cimento Portland seguem proporções pré-determinadas, comumente chamadas de “traço” na construção civil, podendo ser expresso em massa ou volume, sendo preferível a proporção expressa em massa seca. O traço tem como objetivo garantir a repetibilidade do concreto, assegurando que as propriedades atendam aos requisitos necessários, com uma mistura que ofereça consistência e qualidade ao longo do tempo. No entanto, ainda não há um consenso no Brasil normatizado a respeito dos procedimentos e parâmetros de dosagem, o que tem levado vários pesquisadores a proporem seus próprios métodos de dosagem que, apesar de diferirem entre si, apresentam certos parâmetros em comum, como por exemplo, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento (21).

As principais propriedades do concreto, tanto em seu estado fresco quanto endurecido, podem ser descritas a seguir:

- Resistência à compressão:

A resistência mecânica, uma importante propriedade do estado endurecido do concreto, é considerada como o parâmetro principal de dosagem e controle de qualidade dos concretos de obras correntes. Isso se deve à relativa simplicidade de moldagem dos corpos de prova e da realização dos ensaios de resistência à compressão, bem como pelo fato de a resistência à compressão ser um parâmetro sensível às alterações da mistura (21). Além disso, a resistência à compressão é uma das características mais importantes especificadas nos projetos estruturais das obras de concreto armado e protendido.

- Trabalhabilidade:

A trabalhabilidade é uma das propriedades mais importantes do concreto fresco e tem relação direta com a quantidade de água na argamassa e na relação com o cimento. Os concretos devem ser coesos e viscosos, sendo possível realizar seu transporte até sua posição final, sem que apresente segregação, exsudações e consistências muito baixas. A trabalhabilidade depende de fatores intrínsecos e extrínsecos ao material. No Brasil, em relação a fatores intrínsecos, é adotado a consistência do concreto fresco como parâmetro principal (21). Tal parâmetro pode ser obtido a partir da retirada de uma amostra e da realização do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme previsto na norma NBR NM 67 (23).

- Durabilidade:

A durabilidade, segundo a NBR 6118 (2014) consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto (24). Ela está associada aos mecanismos de transporte ou de penetração de agentes agressivos em materiais porosos tais como capilaridade, difusibilidade, difusão iônica e permeabilidade. A durabilidade depende tanto de fatores intrínsecos (como do tipo de cimento, adições, relação água-cimento), como de fatores extrínsecos ao concreto (como ambientes agressivos, chuvas ácidas, umidade relativa). Do ponto de vista normativo de projetos estruturais, a durabilidade pode ser garantida por meio da espessura mínima de cobrimento de concreto à armadura, resistência mínima à compressão, relação água/cimento máxima e consumo mínimo de cimento (21).

- Deformabilidade:

A deformabilidade é outra característica importante a ser considerada no estudo de dosagem do concreto, por meio das especificações das propriedades de módulo de elasticidade, retração hidráulica, deformação inicial ou imediata. Atualmente, outro requisito importante que vem sendo inserido no estudo de dosagem do concreto é a sustentabilidade. Em muitas estruturas é possível reduzir o consumo de concreto através do aumento da resistência mecânica, por exemplo (21).

2.3 Impacto da produção do cimento no desenvolvimento sustentável

A expansão do progresso econômico, especialmente em economias emergentes, é refletida pelos avanços na indústria da construção civil e no mercado de obras em geral. O crescimento urbano e populacional, bem como a valorização de áreas centrais e a migração para esses locais, impulsionam a necessidade de projetos de infraestrutura e habitação. Neste cenário, há uma intensificação da demanda por materiais cimentícios, como concreto e argamassa (25). Em 2016, países emergentes como China, Índia, Rússia, África do Sul e Brasil foram responsáveis por 81% da produção global de cimento, enquanto os países desenvolvidos, focados em manter suas infraestruturas, representaram apenas 19% (26). As projeções indicam que a produção de cimento pode aumentar de 12 a 23% até 2050, contribuindo com cerca de 11 a 15% das emissões globais de CO_2 em 25 anos (27).

O mercado da construção civil cresce consideravelmente todos os anos e, com isso, o consumo de cimento também aumenta. O concreto de cimento Portland é o material

mais utilizado na construção civil, devido à disponibilidade de matérias primas em todo o mundo e à facilidade de fabricação e preparação (28). A indústria de cimento, por sua vez, enfrenta desafios significativos, incluindo a alta demanda energética e o uso de recursos naturais não renováveis, além de ser responsável por uma parte considerável das emissões industriais de dióxido de carbono (CO_2) (25). Aproximadamente 8% das emissões globais de CO_2 são provenientes do processo produtivo do cimento, que equivale a cerca de 90% das emissões totais da construção civil. Essas elevadas emissões de CO_2 à atmosfera está relacionada, principalmente, à produção de clínquer, o componente principal que confere propriedades mecânicas aos materiais cimentícios (29, 30).

Para enfrentar esses desafios e cumprir as diretrizes estabelecidas na Conferência do Clima de Paris de 2015 sobre Produção Sustentável de Componentes de Concreto, o Programa Ambiental das Nações Unidas para Construção Sustentável e Iniciativa Climática (UNEP-SBCI) formou um grupo técnico dedicado a explorar práticas e tecnologias que reduzam as emissões de CO_2 e melhorem a eficiência dos materiais e sistemas de construção (31). O objetivo é reduzir a emissão de poluentes gerados pela produção de cimento, estimado em cerca de 840 kg de CO_2 por tonelada de clínquer produzido (31), bem como promover o uso de materiais alternativos e resíduos industriais que possam substituir total ou parcialmente os componentes tradicionais do cimento, sem comprometer sua eficácia e a viabilidade econômica (25).

Com a crescente preocupação em relação às questões ambientais, as tecnologias sustentáveis têm conquistado um espaço cada vez maior no mercado mundial. As indústrias e centros de pesquisas, apesar da evolução, ainda enfrentam um grande desafio com relação à produção de materiais alternativos com propriedades físicas, químicas ou mecânicas iguais ou superiores aos produtos originais, porém, com menor impacto ambiental. A preocupação com um maior controle na emissão de gases poluentes, com a redução do consumo energético na confecção dos produtos e com o uso de matérias primas renováveis, são quesitos importantes e desafiadores para as indústrias que visam colaborar com a sustentabilidade (32). Nesse cenário, há algumas décadas surgiu o geopolímero, um material ecológico e promissor pelas suas excelentes propriedades, especialmente para aplicações na construção civil (32, 12, 29).

Neste cenário, o cimento geopolimérico apresenta-se como uma fonte alternativa, sustentável e promissora frente ao cimento Portland. Sua produção reduz em cerca de 80% as emissões de CO_2 , devido ao seu processo produtivo que não requer os mesmos procedimentos. Para a produção do cimento geopolimérico não se faz necessário o processo de calcinação de carbonato de cálcio nem o emprego de altas temperaturas. Eles são obtidos por meio de materiais aluminossilicatos que ocorrem em abundância na crosta terrestre ou derivam de resíduos industriais (escórias, cinzas, metacaulim) ou agrícolas (casca de arroz, bagaço da cana de açúcar), caracterizando-se como uma alternativa de

baixo custo. Seu processo produtivo consome bem menos energia do que o do cimento Portland, na qual as matérias primas devem ser aquecidas até cerca de 1600 °C por 8 horas, emitindo CO_2 . Além disso, os cimentos geopoliméricos têm se destacado por suas excelentes propriedades mecânicas, sendo possível alcançar, em poucas horas, resistência à compressão até 10 vezes superior ao cimento convencional. Apresentam também boas propriedades de resistência química, que expandem seu campo de aplicação e, portanto, o tornam um material bem atrativo com relação ao seu custo-benefício (12).

2.4 Produção do aço

O aço, uma das ligas metálicas mais importantes no desenvolvimento econômico dos países, é constituído por ferro e menos de 2% de carbono, além de pequenas quantidades de elementos como silício, manganês, fósforo, enxofre, dentre outros, que não ultrapassam 1% no total deles (33). Nos últimos anos, houve um aumento significativo na demanda e oferta global de aço, impulsionado pelo processo de modernização (34). De acordo com dados da Associação Mundial do Aço (WSA), a produção global de aço bruto atingiu 1,892 bilhões de toneladas em 2023. A China foi responsável por 53,9% dessa produção, enquanto o Brasil representou 1,7% do total (Figura 5) (35).

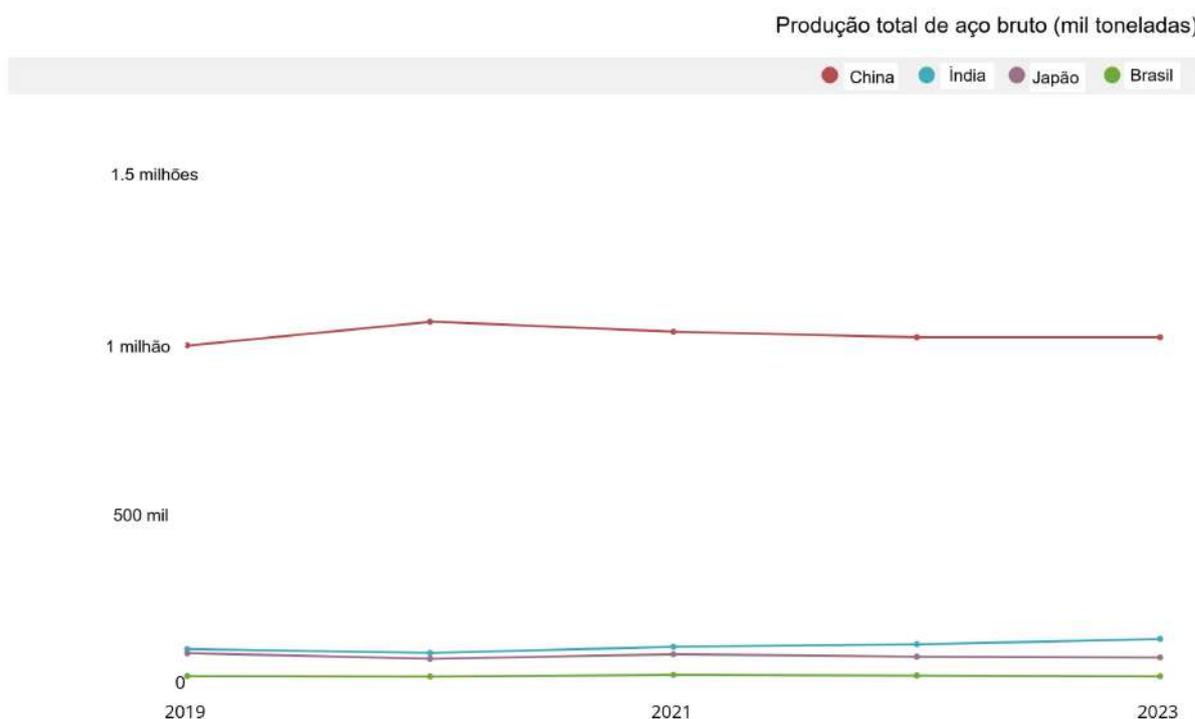


Figura 5 – Total da produção bruta de aço (2019-2023). Adaptado de (35).

Os dois principais métodos utilizados na produção de aço são o processo do forno

a oxigênio básico (BOF) e o processo do forno elétrico a arco (EAF) (33, 34). O maior percentual de produção de aço no mundo provém do BOF, especialmente no Brasil. A produção de aço compreende um processo de fabricação marcado por cinco etapas principais: preparação da carga, redução, refino, lingotamento e laminação (33).

As usinas produtoras de aço são classificadas de acordo com seus processos produtivos em (33):

- Integradas: usinas que operam nas três fases principais (redução, refino e laminação);
- Semi-integradas: usinas menores que operam apenas em duas fases (refino e laminação).

O processo de fabricação do aço em usinas integradas constitui-se basicamente da transformação do minério de ferro, encontrado na natureza sob a forma de óxido de ferro, em ferro gusa e, posteriormente, em produtos semi-acabados ou acabados (laminados). O ferro gusa, conforme denominado quando em seu estado líquido, é o produto formado na fase de redução. Nesta fase, são utilizados alguns equipamentos específicos tais como a coqueria, responsável por transformar o carvão mineral em coque e o alto forno, responsável pela produção do ferro gusa. Após a redução, inicia-se a segunda etapa, o refino, em que o ferro gusa é transferido para a aciaria e transformado em aço, mediante eliminação de impurezas. Por fim, ocorre a terceira fase, denominada laminação, em que o aço, durante a solidificação, passa por processos mecânicos de deformação, afim de ser transformado em produtos siderúrgicos como vergalhões, arames, bobinas, chapas, etc (33).

O processo produtivo em usinas semi-integradas utiliza sucata ferrosa e ferro gusa como insumos básicos, sem a utilização de alto forno nas suas etapas. A redução da carga metálica ocorre em fornos elétricos. Após a fabricação, o processo de laminação segue de forma semelhante ao das usinas integradas. Essas usinas operam em escala reduzida e são conhecidas como "mini-usinas" devido à sua produção compacta. Ao final das etapas de fundição e refino, geram-se resíduos siderúrgicos, como escória de aciaria e escória de alto forno, decorrentes das melhorias na qualidade do aço (Figura 6) (33, 36).

A escória, gerada como subproduto desse processo, varia de 130 kg a 200 kg para cada tonelada de aço bruto produzido (37, 34). A quantidade e o tipo de escória dependem do processo de fabricação utilizado. O acúmulo desse material pode causar problemas ambientais, como lixiviação de metais pesados, poluição atmosférica e ocupação de áreas. Países mais desenvolvidos, como o Japão, contam com tecnologias avançadas para reaproveitamento da escória, alcançando taxas de utilização de quase 100%. Em contrapartida, muitos países em desenvolvimento apresentam taxas de reutilização mais baixas, entre 20% e 30% (34). Com isso, a busca por novas formas de utilização da escória, que possam trazer benefícios, tornou-se um tema relevante de pesquisa.

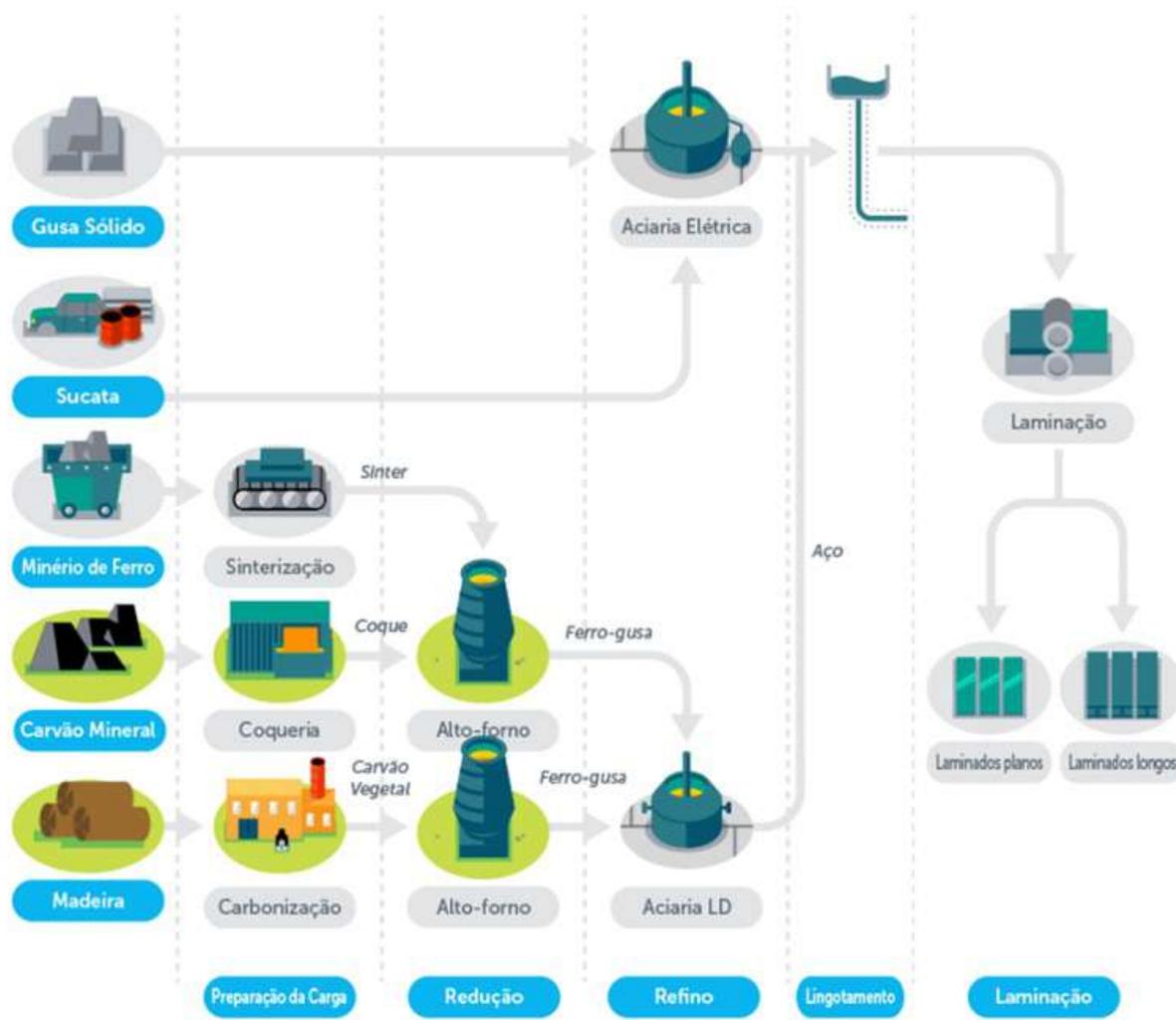


Figura 6 – Processo produtivo do aço (38).

2.4.1 Escória de alto forno

Os processos siderúrgicos de fabricação do aço geram grandes quantidades de resíduos, resultantes da eliminação de impurezas (39). A escória de alto forno é um produto não metálico, constituído basicamente de silicatos e aluminossilicatos de cálcio, provenientes da etapa de fundição do minério de ferro e calcário (36). A escória pode ser de alto forno (resultante do processo de fusão de minérios de ferro no alto forno) ou de aciaria (proveniente do processo de refino do aço) (39). O alto forno é aquecido a elevadas temperaturas e preenchido pelo topo com uma carga metálica, constituída de minério de ferro e sucata, junto ao coque, combustível utilizado, resultante da queima do carvão vegetal em coquerias. Adicionalmente, é injetada uma corrente de oxigênio pela parte inferior do alto forno, ocorrendo uma reação exotérmica quando em contato com o coque. Como produto dessa reação, ocorre a formação de um gás redutor, o monóxido de carbono, responsável pela redução e fusão da carga metálica. Por fim, obtém-se o ferro

gusa, direcionado para a aciaria, e a escória de alto forno, coproduto direcionado para um processo de resfriamento, onde é gerado diferentes tipos de escória (40, 36, 3).

A escória apresenta diferentes processos de resfriamento os quais conferem suas classificações em: escória granulada, escória refrigerada a ar e escória peletizada ou expandida (Figura 7) (36, 3, 41).

- Escória granulada: é formada após um rápido processo de resfriamento, por meio de jatos de água sob alta pressão, impedindo a formação de uma estrutura cristalina. Possui um aspecto semelhante à areia natural, com diâmetro máximo de 5 mm. Pode ser utilizada na produção de cimentos tais como o CP III (Cimento Portland de Alto-Forno) com adição de 35 a 70% de escória e o CP II E (Cimento Portland Composto com Escória) com adição de 6 a 35%, conforme previsto nas normas NBR 5735 (1991) e NBR 11578 (1991), respectivamente (42, 43).
- Escória refrigerada a ar: ocorre um processo de resfriamento lento, ao ar ambiente permitindo que o material se cristalize. É obtido um material rochoso que, posteriormente, após submetido à britagem e peneiramento pode ser utilizado como agregado graúdo em concretos, agregado asfáltico, material de enchimento e filtrante.
- Escória peletizada ou expandida: proveniente do resfriamento rápido utilizando água ou vapor d'água, dando origem a um material leve. Por conta dessa característica costuma ser utilizada como agregado na produção de concretos leves e de alta resistência ao fogo, bem como de aterramento de solos marginais.

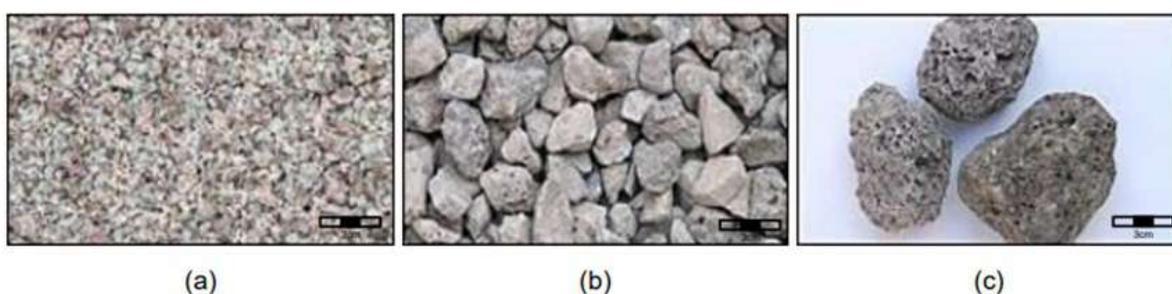


Figura 7 – Tipos de escória de alto forno (a) granulada; (b) resfriada a ar e (c) peletizada (36).

O controle da produção de aço permite manter a composição química da escória relativamente estável. No entanto, as condições operacionais durante as etapas do processo podem afetar essa composição. As escórias são classificadas com base na sua relação entre CaO e SiO_2 . As escórias ácidas possuem uma relação CaO/SiO_2 inferior a 1, enquanto as escórias básicas têm uma relação CaO/SiO_2 superior a 1 (44, 45).

As propriedades físico-químicas da escória de alto forno apresentam grande potencial de adição ou substituição ao cimento Portland (45, 41, 36, 3). Algumas características, como o tamanho da partícula, composição química e fração de fases cristalinas presentes na escória influenciam diretamente em sua reatividade (28). A granulometria é fundamental para garantir que o material tenha alta reatividade e proporcione as propriedades mecânicas necessárias para ser utilizado na construção civil (44). A fração de fases cristalina pode apresentar variação em decorrência das diferentes escórias utilizadas. Essas alterações podem ocorrer em função da composição de óxidos, da temperatura inicial de resfriamento e do método de resfriamento aplicado. A cristalização tende a aumentar com o aumento das quantidades de CaO e MgO da escória, em contrapartida, tende a diminuir com o aumento da taxa de resfriamento (28).

No entanto, a utilização da escória de alto forno não se restringe apenas à adição aos cimentos Portland. Conforme já apresentado em alguns estudos, a escória pode ser também utilizada como agregado para produção de concretos, de blocos de lâ de rocha (produto muito utilizado em isolamento acústico), para a criação de ligantes, argamassas e até mesmo cimentos alternativos com excelentes propriedades mecânicas, tais como os cimentos geopoliméricos (39, 41, 44).

2.5 Geopolímeros

Desde as antigas civilizações, o uso de certos materiais tais como argilas e cinzas vulcânicas como matérias primas para o desenvolvimento de um composto aglomerante que pudesse ser aplicado em suas construções da época já era comum (36). Tais materiais, constituídos por quantidades significativas de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) são denominados de pozolanas (28). Esse material rico em sílica, quando finamente moído e hidratado, possui características muito similares ao material cimentício convencional usado nas construções atuais, para aglomeração e moldagem (46). O termo geopolímero, também denominado poli(sialato), foi introduzido na década de 70, por Davidovits, caracterizando um tipo de material semicristalino originado da reação de um precursor de aluminossilicato com uma solução alcalina (47, 28). A rede de sialatos (abreviatura de silício-oxo-aluminato) é constituída por tetraedros de SiO_4 e AlO_4 ligados, alternadamente, partilhando os átomos de oxigênio. Os poli(sialatos) são formados por reação química de um precursor de aluminossilicatos com uma solução concentrada de silicato de sódio ou hidróxido de metal alcalino, gerando uma rede tridimensional de ligações Si-O-Al (8). Os poli(sialatos) apresentam a seguinte fórmula química empírica:



onde M é um cátion, podendo ser potássio (K), sódio (Na) e cálcio (Ca), z é a

relação Si/Al , podendo ser 1, 2 ou 3, n é o grau de polimerização, e w possui um valor de, aproximadamente, 7 (8, 12, 48).

A nomenclatura dos aluminossilicatos pode ser determinada pela razão molar entre os elementos de silício (Si) e alumínio (Al), o que determina a funcionalidade do geopolímero criado (47). Portanto, de acordo com as unidades poliméricas, o aluminossilicato pode ser dos seguintes tipos: polissialatos $(-Si-O-Al-O)_n$, polissiloxossilato $(-Si-O-Al-O-Si-O)_n$ ou polidissiloxossilato $(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)_n$, ou seja, quando z equivale a dois, o polissialato é denominado polissiloxossilato (PSS). E, se M representar um íon de sódio, por exemplo, o polímero é chamado polissiloxossilato de sódio (NaPSS), conforme Figura 8 (8, 12).

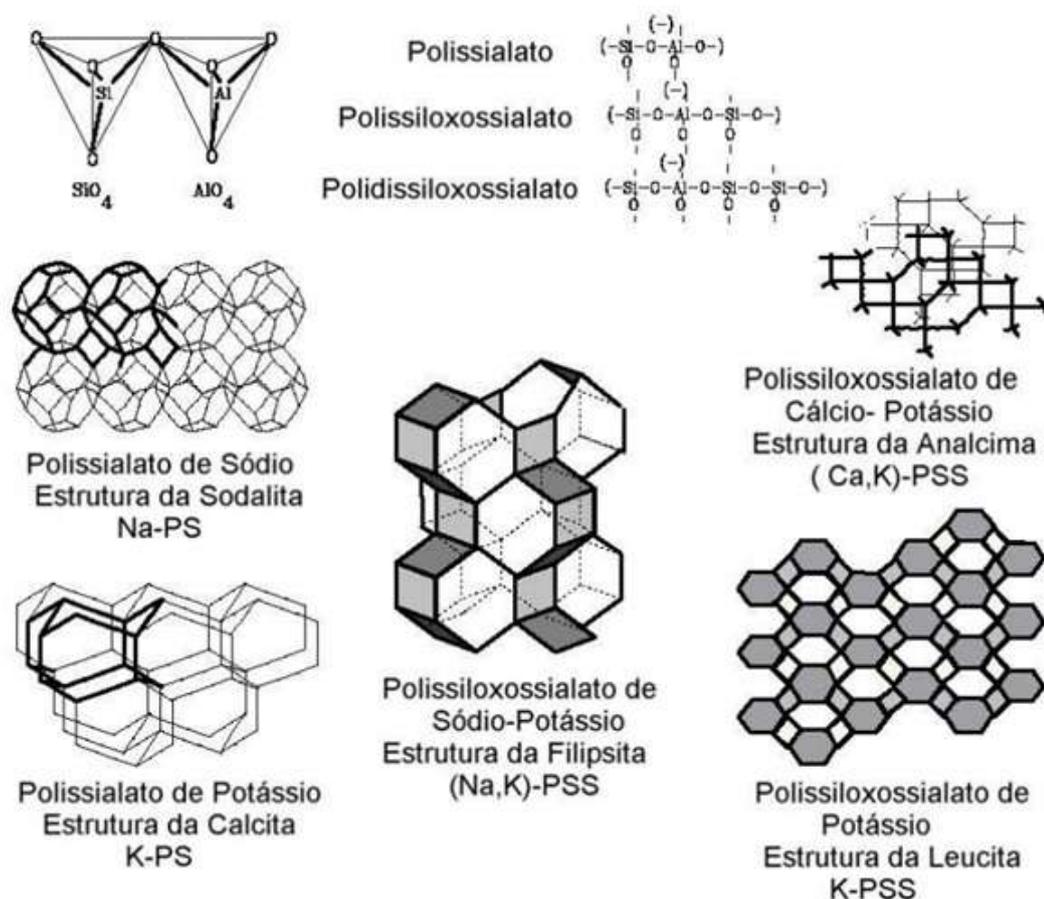


Figura 8 – Estrutura das redes de alguns geopolímeros. Adaptado de (12).

Os geopolímeros apresentam grande diversidade de aplicações industriais de forma pura ou reforçada, tais como indústria automobilística, aeroespacial, metalúrgica, engenharia civil, entre outras. As diferentes rotas de síntese dos geopolímeros para as diversas aplicações são baseadas nas razões molares entre os elementos Si/Al, que influenciam diretamente as propriedades do produto final obtido (36). Quando a relação molar entre esses elementos é igual ou superior a 3, é possível obter uma estrutura tridimensional de polissiloxossilato (PSS), que pode ser usada como material aglomerante em concretos

e argamassas considerados de alto desempenho. Sua estrutura possui ligações cruzadas, arranjo irregular e de baixa mobilidade (48). A utilização dessa razão fora dos limites ideais, com uma relação Si/Al muito elevada, pode comprometer a resistência mecânica do produto, devido às múltiplas fissuras e condições de porosidade excessiva que podem ocorrer, devido à quantidade de material não dissolvido (28, 49).

Para se obter um polissialato, é necessário respeitar os limites das razões molares entre os reagentes, para que não seja obtido um produto diferente do esperado (50). A Tabela 1 apresenta um exemplo proposto por Davidovits de razões molares entre reagentes (8, 7).

Tabela 1 – Razões molares entre óxidos na mistura de reagentes (7)

Óxidos	Razões Molares
$(Na_2O, K_2O)/SiO_2$	0,20 a 0,28
SiO_2/Al_2O_3	3,5 a 4,5
$H_2O/(Na_2O, K_2O)$	15,0 a 17,5
$(Na_2O, K_2O)/Al_2O_3$	0,8 a 1,2

Embora existam estudos comprovando que a dissolução do material de origem aumente com o aumento da concentração de álcalis, para quantidades maiores de ativadores do que as estabelecidas, a reação é afetada negativamente (49). A literatura prevê um ganho considerável de resistência à compressão por meio da utilização de um ativador composto de silicato solúvel e hidróxido alcalino (36). O uso da solução alcalina composta de hidróxido alcalino e silicato dissolvido otimiza as relações SiO_2/Al_2O_3 e Na_2O/SiO_2 na mistura, bem como catalisa o fenômeno de policondensação por monômeros SiO_4 , dando início ao processo de polimerização entre o AlO e o SiO_4 (49).

2.5.1 Ativadores alcalinos

A síntese geopolimérica requer o uso de ativadores que possibilitam a formação e estabilização de uma nova estrutura, além de promover a hidrólise das superfícies das partículas precursoras. Os ativadores alcalinos fornecem cátions que são essenciais para equilibrar as cargas e facilitar as reações químicas necessárias. Sem esses ativadores, a estrutura geopolimérica não se formaria de maneira adequada, prejudicando o processo como um todo (51).

As condições de elevado pH da solução, fazem com que o dióxido de silício (SiO_2) e o óxido de alumínio (AlO_2) sejam dissolvidos do aluminossilicato, por meio da solução alcalina utilizada. Para precursores caulinos, ocorre a liberação de cálcio (Ca) e silício (Si) (51). Existem diversos ativadores que podem ser selecionados para o uso, tais como (49):

- Hidróxido de potássio (KOH);

- Hidróxido de sódio (NaOH);
- Silicato de potássio (K_2SiO_3);
- Silicato de sódio (Na_2SiO_3);
- Carbonato de sódio (Na_2CO_3);
- Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

No geral, qualquer cátion pode atuar como elemento alcalino nas reações de geopolimerização. No entanto, a maioria dos estudos apresentam análises feitas com uso do potássio (K^+) e do sódio (Na^+). O tipo de material precursor e a aplicação desejada determinarão qual cátion deve ser utilizado (52). É usual a combinação de algumas dessas soluções apresentadas, sendo a combinação de hidróxido de sódio com silicato de sódio comumente aplicada na síntese geopolimérica (36, 52, 49).

A solução NaOH é responsável por fornecer íons (OH^-) para a dissolução do material de origem. Este tipo de solução tem a função de aumentar a velocidade da reação, atuando especialmente nas etapas de gelificação, endurecimento e formação dos cristais do geopolímero formado (52). Apresenta ampla disponibilidade de aquisição e é menos custosa do que outras soluções alcalinas. Portanto, costuma-se fazer uso desta solução na produção de cimentos geopoliméricos (49).

A solução Na_2SiO_3 , conhecida como água-vidro, também é mais barata do que a solução de silicato de potássio (K_2SiO_3) quando produzida em grandes quantidades e, portanto, também é bastante utilizada na síntese geopolimérica (49). Este ativador favorece uma alta concentração de íons de silício ao meio, promovendo alterações nas propriedades e na estrutura do geopolímero, em comparação a um meio com menor concentração de silicatos (48). Assim como outros ativadores, o silicato de sódio possui a capacidade de melhorar as propriedades mecânicas do produto final com o aumento de sua concentração (49).

A concentração molar do ativador, tem a capacidade de alterar a resistência à compressão, a densidade aparente, bem como o conteúdo da fase amorfa do geopolímero produzido (53). Alguns autores mencionam o intervalo ideal de concentração do ativador entre 8M e 16M (54), enquanto outros apontam intervalos entre 8M e 14M (36, 53). Diversas pesquisas demonstram a otimização dessas propriedades com o aumento da concentração, especialmente a resistência à compressão. Isto pode ser atribuído a maior dissolução das partículas do precursor utilizado e, conseqüentemente, à condensação acelerada dos monômeros na presença de concentrações mais elevadas de NaOH (53). Por outro lado, estudos observaram que para concentrações superiores a 10 M, o tempo de reação é muito rápido, provocando a precipitação do gel aluminossilicato nas idades iniciais de cura,

causado pelo excesso de íons OH⁻. Esse excesso pode promover a formação de carbonatos e comprometer algumas das propriedades desejadas do geopolímero, resultando em uma menor resistência mecânica do material (55).

A literatura aborda a combinação do NaOH com Na_2SiO_3 como uma das mais utilizadas para a síntese de geopolímeros, em especial na produção de cimento geopolimérico. A mistura dos aluminossilicatos presentes no material precursor com o ativador alcalino ($Na_2SiO_3/NaOH$) cria um ligante, caracterizado como uma pasta geopolimérica. Os minerais de Si e Al são dissolvidos pelo hidróxido solúvel, enquanto o silício solúvel é responsável por melhorar a policondensação dos geopolímeros, além de controlar a quantidade de silicatos nas misturas (49, 54). Estudos acerca da produção de geopolímeros à base de material fonte de aluminossilicatos ativados por álcalis, propõem razões de solução $Na_2SiO_3/NaOH$ 0,4 a 2,5 com razões de precursor/ativador entre 0,5 e 3,0 (54, 52). No entanto, pesquisas afirmam que a solução contendo apenas silicatos solúveis promove uma taxa de reação mais rápida para produção de geopolímeros (56).

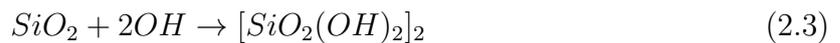
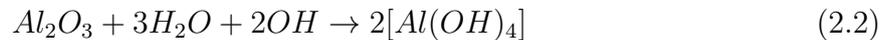
2.5.2 Processo de Geopolimerização

A síntese dos geopolímeros é realizada por meio da ativação de aluminossilicatos através de um processo químico de dissolução alcalina em uma solução aquosa deionizada (48). A reação ocorre sob temperatura ambiente ou superior para a cura. Resíduos como cinzas volantes, escória de alto forno, escória de aciaria, metacaulim e subprodutos minerais contêm quantidades suficientes de aluminatos e silicatos reativos que podem ser utilizados como materiais precursores nas reações de geopolimerização (39).

O processo de geopolimerização resulta em uma reação exotérmica de policondensação, formando um sólido com características de um material cerâmico. Essa reação ocorre a temperaturas entre 20 e 150 °C (12, 8). O silicato alcalino, utilizado como ativador, une as partículas para formar uma dispersão endurecida, atuando como uma espécie de cola. Durante o processo de cura, o aumento da temperatura reduz a desordem amorfa do material e promove uma organização estrutural mais eficiente. O endurecimento é caracterizado por uma transição sol-gel, na qual uma suspensão coloidal ou uma solução se transforma em um gel, devido à formação de ligações moleculares. Isso resulta na criação de uma rede sólida tridimensional, cuja formação é fortemente influenciada pela quantidade de polissilicato alcalino e pela temperatura de cura, levando a uma mudança na viscosidade do material (57).

A ativação alcalina de aluminossilicatos, ou a geopolimerização, é composta por quatro etapas de reações, sendo elas: dissolução, coagulação, condensação e cristalização (36). A dissolução constitui a quebra de ligações Si-O-Si e Al-O-Si devido ao ambiente favorável de pH elevado (alcalino), proporcionado pela solução alcalina. A alcalinidade, caracterizada pela concentração de íons hidroxila (OH⁻), influencia na taxa de dissolução

de SiO_2 e Al_2O_3 . Os íons OH^- e as moléculas de água são consumidos em dissolução contínua, influenciados por essa alcalinidade, bem como pela reatividade da matéria-prima e temperatura do processo. A dissolução e hidrólise dos aluminossilicatos em solução alcalina pode ser descrita conforme as equações a seguir (8):



A partir do processo de dissolução, o Al dissolvido pode reagir com os silicatos da solução ativadora, favorecendo a formação de oligômeros aluminossilicatos. Portanto, o uso de soluções como o silicato de sódio, conferem uma melhoria nas propriedades mecânicas do material em relação ao uso de hidróxidos, como o hidróxido de sódio (NaOH). Em contrapartida, o silicato encarece um pouco o produto final por seu elevado custo no mercado. Após a dissolução, ocorre a segunda etapa, em que uma fase coloidal é formada. O acúmulo dessa fase interage entre si, onde espécies $[Al(OH)_4]$ e $[SiO(OH)_3]$ se unem através da força de atração entre um dos grupos OH^- , dando origem a uma estrutura coagulada. Os grupos de hidroxilas presentes nos elementos são condensados na terceira etapa do processo, possibilitando a formação dos aluminossilicatos com a liberação de moléculas de água (H_2O). Por fim, a quarta etapa ocorre quando há a maturação do material condensado, após determinado tempo e temperatura, formando o geopolímero. As etapas do processo são demonstradas na Figura 9 (8).

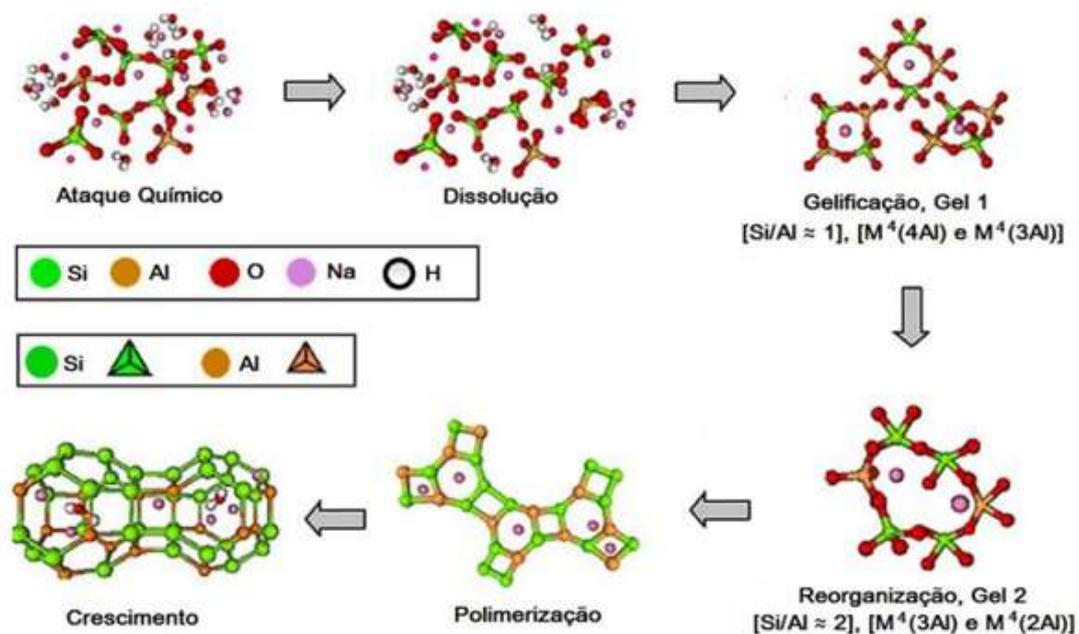


Figura 9 – Processo de Geopolimerização (36).

Alguns parâmetros ao longo da síntese geopolimérica podem afetar diretamente as propriedades mecânicas do produto final, tais como: a composição química do material precursor, a razão precursor/ativador, a temperatura de cura, a concentração da solução alcalina, bem como a relação dos compostos dessa solução (54).

2.5.3 Procedimento de cura

Dentre os fatores considerados como os mais importantes na síntese de geopolímeros, destacam-se a temperatura e o tempo de cura, que podem afetar diretamente as propriedades mecânicas do material (58). Embora a cura dos geopolímeros ocorra geralmente em temperatura ambiente, há uma melhoria significativa nas propriedades quando ocorre um acréscimo de forma adequada. Pesquisas constataram um ganho significativo de resistência dos materiais, em idades recentes (aproximadamente 7 dias), quando submetidos a processos de cura em temperaturas acima da ambiente. Estudos descritos na literatura comprovam que os materiais curados entre 60°C a 75°C, apresentam resistências mais elevadas do que aqueles curados à temperatura ambiente (59).

No entanto, uma elevação muito acima do intervalo ideal, pode ser prejudicial ao material, podendo levar a contrações ao longo do processo de endurecimento e, conseqüente redução de desempenho mecânico. Além disso, pode desencadear fenômenos, tais como: carbonatação, redução do pH e redução no poder de ativação dos precursores, resultando em um produto final poroso e de baixa resistência (60). A exposição do material a elevadas temperaturas, por períodos de tempo prolongados, ocasiona retração por perda de umidade que geram distorções nas reações, enfraquecimento da estrutura e fissuras na amostra. Portanto, a temperatura e o tempo de cura destacam-se como parâmetros importantes para a aceleração da reação química e determinação da extensão da reação (61).

2.5.4 Propriedades dos materiais geopoliméricos

Os materiais geopoliméricos ativados por álcalis exibem boas propriedades físicas e mecânicas o que fez com que se destacassem frente a outros materiais ou em complemento aos que já eram utilizados. Suas principais propriedades dependem principalmente de fatores importantes que podem afetar o desenvolvimento desses materiais, tais como: as características dos materiais constituintes, os ativadores alcalinos utilizados, o regime de tratamento térmico empregado, dentre outros. Devido a grande quantidade de fatores que podem influenciar a reação de geopolimerização, cada estrutura gerada será única, a depender da especificidade e das condições propostas para cada mistura (49). No entanto, na maioria dos estudos provou-se que, independente da especificidade de cada material geopolimérico, ele apresenta propriedades similares ou ainda superiores aos do concreto de cimento Portland convencional quando submetidos a testes semelhantes (3, 46, 54).

Para compreender o desempenho e as aplicações dos geopolímeros, é essencial analisar suas propriedades em diferentes estados: fresco e endurecido. As propriedades mecânicas, como resistência à compressão e módulo de elasticidade, determinam a estrutura e durabilidade dos geopolímeros. Propriedades físicas, como densidade e porosidade, afetam o desempenho e comportamento do material ao longo do tempo. Além disso, propriedades frescas, como estabilidade, trabalhabilidade e tempo de pega, são essenciais para a aplicação e manejo eficiente dos geopolímeros antes da cura.

- Propriedades no estado fresco:

- Trabalhabilidade: A trabalhabilidade do geopolímero é influenciada significativamente pela quantidade de água e ativadores utilizados. O aumento do conteúdo de líquido alcalino pode melhorar a trabalhabilidade, mas pode reduzir a resistência devido ao menor índice sólido/líquido. Adições de escória e diferentes tipos de metacaulim também influenciam a trabalhabilidade, sendo a escória geralmente mais eficaz no aumento da trabalhabilidade (62).
- Tempo de Pega: O tempo de pega dos geopolímeros varia amplamente com base nos materiais e condições de cura utilizados. Em temperaturas de cura entre 20°C e 80°C, o tempo de pega inicial é de cerca de 35 minutos e o tempo de pega final pode chegar a 600 minutos (63). O tempo de pega é significativamente influenciado pelo tipo de material precursor e pela composição do ativador alcalino. O aumento na proporção de $Na_2SiO_3/NaOH$ pode reduzir o tempo de pega do geopolímero. Assim, o tempo de pega é afetado por fatores como propriedades químicas e físicas do aglomerante, composição da mistura, processo de mistura e condições ambientais (62).

- Propriedades Mecânicas:

- Resistência à Compressão: A resistência à compressão do geopolímero é influenciada por diversos fatores, incluindo o tempo de mistura, tempo e temperatura de cura, tamanho das partículas, relação sólido/líquido, dentre outros fatores. A resistência pode diminuir quando o material possuir água ou ativadores em excesso ou quando exposto a temperaturas muito elevadas (62). Os materiais geopoliméricos se destacam pela excelente resistência mecânica que apresentam. Um concreto de cimento CP II E-32, após tempo de cura de 28 dias, apresenta resistências entre 32 e 49 Mpa, conforme a norma do Cimento Portland Composto (NBR 11578) prevê (43). Um concreto de cimento geopolimérico, segundo Davidovits, pode atingir uma resistência à compressão na faixa de 70 a 100 Mpa ao final dos 28 dias de cura (48). Estudos apontam que a cura em temperaturas mais altas do que a temperatura ambiente aumenta a resistência do geopolímero,

com um aumento significativo após 24 horas, devido ao desenvolvimento de gel C-S-H e aumento da densidade da matriz (64). Após 28 dias, a resistência tende a se estabilizar, tal qual a do concreto (65). Em contrapartida, a diminuição da relação sólido/líquido reduz a resistência do material (62).

- Módulo de Elasticidade: O Módulo de Elasticidade dos geopolímeros está fortemente correlacionado com a resistência à compressão, pois um maior grau de geopolimerização resulta em uma matriz mais densa e, conseqüentemente, em um ME mais elevado (62). Estudos indicam que um alto teor de silicato pode aumentar o ME dos geopolímeros (66). Entretanto, se a quantidade de silicato e a solução de hidróxido de sódio for muito baixa, isso pode influenciar negativamente o ME, fazendo com que ele seja de 15% a 28% menor em comparação ao do concreto convencional (67).

- Propriedades Físicas:

- Densidade: A densidade média dos geopolímeros varia de 2,02 g/cm³ a 2,7 g/cm³, dependendo dos componentes da mistura (68). A quantidade de agregado na mistura é a principal responsável por sua densidade, sendo que o agregado fino, quando usado em maior volume, melhora a densidade (69, 70). A densidade reduzida dos geopolímeros pode levar a economias significativas de custos e melhorar o desempenho em aplicações estruturais (68).
- Retração: A retração por secagem dos geopolímeros refere-se à redução de volume durante os processos de secagem e endurecimento (68). A retração é influenciada pelo tempo de exposição a soluções de sulfato e pode levar ao desenvolvimento de fissuras se não for controlada. A adição de fibras pode ajudar a minimizar a retração e prevenir rachaduras. Geopolímeros com alta proporção de escória de alto forno apresentam menor retração, tornando-os comparáveis ao concreto normal e contribuindo para a durabilidade dos materiais em aplicações de infraestrutura (62). Os geopolímeros apresentam baixa absorção de água devido à matriz do aglomerante ser densa, muitas vezes determinada pela quantidade de água usada em sua produção. Portanto, estudos demonstram que o cimento geopolimérico pode apresentar melhores resultados do que o cimento Portland convencional nesse quesito (49).
- Porosidade: A porosidade dos geopolímeros é um fator crítico que pode comprometer suas propriedades, afetando negativamente sua resistência e durabilidade. Essa característica é influenciada por variáveis como umidade relativa, grau de reação e propriedades macroscópicas do material (71). A distribuição e o tamanho dos poros desempenham um papel fundamental na resistência à corrosão e, por conseqüência, na durabilidade do geopolímero. Porosidade excessiva

pode reduzir a resistência à compressão, tornando o material mais suscetível à penetração de agentes agressivos e acelerando sua degradação. Além disso, uma porosidade inadequada pode prejudicar a formação de uma matriz coesa e resistente, afetando a microestrutura do geopolímero (3). A redução da alcalinidade apresenta-se como uma das formas de mitigar a porosidade excessiva dos geopolímeros (72).

- Propriedades Químicas

- Corrosão: A durabilidade dos materiais pode estar associada, dentre outros fatores, à resistência que ele apresenta em relação à corrosão. A corrosão é um ataque destrutivo que ocorre por reações químicas e eletroquímicas em elementos de concreto armado. As ações de desgaste corrosivo causam uma diminuição de seção das armaduras do concreto e, conseqüente queda da resistência ao material. Os ambientes mais nocivos, que geram o processo de corrosão no material, são ambientes marinhos ou com elevada acidez. Os geopolímeros apresentam melhores resultados de resistência à corrosão do que os concretos de cimentos Portland. Esse fato deve-se à estrutura mais homogênea do aglomerante geopolimérico (49).

2.5.5 Eflorescência em geopolímeros

Os geopolímeros, apesar de apresentarem excelentes propriedades, possuem em sua composição final uma quantidade de água que tende a evaporar gradualmente para o ambiente através de poros. Nesse processo, os sais livres, provenientes dos ativadores utilizados que não reagiram completamente, são lixiviados e reagem com o CO_2 presente no ar. Como produto dessa reação, ocorre a formação de sais na superfície do geopolímero, fenômeno este conhecido como eflorescência e comumente identificado em estruturas de concretos de cimento Portland (11).

A formação de eflorescência pode ser considerada como uma manifestação patológica, visto que gera efeitos negativos na resistência e na durabilidade do material. A ocorrência dessa patologia está relacionada aos níveis de ativação, que influenciam a estrutura porosa do geopolímero e a estabilidade dos álcalis em sua composição (73). A água, presente nos poros do geopolímero, é expelida da matriz lixiviando uma quantidade de óxido de sódio, que, em contato com o CO_2 presente no ar, reage contribuindo para a formação de cristais, denominados eflorescência (74).

Diversas pesquisas investigaram o impacto da água na síntese de geopolímeros com relação à resistência e formação de eflorescência nesses materiais (74, 75, 76). Foi identificada uma melhora na trabalhabilidade das pastas geopoliméricas produzidas com uma razão sólido/líquido menor, embora tenha sido observado que o excesso de água

reduz a resistência do produto final (74). Além disso, a resistência à compressão pode estar relacionada à densidade do material, ou seja, quanto maior a densidade, maior a resistência. Essa densidade do material está diretamente ligada à quantidade de água, portanto, uma material produzido com menos água tem uma estrutura mais compacta e densa e, conseqüentemente apresenta uma resistência maior (77, 78). Ademais, misturas com maiores razões molares H_2O/Na_2O apresentaram maior formação de eflorescência durante as 24 horas iniciais de cura, devido a maior quantidade de água liberada durante a reação química de geopolimerização (76).

2.5.6 Aplicação do Geopolímero na Construção Civil: Cimento Geopolimérico

Os geopolímeros apresentam ampla versatilidade de uso, especialmente na construção civil. Suas características e propriedades finais dependem diretamente da dosagem das matérias-primas utilizadas. As razões atômicas entre silício e alumínio em suas estruturas influenciam suas propriedades e aplicações, variando conforme a origem dos substratos empregados (79). Esses materiais têm um considerável potencial para diversas aplicações na engenharia, tais como resinas, adesivos, revestimentos para a proteção de concreto armado contra corrosão, entre outros (80, 81). Contudo, os produtos mais desenvolvidos e utilizados são aqueles que se apresentam como aglomerantes, utilizando predominantemente argilominerais (3).

Semelhante ao cimento Portland da indústria tradicional, o cimento geopolimérico pode ser utilizado como aglomerante na forma de pasta, argamassa e concreto. Com uma crescente demanda comercial, os geopolímeros são especialmente úteis em situações que exigem rápido aumento da resistência mecânica, como na indústria de pré-fabricados, pavimentação e reparo de estruturas, proporcionando um processo de produção mais ágil e eficiente (3). Além disso, pesquisas verificam incrementos de resistência à compressão em todas os tempos de cura investigados com a substituição do cimento convencional por escória (82, 28, 3).

O cimento geopolimérico como uma nova categoria de materiais cimentícios, destacam-se também pela boa resistência a produtos químicos e a alta refratariedade. Além disso, têm alta resistência ao fogo e baixa condutividade térmica, suportando temperaturas de 1000°C a 1200°C sem comprometer suas funções, com propriedades térmicas semelhantes às dos tijolos refratários. Portanto, o cimento geopolimérico apresenta-se como um material cimentício com grandes perspectivas para o desenvolvimento sustentável no século XXI, com amplas possibilidades de uso e relações custo-benefício significativamente mais vantajosas (83).

Já existem fábricas de cimento geopolimérico espalhadas pelo mundo. Nos Estados Unidos: Lone Star, Pyrament, Metamax; na França: Geopolymer; na Alemanha: Tollit e na Nova Zelândia: MetaMax. No Reino Unido, a Banah UK, comercializa o cimento

geopolimérico banah-Cem™, na Austrália a Zeobond comercializa o concreto geopolimérico E-crete™. No Brasil a Geo-Pol comercializa cimento geopolimérico em pó para aplicações em pisos, argamassas e concreto, assim como a Wincret Designer (84).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais, métodos e equipamentos utilizados na pesquisa. Foram produzidas pastas de cimento geopolimérico com uso de escória granulada de alto forno ativada inicialmente com hidróxido de sódio e silicato de sódio. Posteriormente, a pasta geopolimérica foi produzida apenas com silicato de sódio, variando a razão sólido/líquido e avaliando os comportamentos físico-químicos e mecânicos das amostras em três tempos de curas distintos. O estudo foi essencialmente experimental, desenvolvido no Laboratório de Cerâmicas do Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro.

3.1 Materiais

3.1.1 Escória de Alto Forno

Para a produção da pasta de cimento geopolimérico utilizou-se como principal fonte de silício e cálcio a escória granulada de alto forno, com nomenclatura adotada nesta pesquisa de “escória de alto forno”. O processo de cominuição da escória foi feito em laboratório, conforme descrito na seção 3.2.1.

3.1.2 Ativadores alcalinos

3.1.2.1 Hidróxido de sódio

Para promover a ativação alcalina da reação, optou-se pelo uso de hidróxido de sódio (NaOH) devido ao seu menor custo. O material é da marca Dinâmica e foi fornecido pelo IME. Está disposto em formas de pastilhas anidras com 98% de pureza, e possui as características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características do NaOH

Especificações	
Cor	Branca
Estado físico	Pastilhas
Dosagem	98%
Na_2CO_3	1,0%
Sulfato (SO_4)	0,003%
Comp. Nitrogenados	0,001%
Fosfato (PO_4)	0,001%
Materiais pesados (Pb)	0,002%
Ferro (Fe)	0,001%
Níquel (Ni)	0,001%
Mercurio (Hg)	0,00001%
Cálcio (Ca)	0,005%
Magnésio (Mg)	0,002%
Potássio (K)	0,02%

3.1.2.2 Silicato de sódio

O Silicato de Sódio (Na_2SiO_3) foi utilizado como fonte suplementar de silício para o geopolímero. O material é da marca Êxodo e foi fornecido pelo IME. Suas características são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características do Na_2SiO_3

Especificações	
Cor	Branca
Estado físico	Pó
Na_2O	23 - 26%
SiO_2	56 - 60%
Relação SiO_2/Na_2O	2,28 - 2,4%
Sólidos Totais	79 - 86%
Umidade	Máx. 10%
pH	11 - 13

3.2 Métodos

3.2.1 Processamento da Escória de Alto Forno

A escória precisou passar por alguns processos para que pudesse ser utilizada na produção da pasta geopolimérica (Figura 10). O processo de cominuição do material foi feito por meio de um moinho de jarro. No moinho foram utilizadas esferas de alumina em um tempo de 8 horas para cada 500 gramas de escória. O material foi moído com água deionizada para facilitar a fragmentação dos grânulos. Posteriormente, foi colocada em

estufa a 100°C, por 48h, até secar toda umidade. Em seguida, a escória foi macerada e passou pela etapa de peneiramento em uma peneira vibratória. O material utilizado para a realização dos ensaios foi o passante na malha de 75 μm , pois a finura equivale ao cimento Portland, conforme determinado pela NBR 11579:2013 (85).

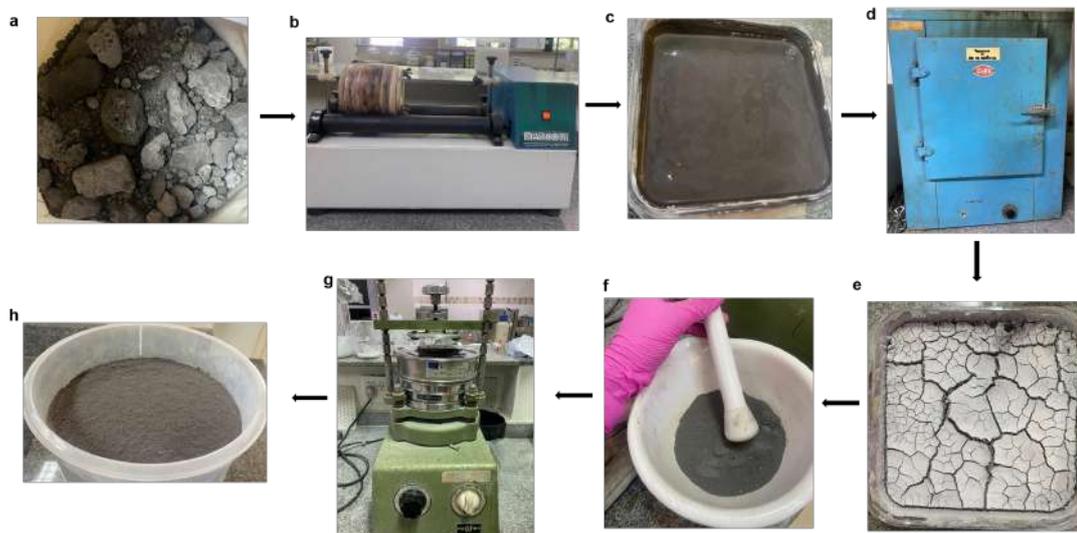


Figura 10 – Preparo da escória de alto forno: a) Escória de alto forno; b) Moagem da escória no moinho de bolas; c) Escória após moagem; d) Secagem da escória na estufa; e) Escória após secagem; f) Maceração da escória; g) Peneiramento da escória; h) Escória moída e peneirada (Arquivo pessoal)

3.2.2 Preparação das amostras

Para o preparo das amostras de geopolímero foi colocada a água deionizada e o ativador em um becker para dissociá-lo. Misturou-se a solução por 5 minutos no agitador magnético. Em seguida, foi adicionada a escória de alto forno aos poucos à solução e misturada mecanicamente por mais 5 minutos até homogeneizar, formando uma pasta. A pasta de cimento geopolimérico foi colocada em moldes de plástico (tubo falcon de $\varnothing=25\text{mm}$ adaptado, preenchendo o molde até a altura de 50mm) e permaneceu em cura ambiente por 72 horas até ser desenformada. A preparação das amostras foi dividida em 4 etapas de teste, de acordo com o processamento e os ativadores utilizados (Figura 11).

Na primeira etapa (GeoE1), a amostra foi produzida com a escória de alto forno após o seu processo de beneficiamento, tendo como ativadores alcalinos o hidróxido de sódio e o silicato de sódio na concentração de 10 molar, razão $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 2,5 e razão sólido/líquido (s/l) de 1,6. Tais razões foram escolhidas devido à sua influência na maior reatividade e na formação mais eficiente do geopolímero (86, 87, 3, 54).

Na segunda etapa (GeoE2), a amostra foi produzida com os mesmos ativadores e nas mesmas razões da etapa 1, no entanto, a escória passou por um processo de lavagem, a fim de eliminar possíveis contaminações orgânicas (fungos) que foram identificadas no

GeoE1. O material foi lavado com álcool isopropílico e secado em estufa à 100 °C por 24h, antes de ser novamente macerado. Em seguida, seguiu-se o mesmo processo de preparação da etapa anterior e, após as 72h de cura ambiente, foi desenformada e colocada em uma dessecadora.

Para a terceira etapa (GeoE3), manteve-se o uso da escória "lavada" do GeoE2, no entanto, utilizando-se apenas o silicato de sódio como ativador, a fim de reduzir a quantidade de sódio e conseqüente formação de eflorescências e fissuras nas amostras. A concentração foi de 10 molar e razão s/l de 1,6. O processo produtivo seguiu o mesmo padrão e a pasta de cimento geopolimérico, após as 48h de cura ambiente, foi desenformada e colocada em uma dessecadora também.

A quarta etapa (GeoE4), ponto focal desta pesquisa, também foi realizada com o uso da escória "lavada" e do silicato de sódio como único ativador, no entanto, optou-se por reduzir a razão molar da solução para 8M, variando a razão s/l em 1,6, 1,8 e 2,0, a fim de reduzir ainda mais a quantidade de sódio e também a de água nas amostras, no intuito de obter amostras livres do efeito de eflorescências, fissuras e, conseqüentemente mais resistentes. O processamento seguiu o mesmo padrão das anteriores e, após 72h de cura ambiente, foram desenformadas e acondicionadas em embalagens de plástico para posterior análises mecânicas e caracterizações.

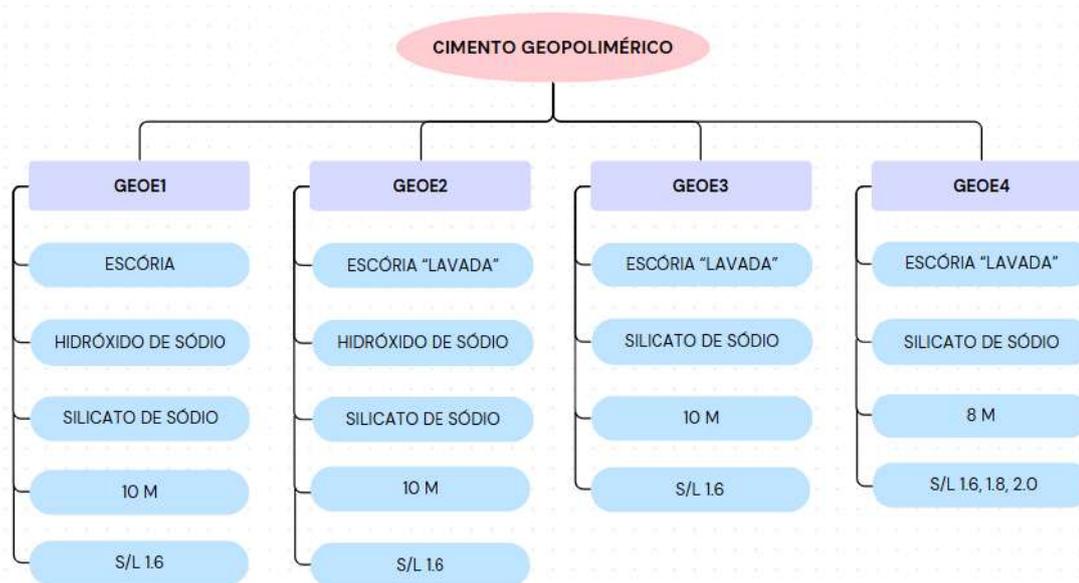


Figura 11 – Preparo das amostras (Autora, 2024)

3.2.3 Determinação da porosidade e densidade aparente da escória e dos geopolímeros

A porosidade e densidade aparente da escória e dos geopolímeros foram determinadas por meio do ensaio de Arquimedes (Figura 12), de acordo com a norma NBR 16661

(88). Primeiramente, foram separadas 5 amostras da escória e 5 amostras de geopolímeros de cada razão s/l. Para os geopolímeros foram aferidas as densidades para os três tempos de cura analisadas (7, 14 e 28 dias), a fim de verificar se houve alteração significativa de densidade ao longo do tempo. As amostras foram colocadas na estufa por cerca de 2 horas e verificou-se a massa seca em uma balança de precisão $\pm 0,01\text{g}$. Em seguida, foram submetidas à fervura por 1 hora em água e, após, a massa imersa foi aferida. Por fim, mediu-se a massa úmida das amostras e, adotando-se $1,0 \text{ g/cm}^3$ para a densidade da água utilizada no ensaio, os cálculos de densidade aparente e porosidade foram elaborados por meio das seguintes fórmulas (89):

$$V_a = \frac{m_u - m_i}{\rho_{liq}} \quad (3.1)$$

$$D_a = \frac{m_s}{V_a} \quad (3.2)$$

$$P(\%) = \left(\frac{(m_u - m_i)}{(\rho_e \times V_a)} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

Sendo:

V_a = Volume aparente (cm^3)

D_a = Densidade aparente (g/cm^3)

P = Porosidade (%)

m_u = Massa úmida (g)

m_i = Massa seca (g)

m_s = Massa do sólido (g)

ρ_{liq} = Densidade do líquido utilizado no ensaio (g/cm^3)

ρ_e = Densidade do material analisado (g/cm^3)

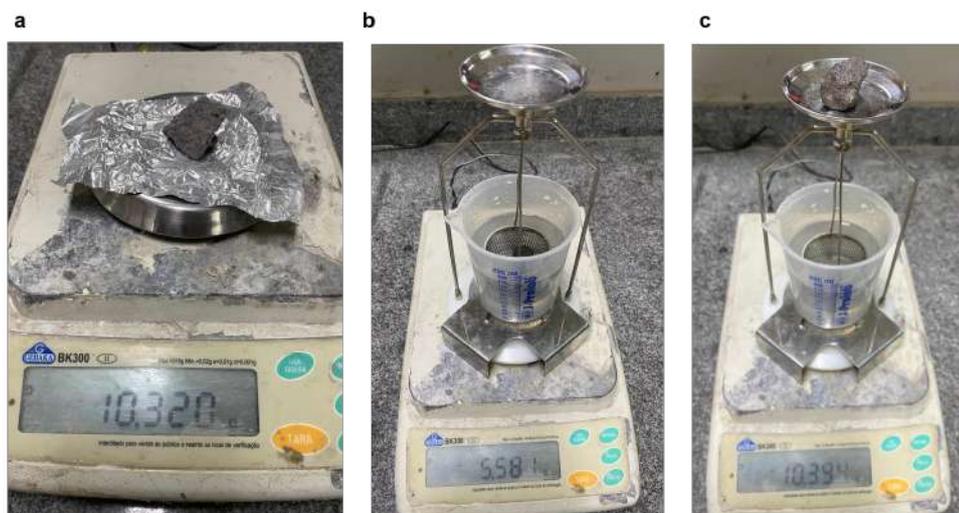


Figura 12 – Determinação da densidade aparente pelo princípio de Arquimedes: a) Massa seca; b) Massa imersa; c) Massa úmida (Arquivo Pessoal)

3.2.4 Técnicas de Caracterização

Neste capítulo são apresentadas as diferentes técnicas de caracterização que foram empregadas com o intuito de avaliar as características estruturais dos materiais utilizados. Além disso, são apresentados os ensaios empregados na avaliação das propriedades mecânicas das pastas geopoliméricas com diferentes razões sólido/líquido.

3.2.4.1 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX)

Como uma análise química quantitativa, a espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) permitiu identificar os elementos químicos presentes na escória de alto forno utilizada, representando-os na forma de óxidos. O percentual de óxidos presentes na escória possibilitou a análise da razão Si/Al do material, fator de suma importância na produção do geopolímero. A proporção dos ativadores foi definida através dos cálculos de molaridade baseados nos resultados da FRX.

Na preparação das amostras para a análise foi aplicada a técnica da pastilha fundida com fluxo de tetra e metaborato de lítio, na proporção de 66/34, respectivamente, em forno automático a uma temperatura de 1000° C, usando uma massa de 0,15 g da amostra e 7,0 g do fundente. O espectrofotômetro utilizado foi o equipamento IRPrestige-21 da marca Shimadzu do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

3.2.4.2 Difração de Raios X (DRX)

A difração de raios X, técnica não destrutiva, possibilitou uma análise dos parâmetros estruturais cristalográficos dos materiais. Foi possível identificar as fases cristalinas presentes na escória, bem como nos geopolímeros produzidos, a fim de confirmar o processo

de geopolimerização. Além disso, foi possível comparar as fases formadas nos geopolímeros de diferentes razões s/l e identificar se houve a formação ou intensificação de alguma fase específica ao longo dos diferentes tempos de cura avaliados.

Os difratogramas foram obtidos no difratômetro da marca PANalytical, modelo X'Pert MRD do Laboratório de DRX do IME, operado com fonte de radiação de cobalto Co-K α (comprimento de onda de 0,178nm), corrente de 40 mA e tensão de 40 kV, no intervalo de 2θ de 10° a 90°, varredura com passo de 0,050° e tempo de coleta de 180 segundo por passo. As fases obtidas foram comparadas com fichas cristalográficas do banco de dados disponível.

3.2.4.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Com a análise por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram identificados os grupos funcionais presentes na escória antes do processo de geopolimerização, a fim de corroborar com as análises de FRX. Essa análise possibilitou a identificação dos grupos funcionais que correspondem aos elementos encontrados na análise de FRX da escória, em termos de óxidos.

Em seguida, foi realizada a análise após a síntese, a fim de obter os espectros também dos geopolímeros sintetizados. Foi possível comparar as bandas nos geopolímeros de diferentes razões s/l, bem como identificar se houve alguma alteração significativa ao longo dos diferentes tempos de cura analisados. Foi utilizado o espectrômetro de modelo IRAffinity-1S FTIR, fabricado pela Shimadzu, com a faixa de comprimento de onda com varredura de 4000- 400 cm⁻¹.

3.2.4.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada para observação das características microestruturais da matriz da escória e dos geopolímeros, tais como análise da superfície, dos particulados e presença de porosidade. Também foram analisados os cristais que se desenvolveram na superfície de algumas amostras de geopolímero, a fim de confirmar a presença de eflorescência. Os experimentos foram realizados no microscópio QUANTA FEG 250, equipado com EDS, disponível no IME, com tensão de 20 kV, work distance 10 mm, spot size 3.5.

3.2.5 Ensaio de Resistência à compressão

Os ensaios para determinação da resistência à compressão axial seguiram as diretrizes da NBR 5739 (90). Foram realizados no Laboratório de Cerâmicas do IME, na máquina EMIC DL 10.000 (Figura 13). Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados

em corpos de prova cilíndricos de dimensões 25mm X 50mm, com moldes improvisados com tubos Falcon (Figura 14).



Figura 13 – Equipamento de ensaio à compressão (Arquivo Pessoal)



Figura 14 – Dimensões do corpo de prova (Arquivo Pessoal)

As amostras foram divididas em três grupos, de acordo com suas razões s/l (1.6, 1.8, 2.0). As resistências foram analisadas para esses três grupos em três tempos de cura (7, 14 e 28 dias). Para cada grupo, foram produzidas 5 amostras para cada tempo de cura, totalizando 45 amostras (Figura 15).



Figura 15 – Amostras nos moldes cilíndricos: (a) 1.6; (b) 1.8; (c) 2.0. (Arquivo Pessoal)

3.2.5.1 Determinação do Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade dos geopolímeros foi obtido através dos ensaios de resistência à compressão realizados, de acordo com as diretrizes da norma NBR 5739 (90). Os valores obtidos durante a análise fornecem os resultados da razão entre tensão e deformação dos geopolímeros no trecho linear da curva tensão-deformação, correspondendo ao comportamento elástico do material.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados do ensaio físico de determinação da densidade aparente da escória pelo princípio de Arquimedes, bem como as caracterizações por FRX, DRX, FTIR e MEV do pó da escória de alto forno. Apresenta-se também os resultados do estudo das pastas de cimento geopolimérico após o processo de cura, com suas caracterizações por DRX, FTIR, MEV e os ensaios mecânicos da resistência à compressão e do módulo de elasticidade para os diferentes tempos de cura analisados.

4.1 Caracterização da escória de alto forno

Este tópico apresenta os resultados das análises físicas e caracterizações por FRX, DRX, FTIR e MEV obtidos para o pó da escória de alto forno utilizada nesta pesquisa.

4.1.1 Determinação da porosidade e densidade aparente

As massas (seca, imersa e úmida) das amostras foram aferidas de acordo com o Princípio de Arquimedes. Obteve-se o volume aparente (V_a), a fim de calcular a densidade aparente (D_a) da escória. Em seguida, calculou-se também a porosidade (P). A média dos valores das 5 amostras para a densidade aparente foi de $2,16 \pm 0,16 \text{ g/cm}^3$ e para a porosidade foi de $46,80\% \pm 0,04\%$.

4.1.2 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (FRX)

A Tabela 4 apresenta a composição química da escória de alto forno com os percentuais em massa de óxidos presentes. Pela análise dos dados obtidos, ratifica-se que a escória utilizada pode ser considerada um material precursor para a geopolimerização, pois apresenta em sua composição diversos óxidos metálicos característicos de um precursor aluminossilicato, tais como cálcio (CaO), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) (91).

A razão Si/Al da escória, de 2,4 (aproximadamente 2:1), mostra-se compatível com os parâmetros descritos na literatura para que ocorra síntese de um geopolímero. Os geopolímeros produzidos classificam-se como um polissiloxosialato, devido à razão apresentada (2:1) (8, 12).

Tabela 4 – Composição química da escória de alto forno

Composição	Percentuais em massa
CaO	32,5%
SiO ₂	29,8%
Al ₂ O ₃	10,2%
Fe ₂ O ₃	9,7%
Na ₂ O	6,3%
MgO	5,7%
SO ₃	2,3%

No entanto, os valores obtidos pela análise de FRX apresentaram algumas discrepâncias em relação aos percentuais de óxidos apresentados nas literaturas (92, 40, 91). Os principais óxidos comumente identificados em escórias de alto forno (SiO₂, Al₂O₃ e CaO) apresentaram valores dentro dos parâmetros habituais na escória utilizada, no entanto os valores de Fe₂O₃ e Na₂O, apresentaram percentuais consideravelmente acima (9,69% Fe₂O₃ e 6,35% Na₂O).

De acordo com estudos que apresentam as faixas comumente encontradas de óxidos de escórias em outros países, o Na₂O apresenta-se em baixíssima concentração, em alguns casos até mesmo considerada nula (40). Não foram identificadas pesquisas apresentando concentrações de Na₂O próximas aos resultados obtidos para essa escória, entretanto, um estudo que utilizou outra fonte de aluminossilicato (pó de aciaria), relatou os efeitos negativos causados pelo excesso de Na₂O e as influências nas propriedades do geopolímero produzido (93).

4.1.3 Difração de Raios X (DRX)

A análise mineralógica realizada por DRX no pó da escória de alto forno pode ser observada na Figura 16. O difratograma da escória revelou a presença de fases como Akermanita, Hematita, Calcita e Quartzo (Tabela 5). Essas fases cristalinas são típicas deste tipo de material (3, 91).

Tabela 5 – Fases cristalinas do DRX da escória

Fases	Fichas	Fórmula Química
Calcita	96-901-4345	Ca ₆ C ₆ O ₁₈
Hematita	96-901-4881	Fe ₁₂ O ₁₈
Quartzo	96-900-5019	Si ₆ O ₆
Akermanita	96-900-6115	Ca ₄ Mg _{0.92} Al _{1.98} Si _{3.04} O ₁₄

A predominância das fases Akermanita e Calcita pode ser atribuída à alta proporção de óxido de cálcio na composição da escória, conforme indicado nos resultados da FRX.

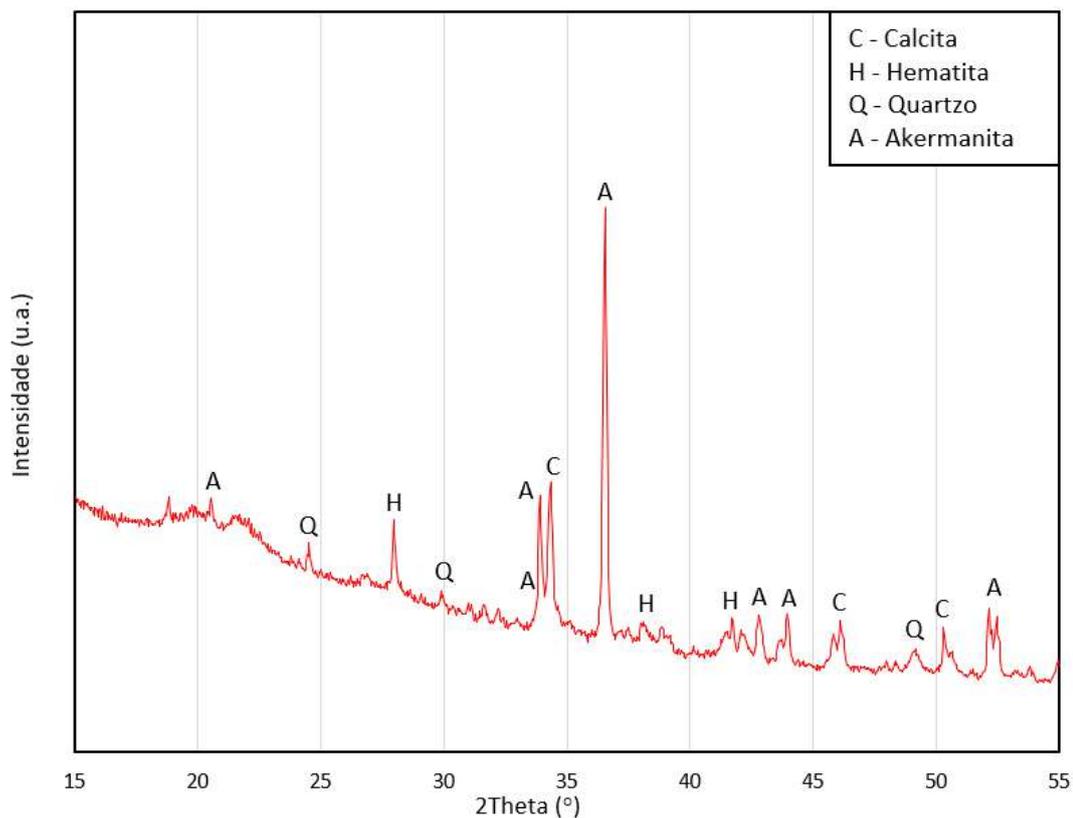


Figura 16 – Difratograma da escória de alto forno (Autora, 2024)

A presença de cálcio na escória de alto forno é crucial, pois esse elemento é obtido principalmente a partir do carbonato de cálcio, utilizado como fundente para reduzir o ponto de fusão do minério de ferro durante o processo de produção de ferro em altos-fornos (94). Suas propriedades aplicadas ao geopolímero contribuem para melhorar a resistência à compressão, a trabalhabilidade, durabilidade, etc. Além disso, as escórias ricas em cálcio são matéria prima essencial na fabricação do cimento Portland de alto forno (95, 96).

A Hematita está relacionada à presença de óxidos de ferro e o Quartzo a dióxidos de silício. Os resultados encontrados corroboram com os encontrados na literatura (3, 91, 97). Além dessas fases, também podem estar presentes outras em quantidades menores ou compostos amorfos que não foram identificados no difratograma. É comum a amorfização em escórias de alto forno, devido ao resfriamento rápido após a retirada do resíduo do alto forno, não havendo tempo suficiente para formação dos cristais (3).

4.1.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de FTIR da escória (Figura 17) revelou bandas em 1422 e 876 cm^{-1} , atribuídas às vibrações de estiramento simétrico de grupos carbonato (CaCO_3), associadas a carbonatos como a Calcita (98). A presença dessas bandas corrobora a análise de FRX, confirmando a presença de cálcio na escória, como elemento em maior percentual

na estrutura da escória, na forma de CaO. Além disso, o resultado aproxima-se com o encontrado na literatura. Souza(99) observou duas bandas em sua análise: em 1424 e em 874 cm^{-1} , referentes à Calcita, bem como Metlenkin et al.(98) que identificou bandas em 1420 e 875 cm^{-1} e SILVA et al.(100) em 1437 e 876 cm^{-1} . A identificação dessas bandas de carbonatos, correlacionadas com outras análises, pode indicar que a escória já possuía algum grau de carbonatação. Portanto, além de corroborar com os dados obtidos na FRX, o resultado desta caracterização química, confirmou o resultado do DRX, que apresenta o cálcio em diferentes fases, inclusive na fase Calcita.

Ademais, também foram detectadas bandas em 962 cm^{-1} e na faixa de 600–400 cm^{-1} , que são características de silicatos e aluminossilicatos, associadas às vibrações de estiramento Si-O-Si ou Si-O-Al. Essas bandas são características em estruturas minerais, portanto, comumente encontrada na análise de escórias (98). A banda 708 cm^{-1} também é característica do carbonato de cálcio, conforme observada por SILVA et al.(100), que identificou uma banda aproximada, em 712 cm^{-1} . Já as bandas 3453 e 1634 cm^{-1} são associadas a vibrações de estiramento O-H de grupos hidroxila (OH⁻) e vibrações de deformação de H-O-H da água livre ou adsorvida da escória (101).

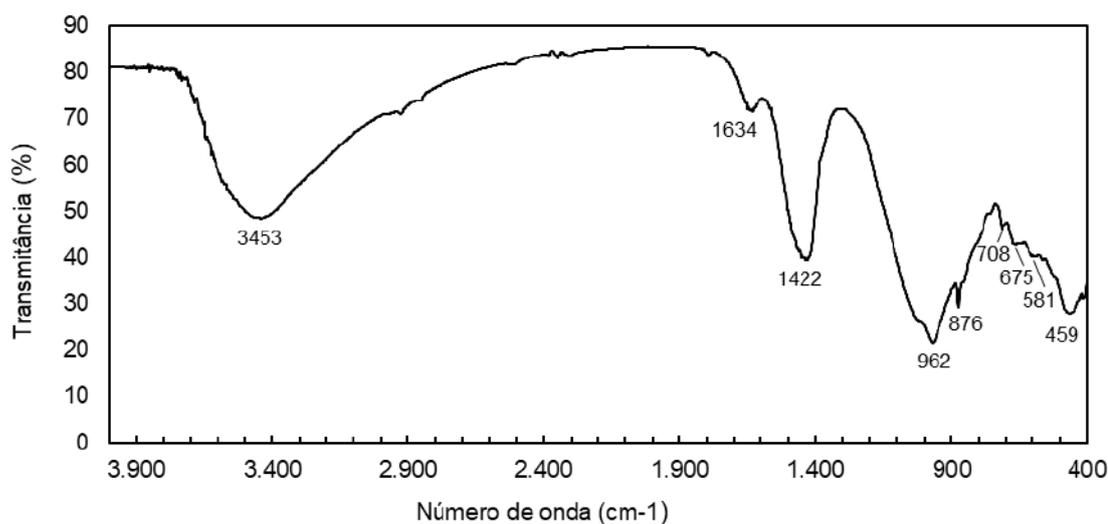


Figura 17 – Espectro de FTIR da escória de alto forno (Autora, 2024)

4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 18 pode-se observar que as micrografias da escória apresentaram morfologia característica deste material de acordo com a literatura. Embora a superfície da escória aparente um aspecto mais rugoso, em geral, o material não apresenta um padrão morfológico definido. Observou-se que as partículas apresentam texturas indefinidas, diferentes

tamanhos, formatos e grande aglomeração. Resultados semelhantes foram encontrados por (102, 3, 103, 86).

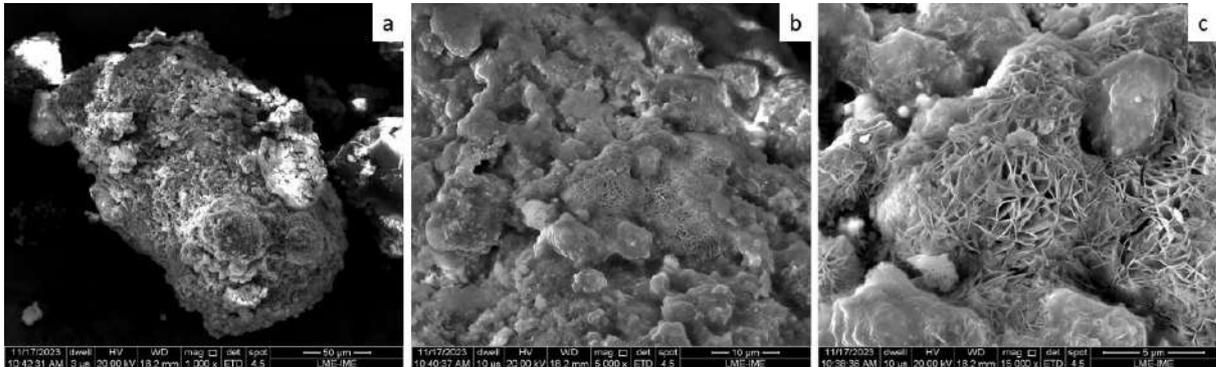


Figura 18 – Micrografias (MEV) da escória de alto forno: (a) 1000X; (b) 5000X; (c) 15000X (Autora, 2024)

Por meio da análise semiquantitativa do EDS (Figura 19), é possível confirmar a composição química da escória, de acordo com os resultados da FRX. Destaca-se a presença acentuada do cálcio, ferro e silício, elementos em quantidades significativas, de acordo com a análise química do material.

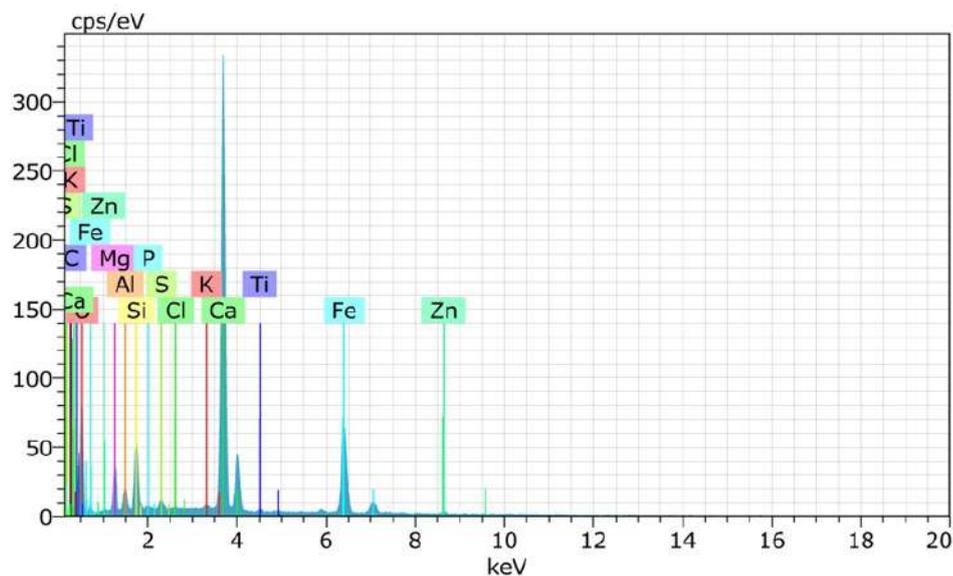


Figura 19 – EDS da escória de alto forno (Autora, 2024)

4.2 Caracterização das pastas geopoliméricas

Este tópico apresenta os resultados das análises físicas dos primeiros testes de geopolímero (GeoE1, GeoE2, GeoE3 e GeoE4), bem como as análises mecânicas e das

caracterizações por DRX, FTIR e MEV das pastas de cimento geopolimérico produzidas com as diferentes razões s/l (GeoE4) para os diferentes tempos de cura (7, 14 e 28 dias).

4.2.1 Análise das características físicas dos geopolímeros

A amostra de pasta de cimento geopolimérico desenvolvida na etapa 1 da pesquisa (GeoE1), teve resultados positivos em relação ao processo de cura, visto que endureceu em aproximadamente 48 horas, podendo ser desenformada. No entanto, 48h após desenformada e colocada na dessecadora, a amostra começou a apresentar fissuração visível a olho nu e manchas de coloração branca, em sua superfície. Com o passar do tempo, a quantidade de manchas aumentou consideravelmente na amostra (Figura 20).

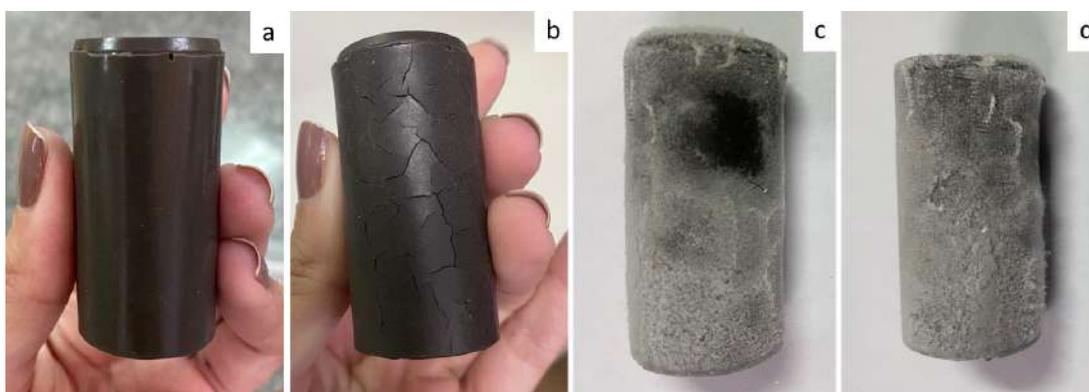


Figura 20 – Amostra de geopolímero GeoE1: (a) após desenformada; (b) fissuração da amostra; (c) manchas de coloração branca; (d) aumento de manchas brancas na amostra (Autora, 2024)

Inicialmente, levantou-se a hipótese de uma contaminação da escória por matéria orgânica, que pudesse estar gerando fungos na amostra do geopolímero. Por conta disso, a escória foi "lavada" com álcool isopropílico e colocada em estufa para produção de nova amostra (GeoE2).

A pasta de cimento geopolimérico GeoE2, após a "lavagem" da escória, também apresentou fissuras e manchas brancas em sua superfície. No entanto, a aparência nessa amostra foi de pequenos cristais brancos, conforme a Figura 21. Outras pesquisas de geopolímeros já haviam mencionado a ocorrência de fissuração (93, 11) e, conforme relatado pelos autores, podem ser originárias da retração por secagem, excesso de ativador ou decorrentes do processo de cura. Os pequenos cristais podem configurar sinais de eflorescência no geopolímero, provenientes da deposição de sais minerais de coloração branca (11).

Com a produção do geopolímero com 10M de Na_2SiO_3 , sem o uso do NaOH, obteve-se um produto final ainda com sinais de eflorescência, no entanto, em quantidades menores, conforme apresentado na Figura 22. Possivelmente a exclusão do NaOH na



Figura 21 – Amostra de geopolímero GeoE2 (Autora, 2024)

sintetização dessas amostras possibilitou uma redução de Na_2O no geopolímero GeoE3, contribuindo para esse resultado.



Figura 22 – Amostra de geopolímero GeoE3 (Autora, 2024)

Com a redução da molaridade do Na_2SiO_3 para 8M, as amostras apresentaram um resultado positivo, sem fissuração e sem sinais de eflorescência, mesmo após os 28 dias de cura. As amostras GeoE4 (Figura 23) testadas para as três razões s/l apresentaram características físicas positivas, indicando que o Na_2O em excesso nas amostras anteriores estava causando eflorescência. O sódio não reagido do ativador estava sendo lixiviado para a superfície do geopolímero em forma de cristais carbonatados, causando fissuras e, conseqüentemente, reduzindo a resistência.

As amostras Geo4 de 1.6 apresentaram excelente trabalhabilidade, no entanto, pela maior quantidade de líquido em sua proporção, o tempo de pega foi de aproximadamente 60 a 90 minutos. Já as amostras de 1.8 também apresentaram ótima trabalhabilidade e



Figura 23 – Amostra de geopolímero GeoE4 (Autora, 2024)

um tempo de pega reduzido, de não mais do que 60 minutos, ficando ambas dentro do previsto na literatura (63). Já as amostras de razão 2.0, não apresentaram boas condições de trabalhabilidade, devido a baixa quantidade de líquido presente. Seu tempo de pega foi bem rápido, de aproximadamente 20 minutos, o que dificultou um pouco o processo produtivo (Figura 24).



Figura 24 – Trabalhabilidade das amostras: (a) 1.6; (b) 1.8; (c) 2.0. (Autora, 2024)

4.2.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos cristais

Na análise em MEV das partículas brancas que surgiram nas amostras GeoE3, foi possível observar uma morfologia de cristais, aparentando um efeito de eflorescência. Além disso, nota-se uma concentração de sódio na região analisada conforme pode ser observado nas Figuras 25 e 26. Uma pesquisa realizada referente à eflorescência em geopolímeros apresentou resultados similares à micrografia obtida (93).

A análise semiquantitativa pelo EDS realizado, comprova que os cristais observados na micrografia do MEV são partículas ricas em sódio e oxigênio, confirmando a presença do óxido de sódio proveniente da solução alcalina utilizada (Figura 26).

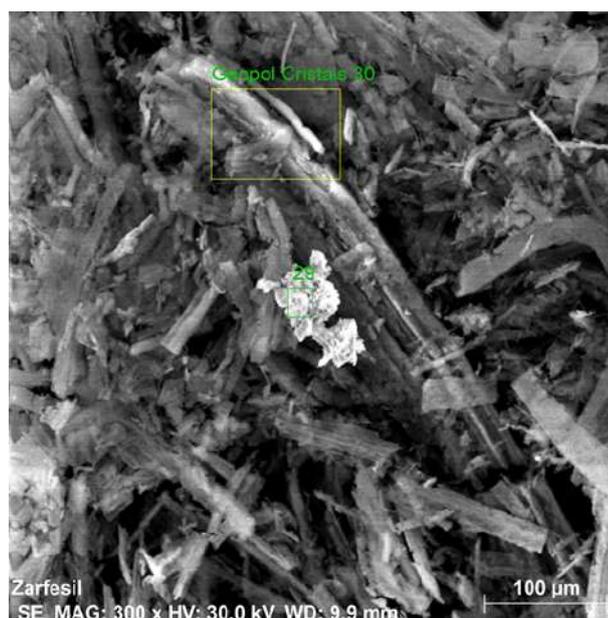


Figura 25 – Micrografia (MEV) dos cristais (Autora, 2024)

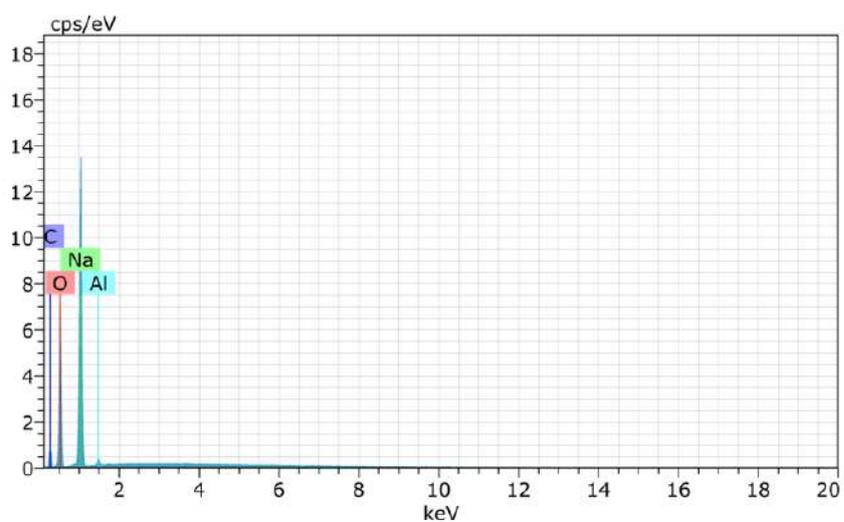


Figura 26 – Análise semiquantitativa dos cristais por EDS (Autora, 2024)

4.2.2 Determinação da porosidade e densidade aparente dos geopolímeros

A Tabela 6 apresenta os resultados das densidades aparentes e porosidades dos geopolímeros ao longo dos tempos de cura avaliados. Os valores foram obtidos por meio da média de 5 amostras para cada grupo.

Tabela 6 – Densidade aparente e porosidade dos geopolímeros

Grupo	Cura (dias)	Densidade Aparente (g/cm ³)	Porosidade (%)
1.6	7	1,91 ± 0,02	52,10 ± 4,11
	14	1,81 ± 0,10	54,01 ± 4,46
	28	1,69 ± 0,01	59,30 ± 4,88
1.8	7	2,00 ± 0,02	50,36 ± 3,46
	14	1,87 ± 0,20	53,90 ± 3,29
	28	1,77 ± 0,03	56,32 ± 3,27
2.0	7	2,00 ± 0,02	49,90 ± 8,97
	14	1,88 ± 0,20	51,10 ± 9,11
	28	1,82 ± 0,02	55,06 ± 8,77

Os resultados indicam que as amostras com razão de 2.0 apresentaram densidade aparente superior, o que está em consonância com os resultados esperados, devido à maior quantidade de material sólido em sua composição. À medida que a quantidade de escória nas amostras aumenta, observa-se uma tendência de elevação da densidade. Isso pode ser atribuído à finura dos grânulos da escória, que favorece um melhor preenchimento dos vazios entre as partículas, resultando em um melhor empacotamento. Essa característica não apenas impacta a densidade, como também desempenha um papel importante na resistência à compressão e no módulo de elasticidade do material, conforme discutido por Dias et al.(82).

No que diz respeito à porosidade, as amostras apresentaram uma média de 54% ao longo das diferentes idades analisadas. Observou-se que a quantidade de água utilizada na mistura tem um efeito considerável sobre a porosidade do material. As amostras com razão 1.6, que incorporaram uma maior proporção de água em sua composição, demonstraram níveis de porosidade ligeiramente superiores. O aumento na porosidade dessas amostras pode ser atribuído à formação de vazios durante o processo de cura. A maior quantidade de água na mistura cria uma maior separação entre as partículas, resultando em uma estrutura menos compacta. Com mais água disponível, a mistura pode não se consolidar de forma tão densa, permitindo que mais vazios se formem. Isso evidencia que a relação entre a quantidade de água e a microestrutura do material é um fator relevante para o seu desempenho.

4.2.3 Difração de Raios X (DRX)

O difratograma dos geopolímeros apresentaram picos característicos de materiais cimentícios (Figura 27), tais como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (104, 18). O C-S-H é considerado o constituinte majoritário em pastas de cimento e uma fase muito importante nos geopolímeros, influenciando diretamente nas propriedades microestruturais e mecânicas do produto final (105). A formação do gel C-S-H nas amostras, representado pela fase Tobermorita, é um dos indicativos de que houve geopolymerização e que as fases apresentadas na escória sofreram uma reorganização da estrutura cristalina durante a síntese. Pode ser observado que houve uma redução do percentual da fase Calcita quando comparado ao resultado da escória (104). Também foi possível identificar, em algumas regiões dos geopolímeros, a presença do C-S-H nas análises da microestrutura no MEV e no EDS das regiões observadas.

Tabela 7 – Fases cristalinas dos geopolímeros

Tempos de cura	Fases	Fichas	Fórmula Química
7 dias (1.6, 1.8, 2.0)	Calcita	96-901-4345	$Ca_6C_6O_{18}$
	Gehlenita	96-900-6114	$Ca_4Mg_{0.42}Al_{3.08}Si_{2.48}O_{14}$
	Tobermorita	96-900-5448	$Ca_5Si_6O_{18}$
	Akermanita	96-900-6115	$Ca_4Mg_{0.92}Al_{1.98}Si_{3.04}O_{14}$
	Hematita	96-901-4881	$Fe_{12}O_{18}$
14 dias (1.6, 1.8, 2.0)	Calcita	96-901-4345	$Ca_6C_6O_{18}$
	Gehlenita	96-900-6114	$Ca_4Mg_{0.42}Al_{3.08}Si_{2.48}O_{14}$
	Tobermorita	96-900-5448	$Ca_5Si_6O_{18}$
	Akermanita	96-900-6115	$Ca_4Mg_{0.92}Al_{1.98}Si_{3.04}O_{14}$
	Hematita	96-901-4881	$Fe_{12}O_{18}$
28 dias (1.6, 1.8, 2.0)	Calcita	96-901-4345	$Ca_6C_6O_{18}$
	Gehlenita	96-900-6114	$Ca_4Mg_{0.42}Al_{3.08}Si_{2.48}O_{14}$
	Tobermorita	96-900-5448	$Ca_5Si_6O_{18}$
	Akermanita	96-900-6115	$Ca_4Mg_{0.92}Al_{1.98}Si_{3.04}O_{14}$
	Hematita	96-901-4881	$Fe_{12}O_{18}$
	Maghemita	96-901-2693	$Fe_{21.33}O_{32}$

Os C-S-H são complexos e apresentam picos de baixa intensidade para detecção por DRX. A Tobermorita, presente no difratograma dos geopolímeros, é considerada uma das fases muito presentes. O sistema de hidratação do cimento, é dinâmico, ou seja, possui fases se dissolvendo enquanto outras estão se formando ou se transformando, pois são metaestáveis (18). Essa dinâmica explica a variação na intensidade dos picos da Tobermorita, que são representativos do C-S-H ao longo do processo de cura das amostras. Essa complexidade leva alguns autores a empregar técnicas complementares para aprofundar a compreensão da estrutura e dos mecanismos de polimerização dos silicatos, tanto em cimentos tradicionais quanto em geopolímeros(106).

O pico de maior intensidade nos geopolímeros foi atribuído à presença de fases

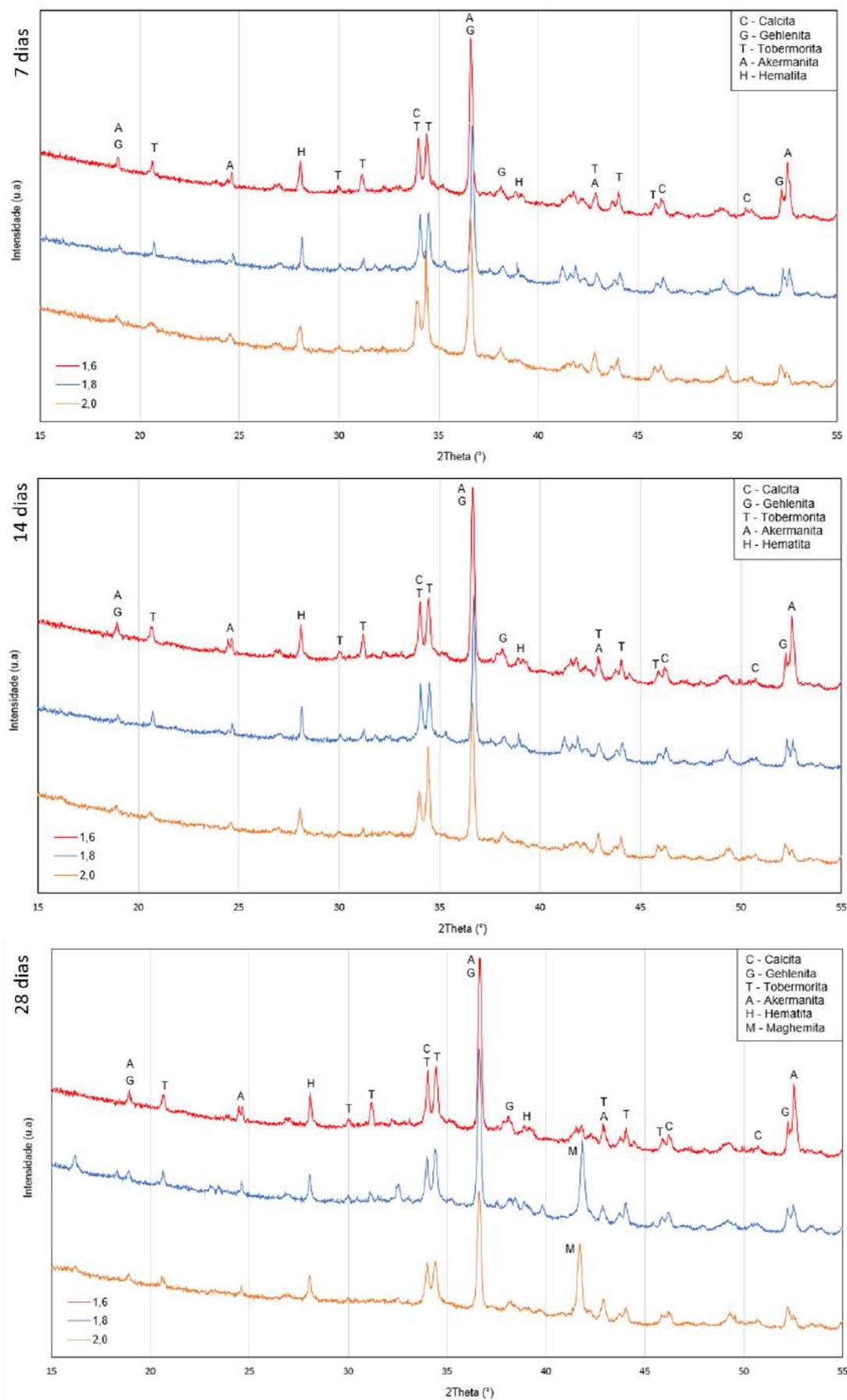


Figura 27 – Difractogramas dos geopolímeros em 7, 14 e 28 dias (Autora, 2024)

Akermanita ($Ca_2MgSi_2O_7$) e Gehlenita ($Ca_2Al_2SiO_7$), assim como na escória. Essas fases são comuns em geopolímeros e configuram boas propriedades ao material como resistência mecânica e à corrosão, além de maior durabilidade (97). Os resultados da FTIR corroboram com essa análise apontando bandas em torno de 1000-1100 cm^{-1} (grupos Si-O) que estão relacionadas tanto à Akermanita quanto à Gehlenita. Além dessas, também conta com a presença de bandas em torno de 550-600 cm^{-1} (grupos Al-O) que podem estar relacionadas à Gehlenita.

Apesar de ambas as fases configurarem boas propriedades aos geopolímeros, se a matriz não incluir fases com propriedades complementares, como maior flexibilidade ou menor porosidade, por exemplo, o desempenho do material pode apresentar-se limitado para algumas aplicações específicas (107). O fato dessas fases presentes majoritariamente na escória terem se mantido nos geopolímeros pode indicar um desequilíbrio em relação a formação de outras fases importantes. A potencialização dessas fases pode ter contribuído para o desenvolvimento de um material com baixa tenacidade e, portanto, muito frágil. Em uma análise visual no aspecto de algumas amostras foi possível observar microfissuras e poros formados na matriz (Figura 28), o que impacta na resistência à compressão, conforme apresentado na seção 4.2.6.



Figura 28 – Geopolímeros com presença de microfissuras e porosidade (Autora, 2024)

Normalmente, as fases Akermanita e Gehlenita, presentes na escória, reagem com o silicato de sódio do ativador, resultando na liberação de íons de silicato e aluminato que se polimerizam para formar um outro gel característico de geopolímeros, denominado N-A-S-H (73). Este gel refere-se a um sistema que contém sódio (Na), alumínio (Al) e silício (Si) em sua estrutura. Ele contribui para a resistência mecânica e a durabilidade, além de reduzir a porosidade do geopolímero (107). No entanto, a intensidade do pico das fases Akermanita e Gehlenita foi praticamente mantida após a geopolimerização, indicando que possivelmente o gel N-A-S-H não foi formado em quantidades significativas. A ausência

dessa fase pode ter contribuído negativamente para que as propriedades do geopolímero não tenham sido aprimoradas em sua totalidade.

Após os 28 dias de cura, as amostras 1.8 e 2.0 apresentaram um aumento significativo no pico característico da Maghemita (γFe_2O_3) (108). A maghemita, um óxido de ferro comumente encontrado em minérios de ferro, pode ser formada durante o processo de cura dos geopolímeros (109). Os resultados da análise de FTIR (seção 4.2.4) corroboram essa observação, mostrando que as amostras de 1.8 e 2.0 apresentaram bandas de Fe-O, características da Maghemita, com intensidades mais elevadas ao longo do processo de cura. Portanto, a ativação com soluções alcalinas promove a dissolução de componentes da escória, possibilitando a transformação do óxido de ferro em Maghemita, o que pode impactar nas propriedades do material.

4.2.4 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Na Figura 29, são apresentados os espectros de transmissão na região do infravermelho das amostras com as três razões s/l (1.6, 1.8, 2.0) para os tempos de cura de 7, 14 e 28 dias, respectivamente.

Nos espectros dos geopolímeros para os três tempos de cura analisadas, nota-se a presença de bandas entre 3433-3451 cm^{-1} e 1641-1655 cm^{-1} , similares às encontradas na escória. A maior intensidade dessas bandas nos geopolímeros em relação à escória pode ser justificada pela adição de água da solução, além da umidade já presente na escória. Essas bandas estão relacionadas à vibração de estiramento O-H de moléculas de água adsorvidas ou ligadas na superfície do geopolímero, indicando que a água pode não ter sido completamente consumida durante a geopolymerização (101). É possível observar que de 7 para 14 dias há inicialmente uma redução da intensidade dessas bandas, devido à processos de absorção da água, no entanto, até os 28 dias, as bandas apresentam-se mais intensas do que aos 14 dias, indicando uma possível absorção de umidade do ambiente, devido ao maior tempo de exposição. Para o geopolímero de 2.0 a intensidade dessas bandas é menor nos três tempos de cura, o que pode estar relacionado à menor quantidade de água utilizada no processamento dessas amostras.

As bandas entre 1427-1445 cm^{-1} , próximas às encontradas na escória antes da geopolymerização, estão relacionadas às vibrações de carbonatos (98). Esse grupo funcional indica que o geopolímero pode possuir algum grau de carbonatação, provavelmente decorrente da exposição ao CO_2 . Observou-se um aumento na intensidade dessas bandas aos 28 dias de cura, principalmente para as amostras de 1.6, com maior quantidade de água, sugerindo um possível avanço da carbonatação ao longo do tempo exposto ao ambiente. Apesar de não terem sido visíveis sinais de eflorescência nessas últimas amostras (Geo4), a intensificação dessas bandas podem ser apontadas como um dos fatores responsáveis por propiciar o surgimento desse fenômeno. Se a escória já apresentava carbonatação antes da

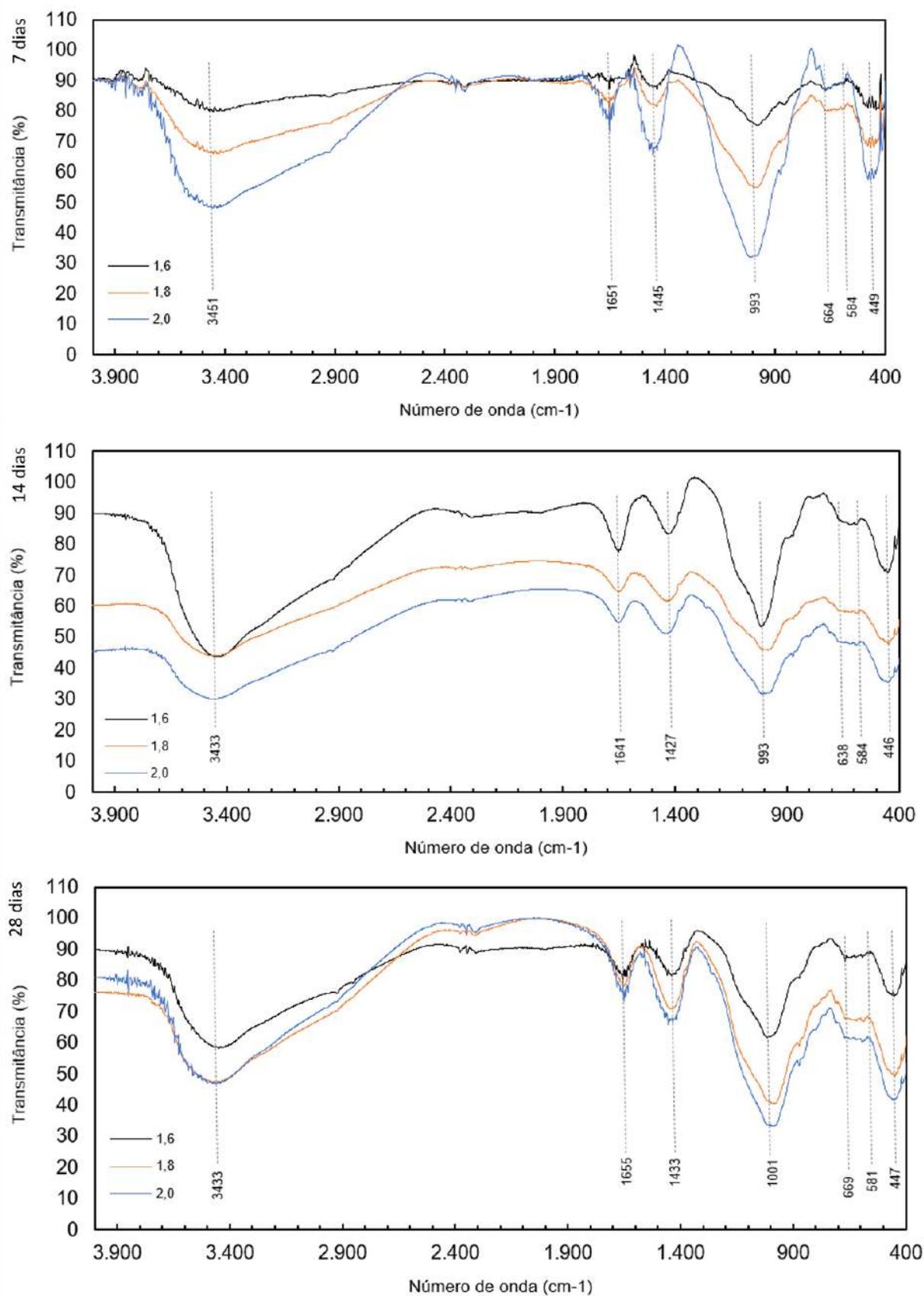


Figura 29 – Espectro de FTIR dos geopolímeros em 7, 14 e 28 dias. (Autora, 2024)

geopolimerização, os íons podem migrar para a superfície e cristalizar na forma de sais após a cura, resultando em eflorescência. Esses sais podem ser carbonatos de sódio ou carbonatos de cálcio, com o sódio vindo do próprio ativador alcalino (silicato de sódio) (11).

As bandas entre 993-1001 cm^{-1} (estiramento assimétrico Si-O-Si) apresentaram um leve deslocamento em relação ao espectro da escória, indicando uma reorganização da rede geopolimérica de silicatos, decorrente do processo de geopolimerização. As bandas observadas em 581-584 cm^{-1} e 446-449 cm^{-1} , podem ser características da vibração de γ -Fe-O, conforme observado por Darezereshki(110). As bandas encontradas no intervalo de 700-400 cm^{-1} , associadas a ligações Si-O ou Al-O, mantiveram-se, indicando que os componentes principais da estrutura (Si e Al) foram preservados. No geral, as principais ligações vibracionais (Si-O-Si, Al-O-Si) continuam a ser as mesmas, independente dos diferentes tempos de cura e razões s/l dos geopolímeros. As bandas apresentaram uma maior variação apenas de intensidade, como já esperado. A amostra com maior quantidade de solução, a 1.6, demonstrou picos mais intensos dessas bandas, indicando que a solução estava mais disponível no meio para o processo de geopolimerização, garantindo maior formação dessas ligações. O fato de os números de onda permanecerem praticamente os mesmos, indica que as ligações químicas e os grupos funcionais presentes não mudaram significativamente.

Entretanto, a variação na intensidade com o passar do tempo, sugere que a quantidade de ligações da matriz geopolimérica possa ter aumentado ao longo do tempo de cura. Nos primeiros tempos, o material pode estar em um estágio menos consolidado, com a formação incompleta de algumas ligações. A cura mais avançada resulta em uma estrutura mais densa e organizada, com maior presença das ligações. Portanto, o aumento da intensidade para 28 dias de alguns grupos funcionais, sem mudança no número de onda, indica que há mais ligações equivalentes ou uma maior concentração de grupos funcionais responsáveis por essas vibrações, o que pode estar relacionado à continuidade das reações de geopolimerização ao longo do tempo. Os resultados obtidos também corroboram com os resultados do ensaio mecânico, demonstrando a influência do processo de cura na evolução da estrutura e nas propriedades finais do geopolímero. Portanto, a maturação estrutural, refletida pelo aumento da transmitância (intensidade), pode estar associada a melhorias nas propriedades mecânicas do material como a resistência à compressão.

4.2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram analisadas as microestruturas dos geopolímeros das diferentes razões s/l (1.6, 1.8, 2.0) ao longo dos tempos de cura (7, 14 e 28 dias) com aumento de 1000X, 2000X e 5000X.

As microestruturas apresentaram aspecto rugoso e heterogêneo em sua maioria. Nas

amostras com 7 dias de cura (Figura 30), é possível observar muitas partículas dispersas ao longo da matriz, indicando possíveis materiais ainda não reagidos, devido ao tempo de cura muito recente, conforme observado por outros autores também (11). Além disso, observa-se que a matriz de razão 1.6 possui uma quantidade considerável de fissuras, enquanto as de 1.8 e, principalmente de 2.0, encontram-se mais coesas para o mesmo tempo de cura. Foi possível identificar a formação do gel C-S-H em algumas regiões das amostras. O EDS dessas regiões confirmou a presença acentuada de silício, cálcio e oxigênio, principais elementos para a formação do gel C-S-H (Figura 31). Apesar disso, ainda existem grandes quantidades de partículas não reagidas ou reações incompletas, revelando uma distribuição não uniforme do processo de reação, o que explica a variação de resistência à compressão em amostras de misturas idênticas, conforme observado por Al-Husseinawi et al.(102).

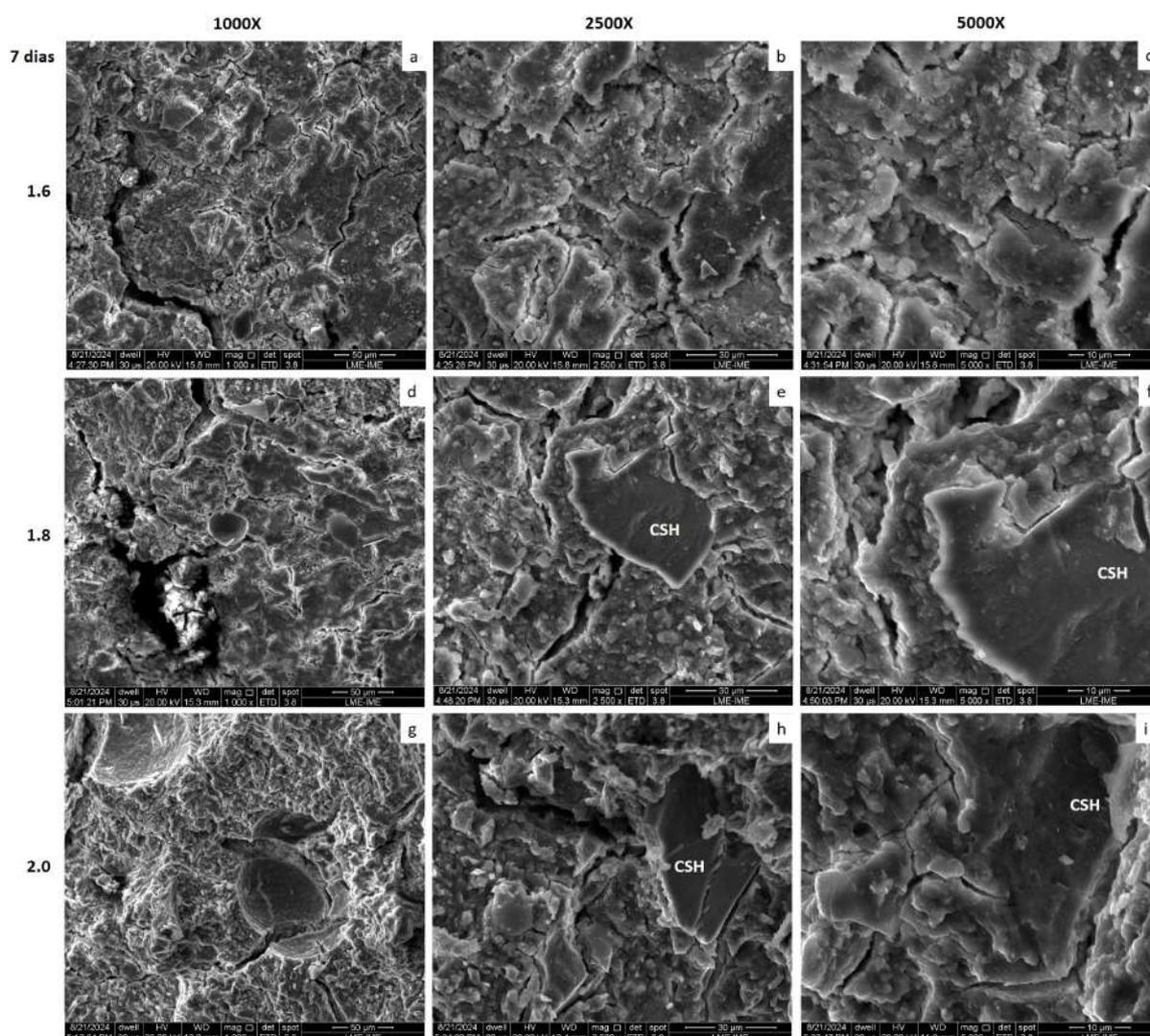


Figura 30 – Micrografias dos geopolímeros aos 7 dias de cura. (Autora, 2024)

Aos 14 dias de cura (Figura 32), a amostra de 1.6 foi a que obteve uma evolução mais aparente, apresentando uma matriz bem mais coesa do que aos 7 dias. Apesar disso,

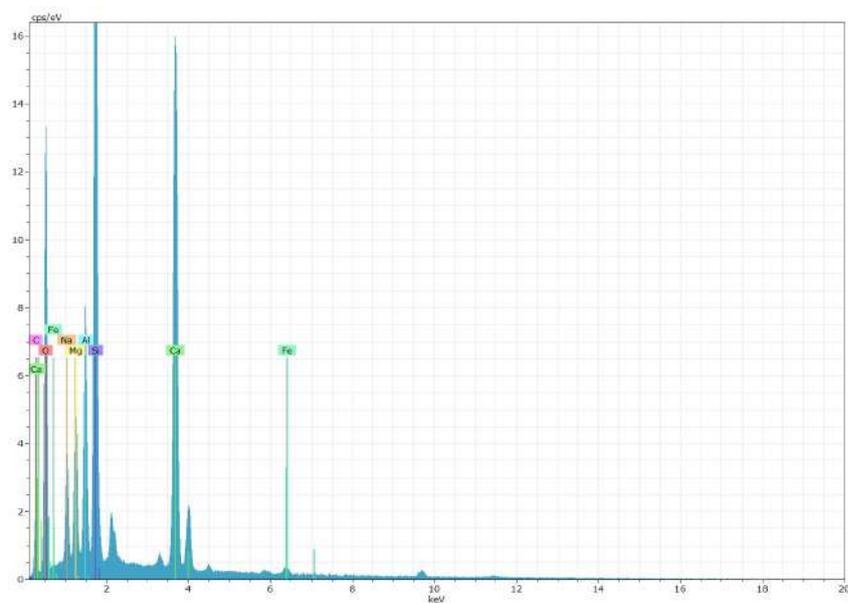


Figura 31 – EDS do geopolímero (1.8 - 7 dias) com evidências da formação do gel CSH. (Autora, 2024)

ainda apresentou partículas não reagidas ao longo da matriz. As matrizes de 1.8 e 2.0, ainda que não tenham apresentado significativas modificações, reduziram o espaçamento das fissuras. Na amostra de 1.8 notou-se novamente a presença de fases C-S-H. Na amostra 2.0 essas fases não ficaram tão evidentes quanto no tempo de cura anterior, o que pode ser explicado pelo comportamento dinâmico que apresentam (fases metaestáveis), conforme exposto por Taylor(18).

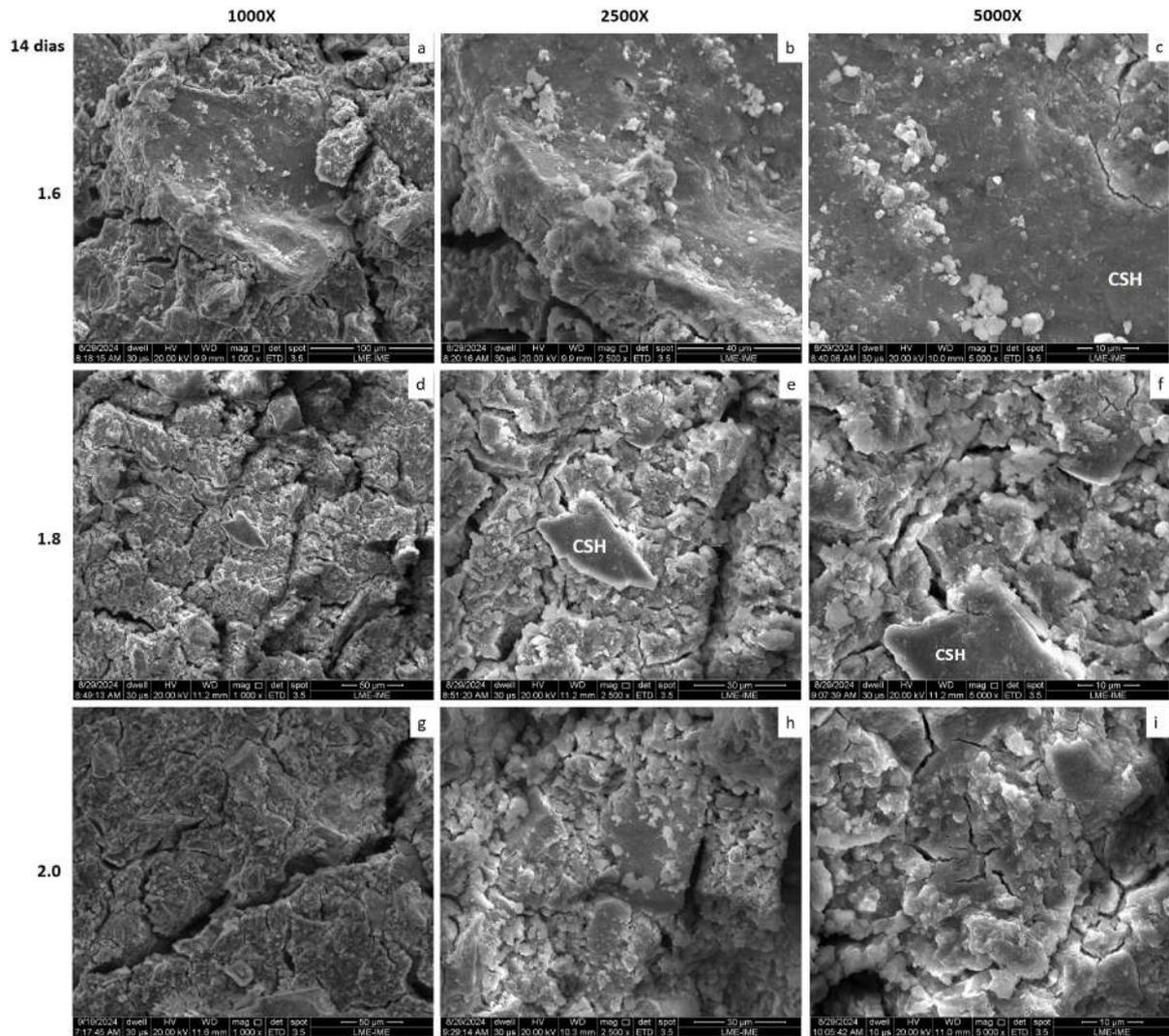


Figura 32 – Micrografias dos geopolímeros aos 14 dias de cura. (Autora, 2024)

Aos 28 dias de cura (Figura 33), nota-se a formação da fase C-S-H para as amostras de 1.6. Apesar disso, observou-se a ocorrência de fissuras mais acentuadas, o que pode estar associado à retração causada pela evaporação da água durante o processo de cura, conforme observado por Wang et al.(11). Para as amostras de 1.8, a matriz apresentou-se mais coesa e com maior formação da fase C-S-H. Para os geopolímeros com razão 2.0 notou-se regiões maiores com formação desse gel, caracterizando uma matriz mais densa e homogênea. Esse fator corrobora o aumento de resistência mecânica, conforme demonstrado com os ensaios de compressão axial.

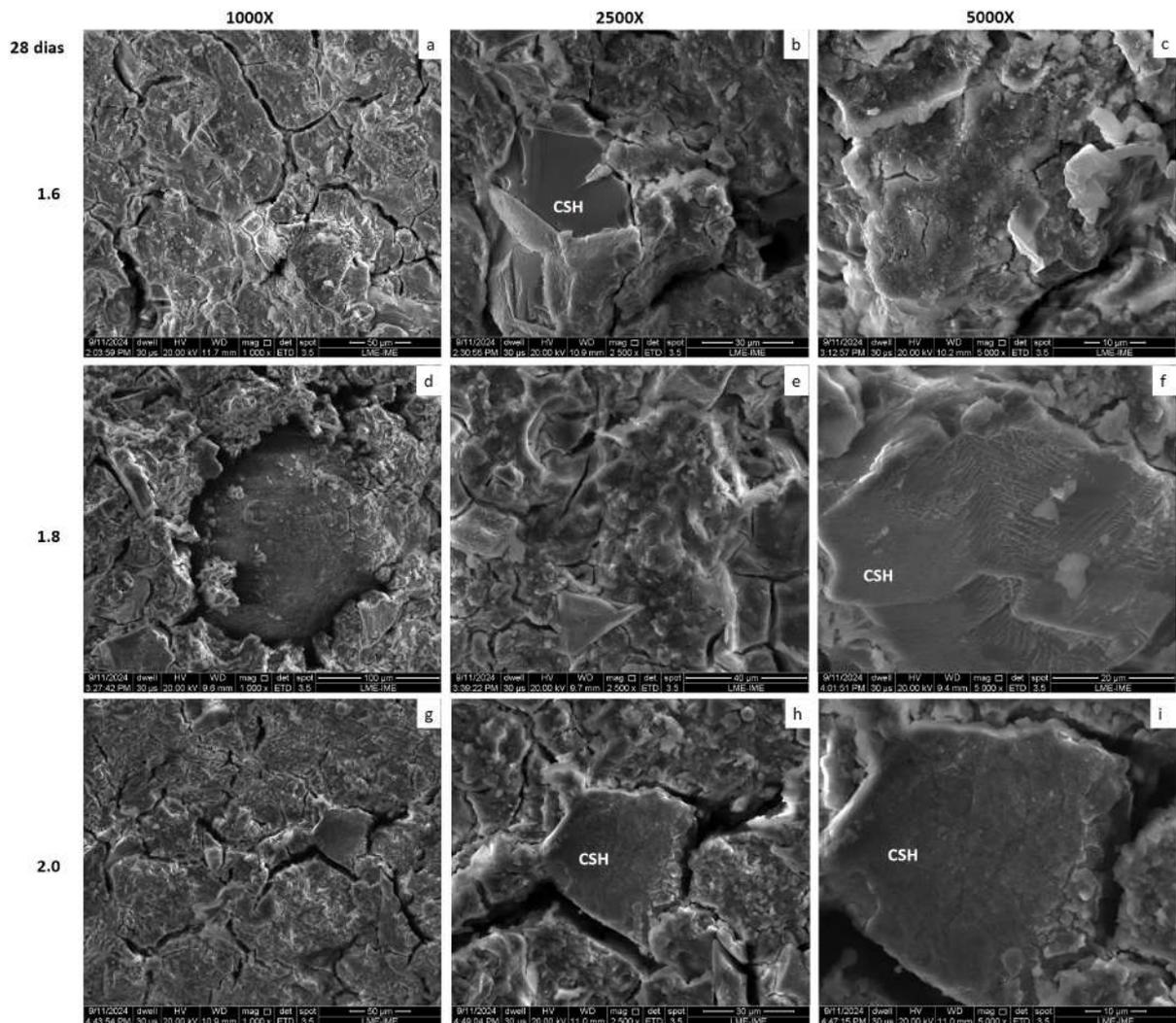


Figura 33 – Micrografias dos geopolímeros aos 28 dias de cura. (Autora, 2024)

4.2.6 Resistência à compressão

As resistências à compressão dos geopolímeros para as razões 1.6, 1.8 e 2.0, para os três tempos de cura (7, 14 e 28 dias) estão representadas na Figura 34 e na Tabela 8. Esses resultados apresentam a média aritmética dos valores de cinco amostras de cada grupo, com o desvio padrão, para cada tempo de cura.

Os dados indicam um aumento contínuo da resistência à compressão com o tempo, o que é um comportamento esperado em pastas de cimento, argamassas, concretos e geopolímeros. Esses resultados sugerem que o tempo de cura contribui significativamente para o aumento de resistência, o que pode ser atribuído ao processo de geopolymerização, que continua a ocorrer nas primeiras semanas após a sintetização.

Foi possível observar que a razão s/l tem um impacto direto sobre a resistência do material. Para as amostras de razão 1.6 os valores são relativamente baixos, com

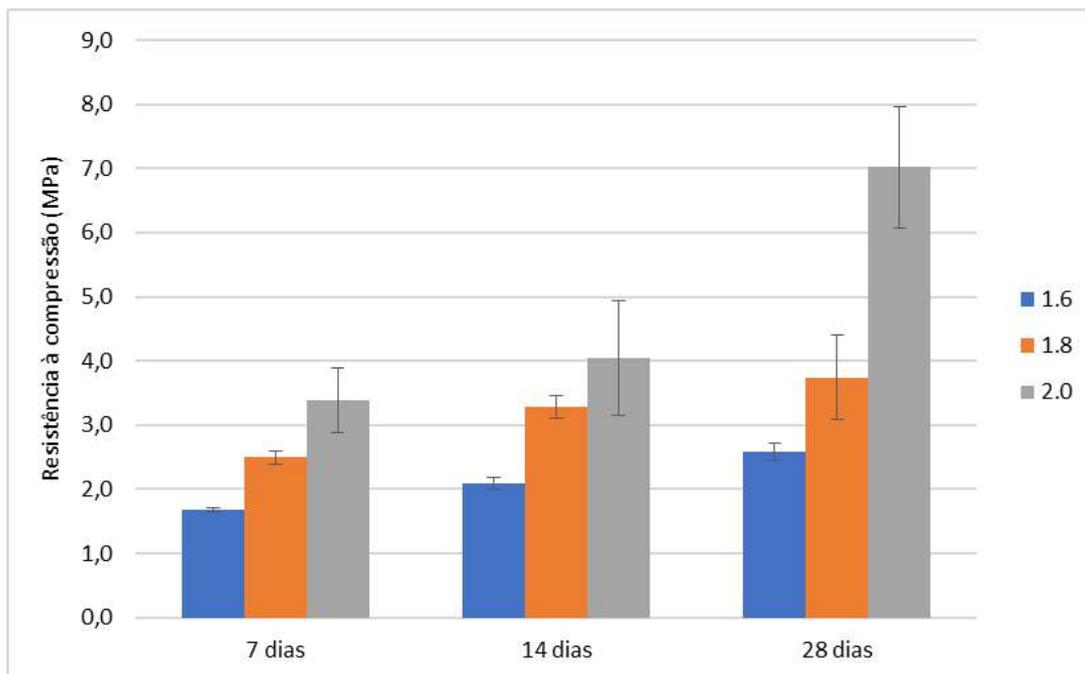


Figura 34 – Resistência à compressão dos geopolímeros. (Autora, 2024)

Tabela 8 – Resistência à compressão dos geopolímeros

Grupo	7 dias	14 dias	28 dias
1.6	1,69 MPa ± 0,03	2,09 MPa ± 0,07	2,58 MPa ± 0,11
1.8	2,49 MPa ± 0,09	3,29 MPa ± 0,15	3,74 MPa ± 0,57
2.0	3,39 MPa ± 0,43	4,05 MPa ± 0,77	7,02 MPa ± 0,82

a resistência máxima alcançando 2,6 MPa aos 28 dias, representando um aumento de 52,9%. Isso pode indicar que uma proporção maior de líquido em relação ao sólido pode resultar em uma matriz menos densa e, conseqüentemente, menos resistente. Para a razão de 1.8, os valores de resistência aumentaram 48% até os 28 dias, indicando que uma redução na proporção de líquido pode resultar em uma estrutura mais compacta da matriz, proporcionando um desempenho mecânico superior. Para a razão de 2.0, a resistência é significativamente mais alta, especialmente aos 28 dias, alcançando 7,0 MPa, o que representa um aumento de 105,9% em relação ao tempo inicial de cura. Isso sugere que uma menor proporção de líquido favorece a formação de uma estrutura mais densa e coesa ao longo do tempo de cura.

As amostras de 1.8 e 2.0, embora tenham apresentado valores de resistência superiores aos 1.6, ainda ficaram aquém dos resultados obtidos em outras pesquisas com geopolímeros, onde se alcançou uma média de 30 a 40 MPa para pastas de cimento geopolimérico (3). Contudo, a pesquisa de Apolonio(47) revelou resultados menores, com resistências variando entre 3,98 e 6,93 MPa aos 28 dias de cura, que aproximam-

se dos resultados obtidos nesta pesquisa. Os baixos valores de resistência podem ser justificados por alguns fatores observados. Um deles é a elevada porosidade das matrizes, cuja ausência de um equipamento vibratório no processo produtivo, contribuiu para formação de pequenas bolhas no produto final, resultando no aumento da porosidade. Ainda que tenham apresentado melhores resultados de resistência, as amostras de 2.0 apresentaram comprometimento na trabalhabilidade devido à alta proporção de sólidos em relação ao líquido, dificultando a homogeneização e potencialmente resultando na formação de bolhas. Isso contribuiu negativamente para que os resultados não atingissem valores superiores.

A porosidade em geopolímeros tem sido amplamente discutida na literatura e pode também estar relacionada à presença de impurezas na escória de alto-forno, como os óxidos de ferro. Essas impurezas podem interferir negativamente na resistência mecânica do geopolímero ao atuar como formadores de poros, especialmente quando sua concentração ultrapassa 55% (111) ou 60% (3) da massa, conforme destacado pelos autores. A análise de FRX confirmou que a escória utilizada continha uma quantidade significativa de óxido de ferro. O aumento do volume de poros resulta na diminuição da densidade do material, levando a uma redução na resistência. À medida que a quantidade de poros aumenta, a quantidade de pasta geopolimérica disponível para formar ligações estruturais diminui, tornando o material mais suscetível a rupturas sob compressão (112). Esses fatores podem ter contribuído significativamente para que os resultados de resistência não atingissem valores mais elevados.

Além disso, o material mostrou vulnerabilidade a baixas temperaturas nos primeiros dias de cura. A exposição do material ao ambiente refrigerado do laboratório pode ter afetado a integridade superficial de algumas amostras, que apresentaram pequenas fissuras logo nos primeiros minutos de exposição. A escória de alto forno, quando em elevada concentração no geopolímero, favorece a formação do gel C-S-H na reação, como confirmado pelas análises de MEV e DRX. Embora o C-S-H seja um produto benéfico para a resistência, a desidratação rápida pode induzir a fissuração do material, bem como ocorre com o cimento, que necessita de hidratação nas primeiras horas de cura, para que não ocorram fissuras de retração. Essa situação provavelmente influenciou os resultados mecânicos obtidos, sugerindo que uma outra condição de cura poderia ter mitigado esses efeitos, tais como cura em estufa ou cura em ambientes com umidade controlada, a fim de evitar a rápida perda de água e conseqüente formação de fissuras.

4.2.6.1 Módulo de Elasticidade

Os valores obtidos de Módulo de Elasticidade dos geopolímeros para os três grupos, nos três tempos de cura analisadas estão representados na Tabela 9 com o respectivo desvio padrão .

O aumento do Módulo de Elasticidade para maiores razões s/l e tempos de cura, indica o desenvolvimento de matrizes mais densas e compactas, como pode ser observado nas análises de MEV. Portanto, quanto maior o Módulo de Elasticidade, mais resistentes tornam-se as matrizes, conforme demonstram os resultados do ensaio de compressão.

Tabela 9 – Módulo de Elasticidade dos Geopolímeros

Grupo	7 dias	14 dias	28 dias
1.6	59,08 MPa \pm 3,04	93,79 MPa \pm 14,60	168,27 MPa \pm 2,47
1.8	87,99 MPa \pm 5,82	169,79 MPa \pm 20,52	204,05 MPa \pm 22,97
2.0	164,39 MPa \pm 25,57	260,92 MPa \pm 32,42	477,19 MPa \pm 80,28

4.3 Viabilidade de aplicação do geopolímero na construção civil

Com base nos resultados das caracterizações dos geopolímeros, especialmente nos ensaios de resistência à compressão, verificou-se que os materiais, em sua forma atual, não atendem aos requisitos para aplicações estruturais. Os valores obtidos permanecem abaixo do mínimo de 25 MPa aos 28 dias, conforme exigido pela norma NBR 11578 (43) para materiais cimentícios convencionais. Vale ressaltar que essa referência considera a resistência de argamassas, enquanto o presente estudo avaliou uma pasta geopolimérica, que apresenta resistências mecânicas inferiores devido à ausência de agregados.

Para viabilizar o uso do geopolímero em aplicações estruturais, algumas possibilidades de adequações podem ser exploradas. Isso inclui a adição de agregados finos (areia) para formulação de argamassas, bem como uma reformulação nas proporções dos materiais, como a razão s/l. Além disso, a incorporação de materiais como metacaulim ou cinzas volantes pode ser investigada com intuito de reduzir a razão Si/Al. Também é importante avaliar diferentes processos de cura, como a cura em estufa ou em ambiente de umidade controlada, a fim de testar a viabilidade do material em aplicações estruturais.

No entanto, os geopolímeros porosos apresentam um bom potencial para sua utilização como materiais de construção leves tais como isolamento térmico e isolamento acústico (113). Adicionalmente, os geopolímeros produzidos também possuem aplicabilidade como argamassas de revestimento. A norma NBR 13281 (114) estabelece classes de resistência à compressão para argamassas (Tabela 10), que são fundamentais para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. Dentre as classes apresentadas, os três geopolímeros se enquadram, ainda que em classes distintas, na aplicação para argamassas de revestimento. O geopolímero de razão 1.6, aos 28 dias de cura, atende aos valores das classes P2 e P3, enquanto os de razão 1.8 enquadram-se na classe P3 e, o de razão 2.0, atende às classes P4 e P5.

Tabela 10 – Classes de resistência à compressão segundo a NBR 13281

Classe	Resistência à Compressão (MPa)
P1	< 2,0
P2	1,5 a 3,0
P3	2,5 a 4,5
P4	4,0 a 6,5
P5	5,5 a 9,0
P6	> 8,0

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, os resultados das caracterizações dos materiais trouxeram considerações importantes para a avaliação da viabilidade da aplicação dos geopolímeros como substitutos sustentáveis do cimento Portland.

As análises realizadas indicaram que a escória de alto forno configura-se como um aluminossilicato viável para a produção de geopolímeros, uma vez que possui em sua composição os elementos essenciais. No entanto, as análises de FRX mostraram que a razão Si/Al da escória (2,4) é um pouco superior à ideal para aplicações em argamassas estruturais. Além disso, a escória apresentou um percentual incomum de Na_2O , o que impactou negativamente as propriedades dos geopolímeros, tornando o material suscetível à ocorrência de eflorescências pelo excesso de sódio. Observou-se a formação de cristais na superfície dos primeiros testes, decorrente dessa patologia, caracterizada pela deposição de sais na superfície do material, com a perda de umidade. Esse fenômeno pode estar associado não só ao resultado incomum do Na_2O da escória, como também ao excesso de ativador e ao processo de cura adotado.

As caracterizações das pastas geopoliméricas confirmaram a ocorrência do processo de geopolimerização. Foi evidenciado por MEV uma matriz densa, resultante da dissolução e policondensação da escória. As análises de FTIR demonstraram resultados característicos de geopolímeros, conforme previsto na literatura. Observou-se a formação de grupos funcionais Si-O-Si e Si-O-Al, característicos desse tipo de material. A análise de DRX obteve resultados que também confirmaram a geopolimerização. Identificou-se a redução na intensidade de fases do material precursor, indicando que o material foi consumido no processo, bem como a formação do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), evidenciando que o cálcio reagiu com a SiO_2 na presença da solução alcalina. No entanto, o excesso de Tobermorita, que caracteriza esse gel, pode ter contribuído para a fragilidade da matriz, contribuindo, junto a impurezas, para a formação de fissuras e consequente redução de resistência.

As análises de MEV revelaram a presença de partículas não reagidas em maior quantidade nas amostras de razão 1.6, especialmente nos primeiros tempos de cura, o que pode estar relacionado à proporção dos materiais da reação ou ao processo de cura adotado. Esses resultados foram refletidos nas avaliações de resistência à compressão, que mostraram valores inferiores para as amostras com menor razão s/l nos tempos de cura mais recentes. Isso confirma a ideia de que uma matriz com menor quantidade de líquido tende a ser mais densa e, conseqüentemente, mais resistente. Embora as amostras com razão 2.0 apresentassem melhor resistência e uma matriz mais densa e coesa, a trabalhabilidade foi prejudicada, o que, junto às impurezas da escória, contribuiu para a formação de poros e

impediu a obtenção de resultados promissores para aplicações estruturais. No entanto, os geopolímeros produzidos podem ser utilizados na construção civil, como argamassas de assentamento, atendendo aos requisitos mínimos de resistência estabelecidos pela norma para algumas classes de aplicação.

Para que fosse possível uma aplicação estrutural, algumas medidas precisariam ser testadas, tais como a adição de outros materiais à escória, como fonte adicional de alumínio, a fim de reduzir a razão Si/Al. Isso poderia contribuir para a formação mais significativa de fases adjacentes à C-S-H, que pudessem melhorar as propriedades do geopolímero, diminuindo sua característica frágil. Além disso, a adaptação do processo de cura, para evitar a perda rápida de umidade, e a adaptação do processo produtivo, incluindo a vibração das amostras para minimizar a formação de bolhas, poderiam ser estratégias positivas. A adaptação da proporção entre material precursor e ativador também seria um teste importante para tentar obter maiores resistências, viabilizando o uso dos geopolímeros como cimento geopolimérico para aplicações estruturais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar as propriedades mecânicas dos geopolímeros com cura realizada em estufa ou em ambiente com umidade controlada;
- Avaliar as propriedades físico-químicas e mecânicas de geopolímeros com fonte adicional de alumínio para reduzir a razão Si/Al
- Avaliar o comportamento mecânico e o surgimento de eflorescências dos geopolímeros produzidos com diferentes proporções de materiais e ativadores.
- Avaliar as propriedades mecânicas de argamassas geopoliméricas obtidas pela adição de agregados finos (areia) à matriz.

REFERÊNCIAS

- 1 EKINCI, E.; KAZANCOGLU, Y.; MANGLA, S. K. Using system dynamics to assess the environmental management of cement industry in streaming data context. *Science of the total environment*, Elsevier, v. 715, p. 136948, 2020.
- 2 IGE, O. E.; OLANREWAJU, O. A.; DUFFY, K. J.; COLLINS, O. C. Environmental impact analysis of portland cement (cem1) using the midpoint method. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 7, p. 2708, 2022.
- 3 ALMEIDA, B. M. et al. Estudo das propriedades mecânicas e microestruturais de materiais cimentícios geopoliméricos produzidos a partir de metacaulim e escória de alto forno. Universidade Federal do Pará, 2023.
- 4 SUMMERBELL, D. L.; BARLOW, C. Y.; CULLEN, J. M. Potencial redução de emissões de carbono por melhoria de desempenho: Um estudo de caso da indústria de cimento. *Journal of Cleaner Production*, v. 135, p. 1327–1339, 2016.
- 5 PORTLAND, A. A. B. de C. *A Indústria do Cimento e Desenvolvimento do Brasil*. São Paulo: ABCP, 2014.
- 6 DAVIDOVITS, J. Geopolymer cement. a review. *Geopolymer Institute, Technical Papers*, v. 21, p. 1–11, 2013.
- 7 DAVIDOVITS, J. *Mineral polymers and methods of making them*. [S.l.]: Google Patents, 1982. US Patent 4,349,386.
- 8 DAVIDOVITS, J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+ Business Media BV . . . , v. 37, n. 8, p. 1633–1656, 1991.
- 9 MEHTA, A.; SIDDIQUE, R. Sustainable geopolymer concrete using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash: Strength and permeability properties. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 205, p. 49–57, 2018.
- 10 SITARZ, M.; HAGER, I.; CHOIŃSKA, M. Evolution of mechanical properties with time of fly-ash-based geopolymer mortars under the effect of granulated ground blast furnace slag addition. *Energies*, MDPI, v. 13, n. 5, p. 1135, 2020.
- 11 WANG, Y.; LIU, X.; ZHANG, W.; LI, Z.; ZHANG, Y.; LI, Y.; REN, Y. Effects of si/al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 244, p. 118852, 2020.
- 12 DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In: *First international conference on alkaline cements and concretes*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 1, p. 131–149.
- 13 SNIC. *RELATÓRIO SETORIAL– BALANÇO 2024*. 2024. 29 ago. de 2024. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-resultados-preliminares-ver.php?id=99>>.
- 14 ABREU, S. F.; MENDES, J. C.; FRANCO, R. R. Recursos minerais do brasil. In: *Recursos minerais do Brasil*. [S.l.]: Companhia Editora Nacional, 1973. p. 324–324.

- 15 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16697: Cimento portland — requisitos*. Brasil, 2018. 16 p.
- 16 PETRUCCI, E. G. R. Cimento portland. In: _____. *Concreto de Cimento Portland*. São Paulo, Brasil: [s.n.], rev. 1998.
- 17 LECOMTE, I.; HENRIST, C.; LIÉGEOIS, M.; MASERI, F.; RULMONT, A.; CLOOTS, R. (micro)-structural comparison between geopolymers, alkali-activated slag cement and portland cement. *Journal of the European Ceramic Society*, Elsevier, v. 26, n. 16, p. 3789–3797, 2006.
- 18 TAYLOR, H. F. W. *Cement Chemistry*. 2. ed. London: Thomas Telford Ltd, 1997. 679 p.
- 19 MORAIS, B. B. Análise das propriedades do concreto com variação dos tipos de cimento. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, v. 01, n. 05, p. 05–25, 2020.
- 20 PEREIRA, C. Tipos de cimento: Características e especificações. *Escola Engenharia*, 2013.
- 21 HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Dosagem dos concretos de cimento portland. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 439–471, 2005.
- 22 HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento portland. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 905–944, 2005.
- 23 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR NM67: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Brasil, 1998. 8 p.
- 24 TÉCNICAS, A. B. de N. *Projeto de Estruturas de Concreto — Procedimento*. Rio de Janeiro, Brasil, 2014. Norma Brasileira.
- 25 BARATA, N. T. B. e Euler Arruda Junior e M. Produção de cimentos de baixo impacto ambiental: perspectivas para a região amazônica. *Novos Cadernos NAEA*, v. 26, n. 2, 2023. ISSN 2179-7536. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/view/11352>>.
- 26 BRAGA, N. T. de S.; JUNIOR, E. S. A.; BARATA, M. S. Produção de cimentos de baixo impacto ambiental: perspectivas para a região amazônica. *Novos Cadernos NAEA*, v. 26, n. 2, 2023.
- 27 IEA, C. et al. Technology roadmap low-carbon transition in the cement industry. *France/WBCSD, Geneva, Switzerland. IEA, Paris*, 2018.
- 28 PEREIRA, D. S. D. T. *CONCRETO DE CIMENTO GEOPOLIMÉRICO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA PAVIMENTAÇÃO*. 202 p. Mestrado em Ciência dos Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- 29 HABERT, G.; LACAILLERIE, J. D. D.; ROUSSEL, N. An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of cleaner production*, Elsevier, v. 19, n. 11, p. 1229–1238, 2011.

- 30 UWASU, M.; HARA, K.; YABAR, H. World cement production and environmental implications. *Environmental Development*, Elsevier, v. 10, p. 36–47, 2014.
- 31 SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-co2 cement-based materials industry. *Cement and concrete Research*, Elsevier, v. 114, p. 2–26, 2018.
- 32 MELO, L. G. D. A. *SÍNTESE E CARACTERIZAÇÃO DE GEOPOLÍMEROS CONTENDO FILITOSA*. 185 p. Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
- 33 COSTA, V. L. *Processo produtivo e produção de aço: a inserção do Grupo Gerdau S.A. no cenário mundial*. 2007. 07 out. de 2023. Disponível em: <<http://ri.uepg.br:8080/riuepg//handle/123456789/778>>.
- 34 LI, Y.; LIU, F.; YU, F.; DU, T. A review of the application of steel slag in concrete. *Structures*, v. 63, p. 106352, 2024. ISSN 2352-0124. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424005046>>.
- 35 WSA. *World Steel Association*. 2024. <https://worldsteel.org/data/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND/JPN/BRA>. Acessado em: 17 de julho de 2024.
- 36 PEREIRA, A. P. D. S. *COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS SUSTENTÁVEIS PRODUZIDOS A PARTIR DE ESCÓRIA SIDERÚRGICA E POLI (METACRILATO DE METILA) VISANDO APLICAÇÃO BALÍSTICA*. 129 p. Tese (Doutorado) — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.
- 37 FURLANI, E.; TONELLO, G.; MASCHIO, S. Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics. *Waste Management*, v. 30, n. 8, p. 1714–1719, 2010. ISSN 0956-053X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10002011>>.
- 38 ALMEIDA, M. C. de A. *Powder de Escória de Aciaria em Concreto de Alto Desempenho*. 59 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil, Ouro Preto, 2017.
- 39 SANTOS, E. M. *DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO À BASE DE POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET) COM PARTÍCULAS GEOPOLIMÉRICAS DE ACIARIA DE PANELA*. 79 p. Mestrado em Ciência dos Materiais — Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019.
- 40 PIMENTEL, M. G.; VASCONCELOS, A. L. R.; PICANÇO, M. de S.; SOUZA, J. V. B. de; MACÊDO, A. N. Caracterização da escória de alto forno proveniente de resíduos industriais visando seu uso na construção civil. *Brazilian Applied Science Review*, v. 3, n. 2, p. 895–907, 2019.
- 41 JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de escória de alto forno no brasil. *SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REUSO/RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS*. São Paulo: SEMA-SP/FIESP/CETESB, 2000.
- 42 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5735: Cimento portland de alto forno*. Brasil, 1991. 5 p.

- 43 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 11578*: Cimento portland composto. Brasil, 1991. 5 p.
- 44 NEHRING, V.; SILVA, L. H. P.; TAMASHIRO, J. R.; PAIVA, F. F. G.; SILVA, I. M.; KINOSHITA, A. Utilização da escória de alto forno em materiais cimentícios. In: EDITORA CIENTÍFICA DIGITAL. *A CONSTRUÇÃO CIVIL: EM UMA PERSPECTIVA ECONÔMICA, AMBIENTAL E SOCIAL*. [S.l.], 2021. v. 1, p. 322–330.
- 45 REBELO, M. M.; CUNHA, M. V. P. d. O.; CORRÊA, J. A. M. Layered double hydroxides produced from blast furnace slag. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 35, p. 883–888, 2012.
- 46 SILVA, F. d.; OLIVEIRA, M.; MACHADO, M.; DUARTE, F.; THAUMATURGO, C. Cimentos geopoliméricos. *Revista Matéria*, v. 7, n. 3, p. 12, 2002.
- 47 APOLONIO, P. H. *Produção de geopolímeros usando cinza de casca de arroz como fonte complementar de sílica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- 48 DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and applications*. [S.l.]: Geopolymer Institute, 2008.
- 49 LĂZĂRESCU, A.; SZILÁGYI, H.; BAERĂ, C.; HEGYI, A. *Alternative Concrete-Geopolymer Concrete: Emerging Research and Opportunities*. [S.l.]: Materials Research Forum LLC, 2021.
- 50 SILVA, F. J. *Reforço e fratura em compósitos de matriz álcali-ativada*. Tese (Doutorado) — Tese D. Sc., IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- 51 PROVIS, J. L.; DEVENTER, J. S. J. V. *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. [S.l.]: Elsevier, 2009.
- 52 BAKRI, A. M. A.; KAMARUDIN, H.; BNHUSSAIN, M.; NIZAR, I. K.; MASTURA, W. et al. Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement-a review. *Journal of Asian Scientific Research*, Asian Economic and Social Society, v. 1, n. 5, p. 247–253, 2011.
- 53 BEZERRA, I. M. T.; COSTA, D.; VITORINO, J.; MENEZES, R.; NEVES, G. Influência da proporção do ativador alcalino nas propriedades mecânicas de materiais ativados alcalinamente. *Revista eletrônica de materiais e processos*, v. 8, n. 2, p. 101–105, 2013.
- 54 LĂZĂRESCU, A.; SZILAGYI, H.; BAERĂ, C.; IOANI, A. The effect of alkaline activator ratio on the compressive strength of fly ash-based geopolymer paste. In: IOP PUBLISHING. *IOP conference series: materials science and engineering*. [S.l.], 2017. v. 209, n. 1, p. 012064.
- 55 LEE, W.; DEVENTER, J. V. The effects of inorganic salt contamination on the strength and durability of geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Elsevier, v. 211, n. 2-3, p. 115–126, 2002.
- 56 PALOMO, A.; GRUTZECK, M.; BLANCO, M. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and concrete research*, Elsevier, v. 29, n. 8, p. 1323–1329, 1999.

- 57 PHAIR, J.; SMITH, J.; DEVENTER, J. V. Characteristics of aluminosilicate hydrogels related to commercial “geopolymers”. *Materials Letters*, Elsevier, v. 57, n. 28, p. 4356–4367, 2003.
- 58 HARDJITO, D.; WALLAH, S. E.; SUMAJOUW, D. M.; RANGAN, B. V. On the development of fly ash-based geopolymer concrete. *Materials Journal*, v. 101, n. 6, p. 467–472, 2004.
- 59 BAKRIA, A. M. A.; KAMARUDIN, H.; BINHUSSAIN, M.; NIZAR, I. K.; ZARINA, Y.; RAFIZA, A. The effect of curing temperature on physical and chemical properties of geopolymers. *Physics Procedia*, Elsevier, v. 22, p. 286–291, 2011.
- 60 KOVALCHUK, G.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A. Alkali-activated fly ash: effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development—part ii. *Fuel*, Elsevier, v. 86, n. 3, p. 315–322, 2007.
- 61 HEAH, C.; KAMARUDIN, H.; BAKRI, A. M. A.; BINHUSSAIN, M.; LUQMAN, M.; NIZAR, I. K.; RUZAIDI, C.; LIEW, Y. Effect of curing profile on kaolin-based geopolymers. *Physics Procedia*, Elsevier, v. 22, p. 305–311, 2011.
- 62 AMRAN, Y. M.; ALYOUSEF, R.; ALABDULJABBAR, H.; EL-ZEADANI, M. Clean production and properties of geopolymer concrete; a review. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 251, p. 119679, 2020.
- 63 VIJAI, K.; KUMUTHA, R.; VISHNURAM, B. Effect of types of curing on strength of geopolymer concrete. *International Journal of the Physical Sciences*, v. 5, n. 9, p. 1419–1423, 2010.
- 64 NATH, S.; KUMAR, S. Influence of iron making slags on strength and microstructure of fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 38, p. 924–930, 2013.
- 65 ISLAM, A.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; BASHAR, I. I.; KABIR, S. A. Engineering properties and carbon footprint of ground granulated blast-furnace slag-palm oil fuel ash-based structural geopolymer concrete. *Construction and building materials*, Elsevier, v. 101, p. 503–521, 2015.
- 66 YUSUF, M. O.; JOHARI, M. A. M.; AHMAD, Z. A.; MASLEHUDDIN, M. Impacts of silica modulus on the early strength of alkaline activated ground slag/ultrafine palm oil fuel ash based concrete. *Materials and Structures*, Springer, v. 48, p. 733–741, 2015.
- 67 FERNANDEZ-JIMENEZ, A. M.; PALOMO, A.; LOPEZ-HOMBRADOS, C. Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*, American Concrete Institute, v. 103, n. 2, p. 106, 2006.
- 68 CASTEL, A. Bond between steel reinforced and geopolymer concrete ch14. pdf. *Handb. Low Carbon Concr*, p. 375–386, 2016.
- 69 NUAKLONG, P.; SATA, V.; CHINDAPRASIRT, P. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 112, p. 2300–2307, 2016.

- 70 KAMSEU, E.; PONZONI, C.; TIPPAYASAM, C.; TAURINO, R.; CHAYSUWAN, D.; SGLAVO, V. M.; THAVORNITI, P.; LEONELLI, C. Self-compacting geopolymer concretes: Effects of addition of aluminosilicate-rich fines. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, v. 5, p. 211–221, 2016.
- 71 NOUSHINI, A.; ASLANI, F.; CASTEL, A.; GILBERT, R. I.; UY, B.; FOSTER, S. Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, v. 73, p. 136–146, 2016.
- 72 DRUTA, C. *Tensile strength and bonding characteristics of self-compacting concrete*. [S.l.]: Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, 2003.
- 73 LONGHI, M. A. Eflorescência em geopolímeros à base de metacaulim: formação, efeitos e mitigação. 2019.
- 74 ALIABDO, A. A.; ELMOATY, M. A.; SALEM, H. A. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 121, p. 694–703, 2016.
- 75 PATANKAR, S. V.; JAMKAR, S. S.; GHUGAL, Y. M. Effect of water-to-geopolymer binder ratio on the production of fly ash based geopolymer concrete. *Int. J. Adv. Technol. Civ. Eng*, v. 2, n. 1, p. 79–83, 2013.
- 76 LERMEN, R. T.; REMONTTI, T. L.; SILVA, R. d. A. Influence of water amount in efflorescence formation of the geopolymers based on metacaulim. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 27, p. e20220120, 2022.
- 77 IDRISSE, A. C. E.; ROZIERE, E.; LOUKILI, A.; DARSON, S. Design of geopolymer grouts: the effects of water content and mineral precursor. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Taylor & Francis, v. 22, n. 5, p. 628–649, 2018.
- 78 XIE, J.; KAYALI, O. Effect of initial water content and curing moisture conditions on the development of fly ash-based geopolymers in heat and ambient temperature. *Construction and building materials*, Elsevier, v. 67, p. 20–28, 2014.
- 79 DAVIDOVITS, J. years of successes and failures in geopolymer applications. market trends and potential breakthroughs. In: GEOPOLYMER INSTITUTE SAINT-QUENTIN, FRANCE; MELBOURNE, AUSTRALIA. *Geopolymer 2002 conference*. [S.l.], 2002. v. 28, p. 29.
- 80 AGUIRRE-GUERRERO, A. M.; ROBAYO-SALAZAR, R. A.; GUTIÉRREZ, R. M. de. A novel geopolymer application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. *Applied Clay Science*, Elsevier, v. 135, p. 437–446, 2017.
- 81 SOARES, J. C.; DIAS, D. P.; CARVALHO, E. A. de; AZEVEDO, J. S. de. Determination of shear strength by iosipescu (v-notch) method of metakaolin-based geopolymeric resins activated by different silicate and hydroxide combinations. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 275, p. 122120, 2021.
- 82 DIAS, A. R. d. O.; AMANCIO, F. A.; SOUSA, I. L. X. d.; LUCAS, S. O.; LIMA, D. A.; CABRAL, A. E. B. Effect of portland cement replacement by bssf steel slag in the physical and mechanical properties of concrete. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 25, p. e-12890, 2020.

- 83 LI, Z.; DING, Z.; ZHANG, Y. Development of sustainable cementitious materials. In: *Proceedings of international workshop on sustainable development and concrete technology, Beijing, China*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 55–76.
- 84 PAIVA, M.; CARVALHO, C.; SIMAS, T. Geopolímeros: Uma revisão das características e aplicações na construção civil. In: *II Congresso Araguaense de Ciências Exata, Tecnológica e Social Aplicada universidade e Conectividade: Conhecimento e Interação com a Comunidade Santana do Araguaia. Santana do Araguaia*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 23–28.
- 85 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 11579*: Cimento portland — determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (n^o 200). Brasil, 2013. 4 p.
- 86 PEREIRA, A. P. d. S.; RAMOS, F. J. H. T. V.; SILVA, M. H. P. d. Caracterização estrutural de geopolímeros sustentáveis de escória de aciaria Id e escória de aciaria If com koh. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 25, p. e-12827, 2020.
- 87 ZHANG, Z.; PROVIS, J. L.; MA, X.; REID, A.; WANG, H. Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. *Cement and concrete composites*, Elsevier, v. 92, p. 165–177, 2018.
- 88 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 16661:2017*: Materiais refratários densos conformados — determinação do volume aparente, volume aparente da parte sólida, densidade de massa aparente, densidade aparente da parte sólida, porosidade aparente e absorção. Rio de Janeiro, 2017. 4 p.
- 89 HO, S. T.; HUTMACHER, D. W. A comparison of micro ct with other techniques used in the characterization of scaffolds. *Biomaterials*, Elsevier, v. 27, n. 8, p. 1362–1376, 2006.
- 90 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5739*: Ensaio de compressão em corpos de prova cilíndricos. Brasil, 2018. 9 p.
- 91 SILVA, M. C. P. da; SILVA, C. G. S.; SILVA, A. C. R. da; MONTEIRO, S. N.; CANDIDO, V. S. Caracterização de escória de alto forno para fabricação de telhas.
- 92 MORAES, M. H. M. de; JESUS, A.; BRANDÃO, L. F. A.; QUEIROZ, D. P. de; ALMEIDA, L. R.; SILVA, A. C. R. da; PICANÇO, M. S. Avaliação das propriedades de ligante geopolimérico obtido a partir de metacaulim e escória granulada de alto forno. *Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis*, v. 17, n. 1, p. 37–56, 2023.
- 93 VARGAS, A. S. de; NOBRE, T. R. S.; MASUERO, Â. B.; MOLIN, D. C. C. D.; VILELA, A. Análises morfológicas e termogravimétricas de cimentos geopoliméricos com pó de aciaria.
- 94 PINTO, A. T. Introdução ao estudo dos geopolímeros. *Vila Real, Portugal: Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro*, 2006.
- 95 ÖZBAY, E.; ERDEMİR, M.; DURMUŞ, H. İ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—a review. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 105, p. 423–434, 2016.
- 96 PORTO, A. B. R. et al. Estudo do concreto geopolimérico a partir de metacaulim da região norte com adição de escória de alto forno. 2019.

- 97 JAMIL, N. H.; ABDULLAH, M. M. A. B.; PA, F. C.; MOHAMAD, H.; IBRAHIM, W. M. A. W.; CHAIPRAPA, J. Influences of SiO_2 , Al_2O_3 , CaO and MgO in phase transformation of sintered kaolin-ground granulated blast furnace slag geopolymer. *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, v. 9, n. 6, p. 14922–14932, 2020.
- 98 METLENKIN, D. A.; KISELEV, N. V.; PLATOV, Y. T.; KHAIDAROV, B. B.; KHAIDAROV, T. B.; KOLESNIKOV, E. A.; KUZNETSOV, D. V.; GOROKHOVSKY, A. V.; OFFOR, P. O.; BURMISTROV, I. N. Identification of the elemental composition of granulated blast furnace slag by FTIR-spectroscopy and chemometrics. *Processes*, MDPI, v. 10, n. 11, p. 2166, 2022.
- 99 SOUZA, L. G. *Geopolímeros à base de resíduos industriais*. Tese (Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais)) — Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro, 2005.
- 100 SILVA, A. M. d. et al. Síntese de materiais geopoliméricos utilizados na separação de emulsões óleo/água. Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- 101 ROVNANÍK, P.; BAYER, P.; ROVNANÍKOVÁ, P. Characterization of alkali activated slag paste after exposure to high temperatures. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 47, p. 1479–1487, 2013.
- 102 AL-HUSSEINAWI, F. N.; ATHERTON, W.; AL-KHAFAJI, Z.; SADIQUE, M.; YASEEN, Z. M. The impact of molar proportion of sodium hydroxide and water amount on the compressive strength of slag/metakaolin (waste materials) geopolymer mortar. *Advances in Civil Engineering*, Wiley Online Library, v. 2022, n. 1, p. 5910701, 2022.
- 103 PHUMMIPHAN, I.; HORPIBULSUK, S.; RACHAN, R.; ARULRAJAH, A.; SHEN, S.-L.; CHINDAPRASIRT, P. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, v. 341, p. 257–267, 2018.
- 104 LIU, Y.; ZHU, W.; YANG, E.-H. Alkali-activated ground granulated blast-furnace slag incorporating incinerator fly ash as a potential binder. *Construction and Building Materials*, Elsevier, v. 112, p. 1005–1012, 2016.
- 105 NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 2. ed. rev. atual. ed. São Paulo: PINI, 1997.
- 106 QUARCIONI, V. A. Caracterização de fases de cimento portland por meio das técnicas de difratometria de raios x e espectroscopia de ressonância magnética nuclear de ^{29}Si no estado sólido. *Revista IPT: Tecnologia e Inovação*, v. 6, n. 19, 2022.
- 107 GAO, K.; LIN, K.-L.; WANG, D.; HWANG, C.-L.; SHIU, H.-S.; CHANG, Y.-M.; CHENG, T.-W. Effects $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano- SiO_2 metakaolin-based geopolymers. *Construction and building materials*, Elsevier, v. 53, p. 503–510, 2014.
- 108 KAZE, R. C.; MOUNGAM, L. M. B. à; CANNIO, M.; ROSA, R.; KAMSEU, E.; MELO, U. C.; LEONELLI, C. Microstructure and engineering properties of Fe_2O_3 (FeO)- Al_2O_3 - SiO_2 based geopolymer composites. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 199, p. 849–859, 2018.

- 109 HIRAGA, R.; NEUMANN, R. Desenvolvimento de técnicas para identificação e quantificação de maghemita em minérios de ferro brasileiros. CETEM/MCTIC, 2017.
- 110 DAREZERESHKI, E. Synthesis of maghemite (γ -Fe₂O₃) nanoparticles by wet chemical method at room temperature. *Materials Letters*, Elsevier, v. 64, n. 13, p. 1471–1472, 2010.
- 111 MADEJSKA, L.; JAROSIŃSKI, A.; ŻELAZNY, S.; KUSNIEROVA, M.; CHACHLOWSKA, M. Properties of geopolymer binder obtained from fly ash. *Czasopismo Techniczne. Chemia*, v. 108, n. 1-Ch, p. 113–118, 2011.
- 112 NGUYEN, T. T.; BUI, H. H.; NGO, T. D.; NGUYEN, G. D. Experimental and numerical investigation of influence of air-voids on the compressive behaviour of foamed concrete. *Materials & Design*, Elsevier, v. 130, p. 103–119, 2017.
- 113 HAJIMOHAMMADI, A.; NGO, T.; MENDIS, P.; NGUYEN, T.; KASHANI, A.; DEVENTER, J. S. van. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H₂O₂: The impact of mix design. *Materials & Design*, Elsevier, v. 130, p. 381–391, 2017.
- 114 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — requisitos*. Brasil, 2005. 11 p.