



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA - CCEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DE MATERIAIS

CASSIANA MENDONÇA DOS SANTOS

**DESIGN, PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E
ESTRUTURAL DE GEOPOLÍMEROS COM RESÍDUOS DE VIDRO
DE GARRAFAS NÃO RETORNÁVEIS *LONG NECK***

Recife

2025

CASSIANA MENDONÇA DOS SANTOS

**DESIGN, PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E
ESTRUTURAL DE GEOPOLÍMEROS COM RESÍDUOS DE VIDRO
DE GARRAFAS NÃO RETORNÁVEIS *LONG NECK***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência de Materiais.

Área de concentração: Materiais não Metálicos

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nathalia Bezerra de Lima

Orientadora Externa: Prof^a. Dr^a. Érika Pinto Marinho

Coorientadores: Prof^a. Dr^a. Ana Cecilia Vieira Da Nobrega
Prof^o Dr^o.Tiago Felipe De Abreu Santos

Recife

2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Cassiana Mendonça Dos.

Design, preparação e caracterização química, física e estrutural de geopolímeros com resíduos de vidro de garrafas não retornáveis long neck / Cassiana Mendonça Dos Santos. - Recife, 2025.

163f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Ciências de Materiais, 2025.

Orientação: Nathalia Bezerra de Lima.

Coorientação: Érika Pinto Marinho.

Coorientação: Ana Cecilia Vieira Da Nóbrega.

Coorientação: Tiago Felipe De Abreu Santos.

Inclui referências e apêndices.

1. Geopolímero; 2. Metacaulim; 3. Resíduo; 4. Vidro; 5. Long neck. I. LIMA, Nathalia Bezerra de et al. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CASSIANA MENDONÇA DOS SANTOS

**DESIGN, PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA, FÍSICA E
ESTRUTURAL DE GEOPOLÍMEROS COM RESÍDUOS DE VIDRO
DE GARRAFAS NÃO RETORNÁVEIS *LONG NECK***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência de Materiais.

Aprovada em: 17/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Nathalia Bezerra de Lima (Orientadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Erika Pinto Marinho (Orientadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Profo. Dr^o. José Fernando Dagnone Figueiredo (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profo. Dr^o. Fábio José Carvalho França (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Juliana Angeiras Batista da Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Profo. Dr^o. Kleber Gonçalves Bezerra Alves (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico a minha família, que sempre me deu suporte, apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, pois sem Ele essa produção não seria possível.

Eterna gratidão a minha família por todo amor, apoio e paciência no decorrer desses quase 30 anos de vida acadêmica. Vocês foram um pilar essencial para todo o conhecimento adquirido e repassado ao longo de todos esses anos.

Uma homenagem mais que especial a minha sempre tão querida mãe, que eu tenho plena convicção de que é a melhor mãe do mundo e eu certamente fui premiada ao ter a oportunidade de tê-la em minha vida.

Aos meus irmãos, Jô, Karina, Katia e Pedro, todo amor e gratidão sempre serão direcionados por todo amor e suporte fornecido ao longo de todos esses anos.

Um agradecimento especial para minha orientadora, Érika Marinho, pela compreensão, pelos direcionamentos, disponibilidade e conhecimentos compartilhados. Foram 8 anos de muito aprendizado e parceria, aos quais sempre serei grata.

Agradeço também a orientadora Prof^a Dr^a Nathalia Bezerra pelo incentivo constante e por sempre acreditar que no fim tudo dará certo.

Meu agradecimento a Prof^a. Dr^a. Ana Cecília por contribuir para o desenvolvimento do meu conhecimento.

Gratidão por todo companheirismo de Marcelo Souza, que sempre foi muito parceiro ao longo de todos esses anos e também por suas contribuições no desenvolvimento de toda essa pesquisa.

Agradeço a Keila Vitória pela consultoria na tradução de artigos produzidos ao longo de toda jornada.

Minha gratidão a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Pessoal (CAPES) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço a todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste estudo.

"A felicidade pode ser encontrada inclusive nos momentos mais escuros;
só é preciso lembrar de acender a luz" (Rowling, 2000).

RESUMO

Os avanços da tecnologia e da ciência devido ao aumento da densidade populacional, a migração da população da área rural para urbana e o crescimento industrial resultam em um volume significativo de geração de resíduos, exaustão de matérias-primas e níveis preocupantes da emissão de gases do efeito estufa, fenômenos estes que demonstram uma necessidade de mudança imprescindível. Garrafas de vidro *long neck* não retornam para reutilização pela indústria vidreira, devido à sua baixa resistência mecânica. Assim, é importante desenvolver tecnologias para aproveitar este resíduo e minimizar os custos com destinação em aterros. Uma opção é aproveitar este resíduo na produção de geopolímeros, já que as garrafas *long neck* podem funcionar como fonte de sílica complementar. Os geopolímeros são polímeros inorgânicos que têm sido usados como materiais aglomerantes em substituição ao cimento Portland. Este trabalho avaliou a viscosidade plástica, as características microestruturais e mecânicas de geopolímeros de metacaulim com base na incorporação de resíduos de garrafas *long neck* da substituição de 0, 10, 20 e 30% de metacaulim por resíduos de garrafas *long neck* azul, verde e âmbar. Os resultados indicam menor viscosidade plástica dos geopolímeros com resíduo, de acordo com o aumento do teor de resíduo no sistema. As análises de FTIR e DRX sugerem que foi possível produzir geopolímeros usando resíduo de garrafa *long neck*, a temperatura ambiente (25°C) e aquecida (40°C). A resistência à compressão, aos 90 dias, dos geopolímeros com 10% de substituição foi superior ao valor da amostra de referência em 4,1%, 29,1% e 21,0% para os resíduos *long neck* azul, verde e âmbar, respectivamente. A cura aquecida afetou negativamente a resistência à compressão dos geopolímeros. Os geopolímeros com resíduo âmbar apresentaram um aumento na resistência à compressão de 20,9%, 4,7% e 23,0% para as amostras com 10%, 20% e 30% de substituição, respectivamente, em relação à amostra de referência. A microestrutura das amostras com resíduos de vidros com 20 e 30 % de substituição foi composta por géis de NASH e CASH e o teor de 10 % foi considerado ótimo devido a maior densificação da matriz.

Palavras-chave: Geopolímero. Metacaulim. Resíduo. Vidro. *Long neck*.

ABSTRACT

Technological and scientific advancements, driven by increasing population density, rural-to-urban migration, and industrial growth, have resulted in a significant volume of waste generation, depletion of raw materials, and alarming levels of greenhouse gas emissions—phenomena that highlight the urgent need for change. Long neck glass bottles are not returned for reuse by the glass industry due to their low mechanical resistance. Therefore, it is essential to develop technologies to repurpose this waste and minimize landfill disposal costs. One option is to use this waste in the production of geopolymers, as long neck bottles can serve as a complementary silica source. Geopolymers are inorganic polymers that have been used as binding materials to replace Portland cement. This study evaluated the plastic viscosity, microstructural, and mechanical characteristics of metakaolin-based geopolymers incorporating waste from long neck bottles by replacing 0%, 10%, 20%, and 30% of metakaolin with waste from blue, green, and amber long neck bottles. The results indicate lower plastic viscosity in geopolymers containing waste, correlating with the increased waste content in the system. FTIR and XRD analyses suggest that it was possible to produce geopolymers using long neck bottle waste at both room temperature (25°C) and elevated temperature (40°C). The compressive strength at 90 days of geopolymers with 10% replacement exceeded the reference sample by 4.1%, 29.1%, and 21.0% for blue, green, and amber long neck bottle waste, respectively. Heated curing negatively affected the compressive strength of the geopolymers. Amber waste-based geopolymers showed a compressive strength increase of 20.9%, 4.7%, and 23.0% for samples with 10%, 20%, and 30% replacement, respectively, compared to the reference sample. The microstructure of the samples with 20% and 30% glass waste replacement consisted of NASH and CASH gels, while the 10% replacement level was considered optimal due to the higher densification of the matrix.

Keywords: Geopolymer. Metakaolin. Waste. Glass. Long neck.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas tetraédricas geopoliméricas.	29
Figura 2 - Esquema de produção dos geopolímeros.....	30
Figura 3 - Etapas do mecanismo de geopolimerização.....	31
Figura 4 - Aplicações dos geopolímeros em função da relação Si:Al.....	34
Figura 5 - Variação do volume em função da temperatura no processo de resfriamento.	46
Figura 6 - Intervalo de transição vítrea (β : taxa de resfriamento, onde $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$)...	47
Figura 7 - Unidade básica da rede de sílica presente no vidro.....	48
Figura 8 - a) Sílica cristalizada; b) Sílica vítrea; c) Vidro soda-cálcico.	49
Figura 9 - Funções relativas aos óxidos no vidro.	54
Figura 10 - Viscosidade x Temperatura de um vidro soda-cálcico.	55
Figura 11 - Quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução.	56
Figura 12 - Volume total coletado por material pelas cooperativas e associações ...	59
Figura 13 – Distribuição granulométrica das matérias-primas	90
Figura 14 - Reatividade das matérias-primas.....	93
Figura 15 - Difractogramas caulim e metacaulim.....	96
Figura 16 - Difractogramas resíduos azul, verde e âmbar.	97
Figura 17 - FTIR do caulim e metacaulim.	98
Figura 18 - FTIR dos resíduos azul, verde e âmbar.	99
Figura 19 - Curvas de TG/DTG do caulim.....	100
Figura 20 - Curvas da TG/DTG do metacaulim.....	101
Figura 21 - Curvas da TG/DTG para os resíduos azul, verde e âmbar	102
Figura 22 - Resistência à compressão dos geopolímeros de referência.....	105
Figura 23 - Modelo ajustado de Bingham aplicado nas amostras.....	108
Figura 24 - Curva de escoamento dos geopolímeros.....	108
Figura 25 - Influência do teor de resíduo na viscosidade	109
Figura 26 - Resistência à Compressão dos geopolímeros.....	111
Figura 27 - Difractogramas dos geopolímeros curados à 25 °C	115
Figura 28 – FTIR dos geopolímeros curados à 25 °C	117
Figura 29 - TG/DTG da amostra Ref25	118
Figura 30 - TG/DTG geopolímeros com resíduos de vidro, curados à 25 °C	119

Figura 31 – Análises de MEV (500x) a) Ref25; b) 10Az; c) 20Az; d) 30Az; e) 10Ve; f) 20Ve; g) 30Ve; h) 10Am; i) 20Am; j) 30Am	122
Figura 32 – Análises de MEV (2.000x) a) Ref25; b) 10Az; c) 20Az; d) 30Az; e) 10Ve; f) 20Ve; g) 30Ve; h) 10Am; i) 20Am; j) 30Am	123
Figura 33 - Análise EDS da amostra Ref25.....	124
Figura 34 - EDS das amostras a) 10Az; b) 10Ve e c) 10Am	125
Figura 35 - EDS das amostras a) 20Az; b) 30Az e c) 20Ve e d) 30Ve.....	126
Figura 36 - EDS das amostras a) 20Am; b) 30Am	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais descobertas sobre materiais ativados alcalinicamente.....	27
Quadro 2 - Definições de vidro.....	44
Quadro 3 - Principais componentes do vidro simples e suas funções.	49
Quadro 4 - Espécies químicas (agentes de pigmentação) para dar cor aos vidros. .	58
Quadro 5 - Tempo de decomposição do vidro de acordo com variadas fontes.....	60
Quadro 6 - Estudos de materiais geopoliméricos com resíduos de vidro.....	62
Quadro 7 - Estudos de materiais com resíduos de garrafas <i>long neck</i>	71
Quadro 8 - Identificação das amostras.....	81
Quadro 9 – Testes iniciais	103

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Universidade de Queensland com 3 pisos construídos com concreto geopolimérico.....	38
Fotografia 2 - Locais onde foram aplicados concreto geopolimérico na Universidade de Queensland.....	38
Fotografia 3 - Aeroporto de Brisbane West Wellcamp.	39
Fotografia 4 - Exemplos de construções com material geopolimérico.	39
Fotografia 5 - Exemplos de aplicações de materiais geopoliméricos no Brasil.	40
Fotografia 6 – Os três tipos de garrafas <i>long neck</i> coletadas.....	78
Fotografia 7 - Retirada dos rótulos das garrafas.	79
Fotografia 8 - Trituração das garrafas.	79
Fotografia 9 - Resíduo resultante do beneficiamento.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência à compressão em geopolímeros.....	36
Tabela 2 - Especificações técnicas do silicato de sódio.....	78
Tabela 3 - Diâmetro médio das matérias-primas.....	91
Tabela 4 - Massas específicas das matérias-primas.....	92
Tabela 5 - Composição química caulim, metacaulim e resíduos.....	94
Tabela 6 – Análises do geopolímero de referência	104
Tabela 7 - Consumo de materiais usados na produção dos geopolímeros.....	107
Tabela 8 - ANOVA dos geopolímeros curados à 25°C, aos 7 dias de idade.....	113
Tabela 9 - ANOVA dos geopolímeros curados à 25°C, aos 90 dias de idade.....	113
Tabela 10 - ANOVA dos geopolímeros curados à 40°C, aos 7 dias de idade.....	114
Tabela 11 - ANOVA dos geopolímeros curados à 40°C, aos 90 dias de idade.....	114

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	26
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	23
1.1.1 Objetivo Geral	23
1.1.2 Objetivos Específicos	23
1.1.3 Hipótese do Trabalho	24
CAPÍTULO 2	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO	26
2.1 GEOPOLÍMERO	26
2.1.1 Aspectos Históricos	26
2.1.2 Definição e Estrutura	28
2.1.3 Constituintes	30
2.1.4 Mecanismo de Geopolimerização	31
2.1.5 Principais Parâmetros Influenciadores	33
2.1.6 Propriedades	35
2.1.7 Aplicações	37
2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS	40
2.3 VIDRO	42
2.3.1 Aspectos Históricos	42
2.3.2 Definição	44
2.3.3 Transição Vítre a	45
2.3.4 Estrutura e Composição	47
2.3.5 Tipos de Vidros	51
2.3.5.1 Vidro Soda-Cálcico	52
2.3.6 Propriedades	53
2.3.7 Resíduos de Vidro	59

2.3.8	Garrafas <i>Long Neck</i>	60
2.4	ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA.....	61
2.4.1	Estudos sobre Materiais Geopoliméricos com Vidro.....	62
2.4.2	Estudos sobre Materiais com Resíduos de Garrafas <i>Long Neck</i>.....	70
CAPÍTULO 3.....		75
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	76
3.1	MATERIAIS.....	76
3.1.1	Precursor Geopolimérico	77
3.1.2	Solução Ativadora	77
3.1.2.1	Hidróxido de Sódio	77
3.1.2.2	Silicato de Sódio Comercial.....	77
3.1.2.3	Água Destilada	78
3.1.3	Resíduos de Garrafas <i>Long Neck</i>.....	78
3.1.3.1	Beneficiamento do Resíduo	79
3.2	MÉTODOS	80
3.2.1	Preparo dos Geopolímeros	80
3.2.2	Identificação das Amostras.....	81
3.2.3	Ensaio de Caracterização Caulim, Metacaulim e Resíduos.....	82
3.2.3.1	Análise Granulométrica	82
3.2.3.2	Massa Específica	82
3.2.3.3	Perda ao Fogo (PF).....	82
3.2.3.4	Reatividade das Matérias-primas	83
3.2.3.5	Fluorescência de Raios-X (FRX).....	84
3.2.3.6	Difração de Raios-X (DRX)	84
3.2.3.7	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)..	84
3.2.3.8	Termogravimetria (TG/DTG).....	85
3.2.4	Ensaio nos Geopolímeros	85
3.2.4.1	Reologia	85

3.2.4.2	Resistência à Compressão.....	86
3.2.4.3	Difração de Raios-X	86
3.2.4.4	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)..	87
3.2.4.5	Termogravimetria (TG/DTG).....	87
3.2.4.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)	87
CAPÍTULO 4.....		89
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.1	CARACTERIZAÇÕES DO CAULIM, METACAULIM E RESÍDUOS.....	90
4.1.1	Análise Granulométrica	90
4.1.2	Massa Específica.....	92
4.1.3	Reatividade das Matérias-primas.....	92
4.1.4	Fluorescência de Raios-X (FRX)	93
4.1.5	Difração de Raios-X (DRX).....	95
4.1.6	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	98
4.1.7	Termogravimetria	100
4.2	ESTUDOS PRELIMINARES	103
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS.....	107
4.3.1	Reologia	107
4.3.2	Resistência à Compressão	110
4.3.3	Difração de Raios-X.....	115
4.3.4	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	116
4.3.5	Termogravimetria (TG/DTG)	118
4.3.6	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS).....	121
CAPÍTULO 5.....		129
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130

REFERÊNCIAS.....	133
APÊNDICE A – ARTIGO DERIVADO DA TESE	161
APÊNDICE B – DEMAIS ARTIGOS PUBLICADOS	162

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Na conjuntura mundial da atualidade, países em desenvolvimento, em especial o BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) demandam grandes quantidades de concreto para suprir o déficit habitacional e de infraestrutura, através da construção de edificações e de obras de pequeno, médio e grande porte. Com essa alta demanda, o concreto é considerado o segundo produto mais consumido e o primeiro material de construção mais utilizado no mundo (Cimento Itambé, 2019; Instituto Brasileiro do Concreto, Ibracon, 2009; Van Deventer; Provis; Duxson, 2012). O cimento, por sua vez, confere as propriedades de resistência e durabilidade ao concreto e é um dos seus principais constituintes. Dados de 2022, segundo a *United State Geological Survey* (USGS, 2023), informam que a produção mundial de cimento foi de, aproximadamente, 4,1 bilhões de toneladas, o que corresponde ao consumo próximo de 512 kg, por habitante, por ano.

O tipo de cimento mais utilizado mundialmente e com amplo conhecimento na comunidade científica é o Portland (Scrivener, Nonat, 2011; Shi, Jiménez, Palomo, 2011), considerado um material altamente versátil e com propriedades pertinentes para a maioria das aplicações requisitadas. Embora as qualidades do cimento Portland sejam inquestionáveis, a produção deste material apresenta elevada emissão de dióxido de carbono (CO₂) devido à decomposição da calcita e demais processos que envolvem sua fabricação, o que resulta na emissão de 1 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento Portland produzido (Davidovits, 1991; Damtoft *et al.*, 2008). Dessa forma, com a confirmação da previsão do aumento de consumo de cimento, os níveis de emissão de CO₂ se tornarão devastadores e ambientalmente perigosos. Além disso, grandes impactos ambientais também são gerados no que diz respeito à extração de matérias-primas não renováveis e no gasto de energia de sua produção (Supino *et al.*, 2016).

Com esse elevado consumo de cimento, algumas estratégias precisam ser adotadas para que o desenvolvimento técnico seja acompanhado pelo equilíbrio entre o suprimento das necessidades humanas, o manuseio seguro dos recursos naturais, menores gastos energéticos, redução das emissões de CO₂ e um destino adequado e eficaz aos resíduos gerados (Ecycle, 2022). Uma dessas estratégias está relacionada ao uso de ligantes alternativos com constituintes provenientes de resíduos ou de materiais com baixo impacto ambiental e com emissões de CO₂ inferior ao

cimento Portland. Entre as opções, são destaques os cimentos de aluminato de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio e supersulfatados (Juenger *et al.*, 2011), que são à base de um clínquer produzido em um processo similar ao convencional, porém com o uso de materiais ou dosagens diferentes e com melhorias no processo, de forma a reduzir o impacto ambiental de sua produção (Longhi, 2019). Além dessas, os cimentos livres de clínquer são uma opção, assim como os cimentos tipo álcali-ativados (Davidovits, 1991; Duxson *et al.*, 2007b; Provis, Bernal, 2014).

Os materiais álcali-ativados são derivados de reações entre um mineral de aluminossilicato (precursor) e uma solução alcalina (ativador), com uma mistura de ótimas proporções para produzir uma pasta endurecida (Provis, 2018). Os materiais ativados alcalinicamente, de acordo com Davidovits (2013) e Palomo *et al.* (1999), se dividem em dois tipos: o primeiro deles é caracterizado pela ativação realizada através de soluções alcalinas de baixa e média concentração em materiais com alto teor de Si e Ca, de forma que o produto de reação é o silicato de cálcio hidratado (C-S-H); já o segundo, é produzido pela ativação de materiais ricos em Al e Si, com baixa concentração de cálcio, e soluções alcalinas de alta concentração (Provis, 2018).

Esse material álcali-ativado rico em Al e Si é denominado geopolímero e seu precursor não reage com a água, por isso, sua reatividade se dá por meio de reações com soluções aquosas de elevado pH, identificado como ativador e comumente obtido através da mistura entre hidróxidos, silicatos e água. A principal fase dos geopolímeros é o gel de aluminossilicato alcalino hidratado (N, K)-A-S-H, mal ordenado e com base em estruturas tridimensionais (Gartner, Macphee, 2011). O produto resultante dessas reações tem potencial para apresentar propriedades mecânicas e durabilidade de igual capacidade, ou até superiores aos cimentos convencionais obtidos com cimento Portland (Davidovits, 2013). A composição de óxidos predominante nos precursores desta pesquisa são SiO_2 e Al_2O_3 , por isso, o termo geopolímero será adotado ao longo de todo estudo.

Os geopolímeros são materiais conhecidos, em escala mundial, como uma opção ambientalmente complacente para uso como ligantes. Formados por uma rede tridimensional amorfa, os geopolímeros são produzidos a partir da reação química de polimerização de silício, alumínio e oxigênio (Komnitsas; Zaharaki, 2007). Essa reação, por sua vez, se dá através da mistura entre o precursor e a solução alcalina (Davidovits, 1994), de forma a gerar propriedades que podem variar de cerâmicas a plásticas em função da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Davidovits, 1991, 2005). Para Davidovits

(2011), a formação desses materiais aglomerantes ocorre quando esta relação está entre 2 e 4.

Os materiais geopoliméricos são considerados promissores para diversos autores devido as propriedades como alta resistência à compressão e durabilidade (Ilkentapar, Ozsoy, 2022; Palomo, Ruiz-santaquiteria e Fernandez-Jimenez, 2009; Ramos *et al.*, 2018; Shi, Jiménez e Palomo, 2011; Wang *et al.*, 2023), resistência ao meio ácido (Wang *et al.*, 2023), resistências ao fogo, à corrosão e à umidade, baixa retração, baixa condutividade térmica (Pouhet e Cyr, 2016; Xu *et al.*, 2015; Tchakoute *et al.*, 2015; Zeng e Wang, 2016) e resistência ao congelamento e degelo (Bigno, 2008). Além disso, um dos principais benefícios de caráter ambiental é a baixa emissão de CO₂ na produção do geopolímero, o que reduz consideravelmente o impacto ambiental associado à sua fabricação, quando comparado aos produtos de cimento Portland (Davidovits, 1991, 2005; Duxson *et al.*, 2007a; Gartner, 2004). Na produção de produtos geopoliméricos, a GEO-POL (2015) afirma que as reduções totais de emissão de CO₂ podem alcançar até 10 %, em massa, quando comparados a produtos provenientes do cimento Portland puro.

Os materiais precursores mais convencionais e utilizados são derivados de argilas calcinadas, resíduos e/ou subprodutos industriais. Derivado da calcinação do caulim, o metacaulim é um dos precursores mais utilizados na produção de materiais geopoliméricos (Gao *et al.*, 2014; Granizo; Palomo, Fernandez-Jimenez, 2014; Vogt, Ukrainczyk, Koenders, 2021). Além disso, os resíduos comumente utilizados como precursores para geopolímeros são escória de alto forno e cinzas volantes (Davidovits, 2013; Duxson, Provis, 2008). As produções de cimento Portland composto (CP III e CP IV, de acordo com as NBR 5735 e NBR 5736) e de concretos já utilizam essas matérias-primas e, para Scrivener, John e Gartner (2017), a busca por precursores geopoliméricos deve ser por materiais que não são usuais na indústria do cimento Portland, uma vez que a indústria cimentícia já os utilizam quase que em sua totalidade. Em vista disso, novos materiais derivados de resíduos industriais, como resíduos de vidro (Cyr, Idir, Poinot, 2012; Pascual, Tognonvi, Tagnit-Hamou, 2014; Torres-Carrasco, Puertas, 2017; Albarenga *et al.*, 2022), estão sendo inseridos na matriz geopolimérica para avaliar seu comportamento no sistema e, simultaneamente, criar uma destinação adequada para resíduos que degradam o ambiente e afetam a qualidade da população atual e futura.

Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos (Abravidro, 2024), a produção brasileira de vidros planos em 2023 foi de 2,7 milhões de toneladas. Desse montante, apenas 266 mil toneladas foram destinadas à reciclagem (Anuário da Reciclagem, 2023). Como consequência, milhares de toneladas de vidros são descartadas (lixões e aterros controlados), o que resulta em potenciais prejuízos para saúde humana (proliferação de vetores e doenças, ferimentos e cortes, liberação de substâncias tóxicas, impacto na qualidade da água, riscos respiratórios, aumento da poluição e do aquecimento global) por milhares de anos, tendo em vista que o tempo total de decomposição do vidro na natureza pode alcançar até 1 milhão de anos, dependendo das condições as quais o material é submetido (ANAVIDRO, 2020).

Os vidros encontrados em lixões são dispostos na forma de cacos e, muitas vezes, em embalagens intactas, como no caso de garrafas não retornáveis do tipo *long neck*, as quais foram originadas da necessidade em criar uma embalagem que pudesse concorrer com a indústria do alumínio (Funverde, 2009). As garrafas do tipo *long neck* não retornam para reutilização por parte da indústria, pois são embalagens mais leves e com espessuras e resistências menores (Jorge, 2013). Esse procedimento implica em um produto inadequado para reutilização por parte da indústria. Além dos problemas ambientais resultantes do descarte inadequado para as garrafas *long neck*, problemas sociais, como agressões físicas, também têm sobrevivendo em eventos com o auxílio desse tipo de embalagem. Em vista disso, vários Projetos de Lei nos âmbitos Federal, Estadual e Municipal foram criados na tentativa de reparar esta situação, de forma a obrigar a coleta e a destinação final pelos revendedores e, em casos categóricos, a proibição da industrialização e comercialização de garrafas não retornáveis.

O vidro, assim como seus resíduos, tem como constituinte principal (cerca de 70 %) o óxido de silício (SiO_2), que se apresenta predominantemente em estado amorfo (Shelby, 2005) e, por isso, é considerado um material promissor para o sistema geopolimérico, devido à sua capacidade de ser ativado em meio alcalino, participando assim de reações de geopolimerização. Além disso, os cátions característicos de garrafas *long neck* podem estabilizar o alumínio, conforme relatado por Duxson *et al.* (2007a). Devido a essas características, trabalhos com resíduos de garrafas retornáveis (Cyr, Idir, Poinot, 2012; Pascual, Tognonvi, Tagnit-Hamou, 2014), lâmpadas fluorescentes (Bobirica *et al.*, 2015; Novais *et al.*, 2016), pó de vidro

(Antônio, 2012; Si *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2017) vidrarias laboratoriais (El-Naggar, El-Dessouky, 2017) e outros (Alvarenga *et al.*, 2022; Burciaga-Díaz *et al.*, 2020; Cakmak *et al.*, 2024; Dinh *et al.*, 2024; Puertas, Torres-Carrasco, 2014; Torres-Carrasco, Puertas, 2015; Torres-Carrasco *et al.*, 2015; Torres-Carrasco, Puertas, 2017; Wang *et al.*, 2017;) incorporados em geopolímeros já foram estudados na comunidade científica. Além disso, especificamente resíduos de garrafas *long neck* já foram estudados em sistemas à base de cimento Portland como substituição ao agregado miúdo ou ao cimento Portland em argamassas (Brito, 2021; Costa, Almeida, Moreira, 2020; Silveira, 2016; Tretin *et al.*, 2020) e concretos (Costa, Almeida, Moreira, 2020; Righi, 2011).

Diante do exposto, o desenvolvimento da pesquisa de materiais alternativos ao cimento Portland para redução das fontes de emissão de gases do efeito estufa, em paralelo a preocupação com a destinação final das garrafas não retornáveis tipo *long neck*, justificam os objetivos deste trabalho em incorporar resíduos provenientes de garrafas *long neck* em pastas geopoliméricas e avaliar sua viabilidade técnica. É importante destacar que estudos com garrafas *long neck* já foram desenvolvidos para sistemas com cimento Portland, no entanto, não foram realizadas análises que envolvem mais de um tipo de resíduo *long neck*, com porcentagens variadas e mais de uma condição de cura aplicados a geopolímeros.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em projetar, preparar e caracterizar geopolímeros com incorporação de resíduos de vidro de garrafas não retornáveis *long neck*.

1.1.2 Objetivos Específicos

Por sua vez, os objetivos específicos são listados a seguir:

a) Realizar a coleta e o beneficiamento de três tipos de resíduo de vidro proveniente de garrafas *long neck*, executando moagem até que o material alcance escalas micrométricas;

- b) Caracterizar as matérias-primas utilizadas na síntese geopolimérica;
- c) Produzir geopolímeros com diferentes tipos de resíduo de vidro de garrafas *long neck* e variar a temperatura de cura (ambiente-25 °C e aquecida-40 °C);
- d) Produzir geopolímeros com diferentes porcentagens (0, 10, 20 e 30 %) de resíduo de vidro como substituição parcial, em relação a massa de metacaulim;
- e) Estudar a reologia das pastas geopoliméricas;
- f) Investigar a influência de resíduos de diferentes tipos de garrafas *long neck* na resistência à compressão dos geopolímeros;
- g) Estudar por FTIR, DRX e TG/DTG se a presença dos resíduos de *long neck* interferirá na formação da rede geopolimérica;
- h) Analisar a morfologia dos geopolímeros através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS).

1.1.3 Hipótese do Trabalho

A destinação final dos resíduos provenientes de garrafas não retornáveis *long neck* é uma preocupação mundial, dado a quantidade de resíduo gerada anualmente e sua propriedade de não reutilização por parte da indústria vidreira. Além disso, a produção de geopolímeros com a substituição parcial de resíduos de vidro proveniente de origens diversas, como garrafas retornáveis, lâmpadas fluorescentes, pó de vidro e vidrarias laboratoriais tem se mostrado viável no meio acadêmico.

Nesse contexto, a hipótese é: “Resíduos provenientes de garrafas não retornáveis *long neck* são viáveis para incorporação na matriz geopolimérica, de forma a obter geopolímeros com propriedades químicas e físicas adequadas”.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GEOPOLÍMERO

2.1.1 Aspectos Históricos

A história dos materiais álcali ativados remota na antiga União Soviética, onde foram desenvolvidos materiais a partir da mistura de aluminossilicatos minerais moídos e resíduos industriais ricos em álcalis (Roy, 1999; Severo *et al.*, 2013). Na década de 40, um cientista belga conhecido como Purdon descobriu um novo material de endurecimento rápido a partir da mistura de álcalis e escórias industriais (Davidovits, 2020). Já na década de 50, o ucraniano Victor Glukhovsky impulsionou o estudo desse material e o denominou como cimentos de solo, designação atribuída a capacidade ligante do material e a origem natural de seus constituintes (Roy, 1999; Severo *et al.*, 2013).

Joseph Davidovits intensificou os estudos em busca de materiais plásticos, não inflamáveis e não combustíveis no contexto de vários incêndios catastróficos de plásticos orgânicos ocorridos na França entre 1970-1973. Esse pesquisador químico francês desenvolveu um material sílico-aluminato semicristalino tridimensional, utilizando constituintes ricos em silício e alumínio ativados por soluções alcalinas (Alves, 2018; Davidovits, 1991, 1994, 2002, 2020; Marvila, Azevedo, Vieira, 2021).

Em 1979, Davidovits apresentou a comunidade científica o termo “geopolímeros”, tendo em vista que são oriundos de uma reação de polimerização que se assemelha aquela que origina os materiais poliméricos. Todavia, ao contrário dos polímeros, os materiais geopoliméricos possuem uma composição inorgânica. O cientista francês patenteou esse novo material e fundou uma empresa privada conhecida por *Geopolymer Institute*, na qual desenvolveu uma série de pesquisas e registrou várias patentes sobre a temática (Davidovits, 2002; Lemougna, 2016; Majidi, 2009; Marvila, Azevedo, Vieira, 2021; Severo *et al.*, 2013).

Embora as contribuições de Glukhovsky e Davidovits sejam destacadas, os materiais álcali ativados tiveram a contribuição de vários outros pesquisadores (Marvila, Azevedo, Vieira, 2021). No Quadro 1 é possível observar o resumo do histórico bibliográfico de importantes descobertas que envolvem materiais ativados alcalinicamente.

Quadro 1 - Principais descobertas sobre materiais ativado alcalinicamente.

Autor	Ano	Pesquisa
Feret	1939	Uso de escória no cimento
Purdon	1940	Combinação de escória e soluções alcalinas
Glukhovsky	1959	Base teórica e desenvolvimento de soluções alcalinas em cimento
Glukhovsky	1965	Primeiro material chamado cimento alcalino
Davidovits	1979	Uso do termo geopolímero
Malinowski	1979	Caracterização dos antigos aquedutos romanos
Forss	1983	Cimento com escória alcalina e superplastificantes
Langton e Roy	1984	Caracterização de materiais de construção antigos
Davidovits e Sawyer	1985	Patente de um cimento com composição química semelhante ao material que acredita ter sido usado nas pirâmides egípcias
Krivenko	1986	Definição de $M_2O-MO-SiO_2-H_2O$
Malolepsy e Petri	1986	Ativação de escórias sintéticas
Malek. <i>et al.</i>	1986	Aplicação de resíduos radioativos em cimentos de escória ativado
Davidovits	1987	Comparação de cimentos antigos e modernos
Deja e Malolepsy	1989	Prova de resistência ao cloreto de materiais álcali ativados
Kaushal <i>et al.</i>	1989	Incorporação de resíduos nucleares em materiais álcali ativados
Roy e Langton	1989	Produção de concreto semelhante aos antigos
Majundar <i>et al.</i>	1989	$C_{12}A_7$ - ativação de escória
Talling e Brandstetr	1989	Ativação de escória alcalina
Wu <i>et al.</i>	1990	Ativação alcalina de cimento à base de escória
Roy <i>et al.</i>	1991	Produção de cimentos alcalinos de pega rápida
Roy e Silsbee	1992	Publicação do artigo "Cimentos ativado alcalinos: uma visão geral"
Palomo e Glasser	1992	Ativação do metacaulim
Krivenko	1994	Propriedades dos cimentos alcalinos
Davidovits	1994	Definição da estrutura de geopolímeros através de polissialatos
Wang e Scrivener	1995	Descoberta da microestrutura de materiais álcali ativados
Palomo	1999	Publicação do artigo "Ativação alcalina de cinzas volantes: o cimento do futuro"
Krivenko, Roy e Shi	2006	Publicação do primeiro livro sobre ativação alcalina
Provis e Deventer	2007	Definição da modelagem cinética da reação de ativação alcalina
Habert <i>et. al</i>	2011	Avaliação ambiental da produção de concreto geopolimérico por ciclo de vida
Australia	2013	Construção da ponte em Victoria com E-Crete
Australia	2014	Expansão do aeroporto de Brisbane West Wellcamp com E-Crete.
Davidovits	2016	Estudos de depósitos e monumentos utilizados por civilizações pré-colombianas na Bolívia e no Peru
Davidovits	2019	Caracterização dos monumentos pré-colombianos em Pumapunku Tiwanaku, Bolívia

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Marvila, Azevedo, Vieira (2021)

Os estudos iniciais giraram em torno da caracterização de materiais de construção extraídos de monumentos antigos, como as pirâmides do Egito e os aquedutos de Roma, estudados por Davidovits e Sawyer em 1985 e por Malinowski em 1979, respectivamente. O resultado dessas pesquisas foi a confirmação de que os materiais utilizados nesses monumentos foram obtidos por meio de processos de

ativação alcalina. Consequentemente, pesquisadores como Roy *et al.* (1991), Palomo e Glasser (1992) e Krivenko (1994) se motivaram a dar continuidade aos estudos na área, mas ainda que com resultados significativos, não conseguiram detalhar os mecanismos da ativação por álcalis (Pacheco-Torgal, Castro-Gomes, Jalali, 2008; Marvila, Azevedo, Vieira, 2021).

Uma compreensão mais clara quanto a microestrutura de materiais álcali ativados e reações de geopolimerização foi obtida através dos trabalhos de Davidovits (1994) e Provis e Van Deventer (2007). Já em 2011, Habert e colaboradores demonstraram que materiais álcali ativados são uma alternativa ecológica ao concreto convencional por meio de uma análise do ciclo de vida do concreto geopolimérico, comparando-o com o ciclo de produção do cimento Portland. Com a solidificação dos principais conceitos a respeito dos materiais álcali ativados, eles passaram a ser utilizados em construções maiores como a ponte Victória, em 2013, e a expansão do aeroporto de Brisbane, em 2014 (Marilyn, Azevedo, Vieira, 2021).

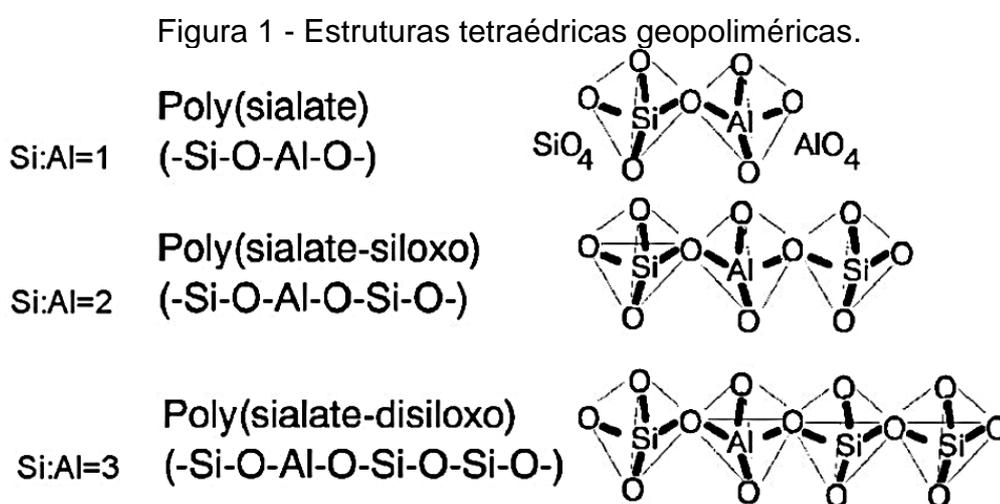
2.1.2 Definição e Estrutura

O geopolímero é um tipo de polímero inorgânico obtido em meio altamente alcalino, formado por uma longa cadeia reticulada entre unidades tetraédricas de AlO_4 e SiO_4 , que dão origem a uma estrutura tridimensional integrada (Hu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2015), no estado amorfo à semi-cristalino (Ren *et al.*, 2021; Severo *et al.*, 2013). Essa estrutura geopolimérica resulta da policondensação de monômeros (Davidovits, 1991), de forma a produzir propriedades memoráveis de elevadas resistências mecânica, ao fogo, à corrosão e alta durabilidade (Hu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2015).

A matriz química geopolimérica é constituída por uma rede de tetraedros de AlO_4 e SiO_4 por meio de ligações alternadas (em cadeias ou anéis com Al^{3+} e Si^{4+}) e do compartilhamento dos oxigênios nos vértices. O termo polissialato foi sugerido para a designação química dos geopolímeros à base de silicoaluminatos. (Barros, 2013; Davidovits, 1991; Pinto, 2006; Preza, 2021; Skaf, 2008).

De acordo com Davidovits (1991, 1994), a abreviatura sialato é originada de sílico-oxo-aluminato. Os átomos de metais alcalinos Na^+ , K^+ , Li^+ , Ca^{2+} , Ba^{2+} , NH_4^+ são responsáveis, indispensavelmente, pelo balanceamento das cargas negativas de Al^{3+} , o que torna a estrutura eletricamente neutra (Duxson *et al.*, 2007a; Pinto, 2006; Ren *et al.*, 2021; Skaf, 2008).

A composição química dos geopolímeros assemelha-se aquela encontrada nas zeólitas, com a diferença de que a microestrutura da zeólita é cristalina e a do geopolímero é de amorfa a semi-cristalina (Davidovits, 1991; He, 2012). As estruturas tridimensionais desses aluminossilicatos amorfos/semicristalinos foram descritos de acordo com as unidades poliméricas (razão Si/Al), podendo ser dos tipos: polissialatos (-Si-O-Al-O)_n, polissiloxossialato (-Si-O-Al-O-Si-O)_n ou polidissiloxossialato (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O)_n, assim como expresso na Figura 1 (Davidovits, 1991; Ren *et al.*, 2021; Skaf, 2008).



Fonte: Davidovits (2002)

Segundo Davidovits (1991, 1994), a equação empírica dos polissialatos possui a seguinte representação:



De forma que,

M – é um cátion (Na⁺, K⁺, Ca⁺, etc.)

n – é o grau de geopolimerização

z – é igual a 1, 2 ou 3

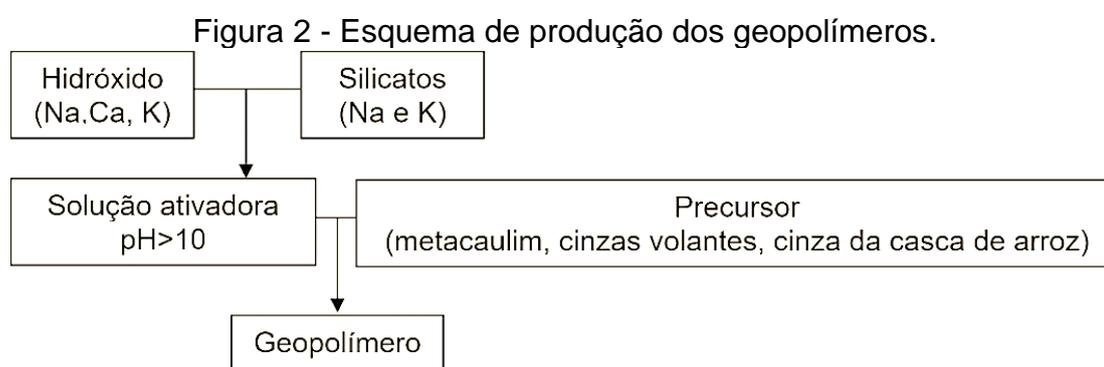
w – é o grau de hidratação

Quando o valor de z é 2, o polissialato é denominado de polissiloxossialato ou PSS (Barros, 2013; Skaf, 2008). Já para z igual a 3, o polissialato é conhecido como polissialatodissiloxo ou PSDS (Davidovits, 1991). Os geopolímeros são denominados polissiloxossialatos de sódio (Na-PSS) ou de sódio e potássio (Na, K-PSS) quando o

cátion (M) for sódio ou sódio e potássio, respectivamente (Barros, 2013; Davidovits, 1991; Skaf, 2008).

2.1.3 Constituintes

São utilizados basicamente dois reagentes para a produção do geopolímero: o precursor geopolimérico e a solução ativadora (Davidovits, 1994). Um esquema do processo de produção dos geopolímeros pode ser observado na Figura 2.



Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Apolonio (2017)

Segundo os autores Ferone *et al.* (2015), o prefixo “geo” conferido a este polímero é originário do uso de ligantes com origem de materiais geológicos. Quaisquer constituintes ricos em sílica e alumina, de acordo com Khale e Chaudhary (2007), podem ser utilizados como precursor geopolimérico.

A crosta terrestre é constituída por 65% de materiais a base de Si-Al, de forma que uma fração expressiva desses materiais pode ser utilizada na produção de geopolímeros (Xu, Deventer, 2000). Dentre os aluminossilicatos mais utilizados na síntese geopolimérica, tem-se: cinzas volantes (toniolo *et al.*, 2018; leay, Potts e Donoclift, 2018; Fan *et al.*, 2018), metacaulim (Chen *et al.*, 2017; Muñoz-Villarreal *et al.*, 2011; Ramón *et al.*, 2011), cinza da casca de arroz (Nazari, Bagheri, Riahi, 2011; Nimwinya *et al.*, 2016) e outros.

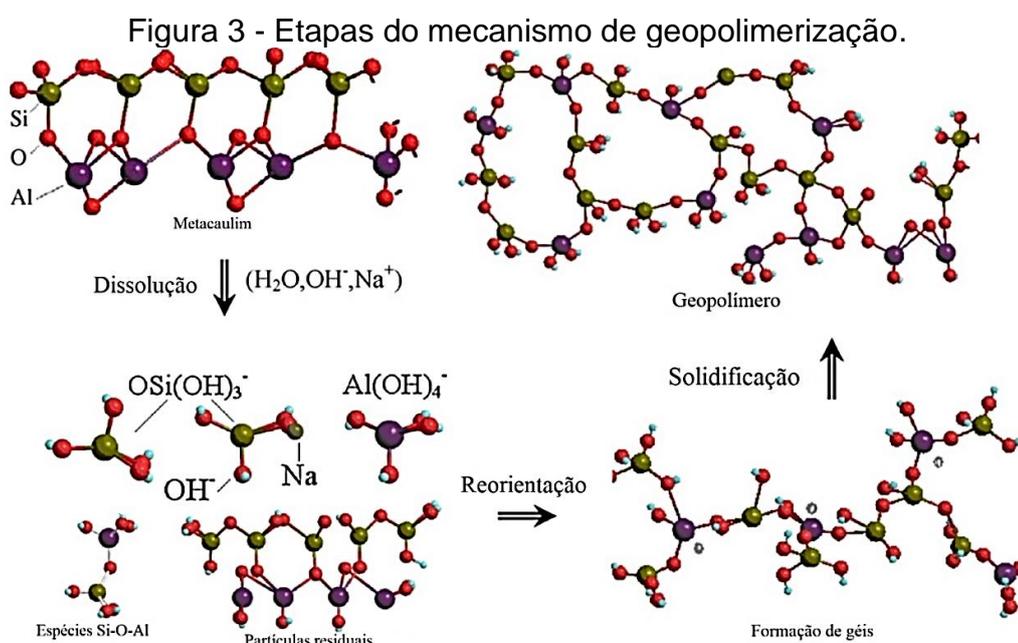
As soluções ativadoras, também designadas por soluções alcalinas, requerem uma quantidade representativa de íons OH⁻ para que possibilite a dissolução da rede amorfa tridimensional encontrada nos materiais de partida (Azevedo e Strecker, 2017). De acordo com Khale e Chaudhary (2007), entre outros ativadores, NaOH,

Na_2SO_4 , silicatos, Na_2CO_3 , K_2CO_3 , KOH e K_2SO_4 são ativadores alcalinos que podem ser utilizados na síntese de geopolímeros.

Assim como afirmam Komnitsas e Zaharaki (2007) e Xu e Deventer (2000), qualquer cátion alcalino ou alcalino terroso pode ser o componente alcalino em reações de geopolimerização. No entanto, a maioria dos estudos foram concentrados no efeito dos íons sódio (Na^+) e potássio (K^+). A escolha do tipo de cátion de metal alcalino utilizado, para Jaarsveld (2000), deve levar em consideração fatores como matéria-prima e finalidade de aplicação do geopolímero produzido.

2.1.4 Mecanismo de Geopolimerização

A geopolimerização é a reação de polimerização que ocorre nos componentes sílica e alumina derivados da fonte de aluminossilicato, quando dissolvida em um meio significativamente alcalino (Fernández-Jiménez, Palomo, Criado, 2005). Como pode ser observado no esquema da Figura 2, as etapas responsáveis pelo mecanismo de geopolimerização são dissolução, reorientação e solidificação (Barreto, 2022; Bing-Hui *et al.*, 2014; Komnitsas e Zaharaki, 2007; Marvila, Azevedo, Vieira, 2021; Yao, *et al.*, 2009; Provis e Deventer, 2007).



Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Yao *et al.* (2009)

O contato entre a solução alcalina e o precursor geopolimérico inicia a etapa de dissolução das partículas sólidas, ação que resulta na liberação de silicato e aluminato (Barreto, 2022; Duxson *et al.*, 2007a; Vassalo, Aguilár e Gumieri, 2014). O processo de dissolução de Al e Si, segundo Xu (2002), é função do cátion do metal alcalino, da concentração da solução ativadora, das taxas de mistura e tempo e da estrutura e composição dos constituintes.

A etapa de reorientação corresponde as reações entre os precursores móveis (íons formados no estágio anterior), que são o Al e Si do aluminossilicato e o Si da solução ativadora. Além disso, o catalisador dessa fase é o grupo hidroxila (OH^-). Dessa forma, os oligômeros de aluminossilicatos são formados, bem como ocorre a reestruturação interna parcial dos álcalis polissilicatos (Jaarsveld, Deventer e Lorenzeni, 1997; Silva, Sagoe-Crenstil e Sirivivatnanon, 2007; Silveira, 2021).

A solidificação ocorre por meio das reações de policondensação (Alves, 2018), etapa pela qual é formada a rede de aluminossilicato tridimensional amorfa ou semicristalina correspondente aos materiais geopoliméricos (Duxson *et al.*, 2007a). Assim como cita Xu (2002), os geopolímeros são passíveis de alta resistência mecânica ou da presença de fissuras em função, principalmente, da temperatura e da circulação do ar.

As reações de polimerização que ocorrem na produção do geopolímero são influenciadas pelas características das matérias-primas (como natureza do ativador, reatividade da sílica e alumina, cristalinidade e presença de ferro, cálcio e partículas inertes) (Duxson *et al.*, 2007a) e condições de processamento, as quais resultam em diversas características e propriedades (Severo *et al.*, 2013).

Ainda que o processo pelo qual ocorrem as reações na geopolimerização não seja completamente compreendido, a maioria dos mecanismos propostos consistem nas etapas de dissolução, reorientação e solidificação (Xu, Deventer, 2000). Mesmo com essa análise linear, essas etapas ocorrem quase que simultaneamente no momento da geopolimerização (Duxson *et al.*, 2007a; Palomo, Grutzeck e Blanco, 1999; Yao *et al.*, 2009).

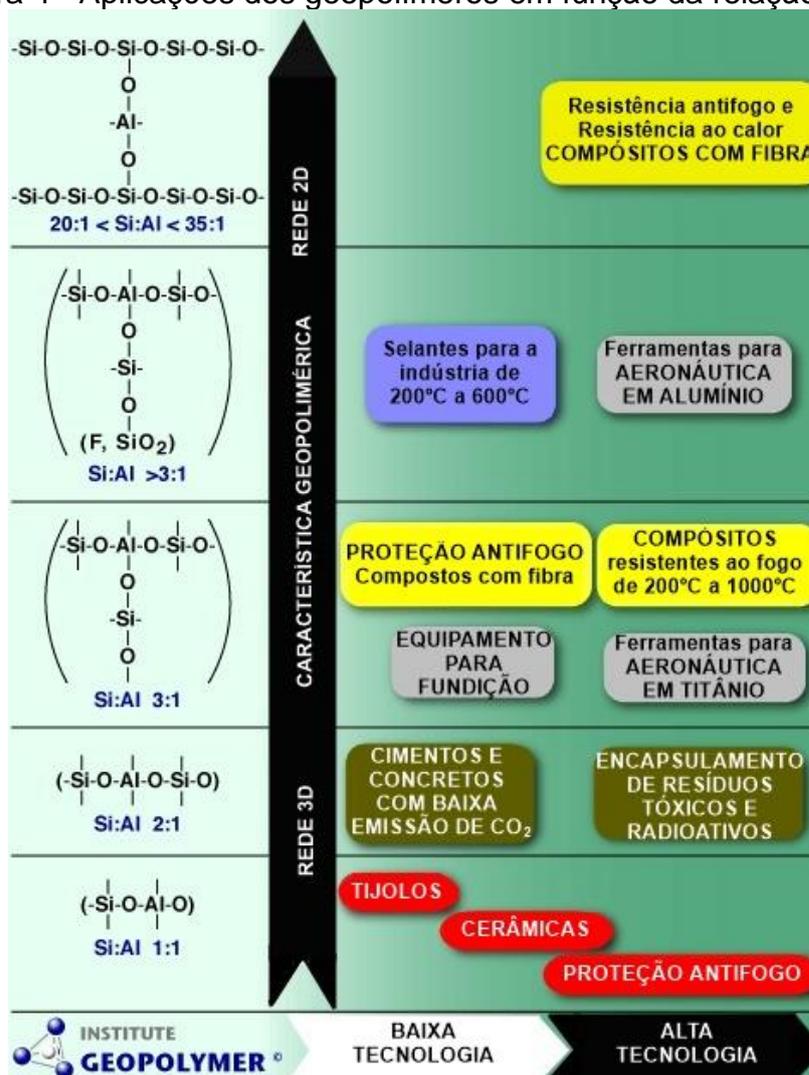
2.1.5 Principais Parâmetros Influenciadores

As aplicações dos geopolímeros são diversas e dependem das propriedades alcançadas na síntese. As propriedades obtidas na síntese geopolimérica são influenciadas pelas características das matérias-primas e pelas condições de processamento (Duxson *et al.*, 2007a; Duxson *et al.* 2007b; Severo *et al.*, 2013). Sendo assim, fatores como a fonte de aluminossilicato, a relação molar entre sílica e alumina, e as características da solução ativadora (como o álcali utilizado e sua concentração) possuem extrema relevância (Xu, 2002). Logo, o custo e o desempenho técnico podem ser direcionados para a aplicação almejada (Duxson *et al.* 2007b).

De acordo com Yun-Ming *et al.* (2016), a fonte de aluminossilicato tem influência nos produtos de reação dos materiais geopoliméricos e, de forma consequente, afeta suas propriedades. Para os autores, fatores como tamanho das partículas, composição química, área superficial, tamanho e forma das partículas e a presença de impurezas no precursor são aspectos com influência representativa nas propriedades do geopolímero. A nível de exemplo, eles relatam ainda que são produzidos geopolímeros com baixa reatividade quando precursores à base de argila são utilizados, de forma a provar a influência do tipo de aluminossilicato nas propriedades dos geopolímeros.

Outro parâmetro com influência significativa nas propriedades do geopolímero, é a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, que afeta no processo de dissolução, na reação de hidrólise e na condensação dos geopolímeros (Ken, Ramli e Ban, 2015). Para Gharzouni *et al.* (2016), como a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ afeta a etapa de dissolução, a disponibilidade dos íons de silício e alumínio para as reações de geopolimerização é diretamente afetada, de tal forma que uma maior dissolução promove uma maior quantidade de íons para a continuidade das reações. Ainda de acordo com os autores, a estrutura do geopolímero tem influência das reações de condensação. Conclui-se então, que a relação Si:Al (na forma atômica) tem relação direta com as possíveis aplicações atribuídas ao geopolímero fabricado, como pode ser observado na Figura 3 (Gao *et al.*, 2013).

Figura 4 - Aplicações dos geopolímeros em função da relação Si:Al.



Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de *Geopolymer Institute* (2006)

Como pode ser observado na Figura 3, segundo o *Geopolymer Institute* (2006), a relação atômica Si:Al determina as propriedades e os campos de aplicação para os materiais geopoliméricos. Essa relação também é responsável por gerar as estruturas do tipo polissialato, de forma que relações menores (Si:Al igual a 1, 2 ou 3) são ideais para produzir materiais aglomerantes, com uma rede 3D muito rígida, e altas relações (Si:Al > 15) geram características geopoliméricas para o material.

A solução alcalina é um parâmetro de extrema relevância quando se trata das propriedades obtidas em materiais geopoliméricos, tendo em vista que ela é responsável por controlar o processo inicial de dissolução da sílica e da alumina proveniente do aluminossilicato (Azimi *et al.*, 2016; Eduok, 2016). Para os autores, o

tipo de álcali utilizado e a concentração são os principais fatores que devem ser considerados na solução alcalina.

A concentração molar da solução alcalina tem uma influência direta na resistência à compressão do material geopolimérico, dessa forma o uso de uma concentração ótima resultará em um desempenho mecânico adequado para uma dada aplicação. A concentração do ativador reflete também no aumento da taxa de reação, de forma a resultar em um geopolímero com menos poros e mais resistente. Há um limite que considera a concentração molar como ideal, isso porque um valor maior do que esse limite resulta no efeito contrário, o que diminui a resistência do geopolímero (Eduok, 2016).

O tipo do ativador alcalino é um fator crítico para a formação de uma estrutura tetraédrica estável (Azimi *et al.*, 2016). Como o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH) são os mais usuais, ao comparar ambos, conclui-se que o KOH retém um nível maior de alcalinidade, enquanto o NaOH porta uma capacidade maior em liberar monômeros de silicato e aluminato (Duxson *et al.*, 2007a). Com relação ao custo, é menos oneroso produzir geopolímero com NaOH do que com KOH (Azimi *et al.*, 2016).

De acordo com Azimi *et al.* (2016), um aspecto relevante a ser debatido também é a temperatura de cura na produção de materiais geopoliméricos, tendo em vista que esse fator afeta a formação da matriz geopolimérica. Para os autores, o uso da temperatura ambiente e de uma atmosfera estável seria a opção mais flexível para aplicações comerciais do geopolímero.

2.1.6 Propriedades

Com base nos parâmetros que interferem na obtenção do material geopolimérico, diversas propriedades podem ser alcançadas para obter uma série de aplicações para os materiais geopoliméricos. Algumas propriedades que podem ser encontradas nos geopolímeros são resistência à compressão, adsorção de resíduos tóxicos, resistência à abrasão e estabilidade em altas temperaturas (Alves, 2018).

Assim como relatam Aleem e Arumairaj (2012) e Chowdhury *et al.* (2021), a resistência à compressão de concretos de base geopolimérica tem um resultado maior ao compará-los com concretos baseados em cimento Portland, de forma que, a resistência à compressão para concretos geopoliméricos é 1,5 vezes maior do que

concretos de cimento Portland para a mesma proporção de mistura. É possível observar, na Tabela 1, valores de resistência à compressão de diversas pesquisas, em função das razões molares e do tipo de aluminossilicato utilizado.

Tabela 1 - Resistência à compressão em geopolímeros.

Pesquisadores	Precursor	Relações Molares			Resistência à Compressão	
		$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$\frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{Al}_2\text{O}_3}$	(Mpa)	Idade
De Silva <i>et al.</i>	Metacaulim	3-3,81	1	13,6	22	3 dias
Fletcher <i>et al.</i>	Metacaulim	16	5	54	10,9	1 dia
Sleveson e Sagoe-Crents	Metacaulim	3,9	1,2	12	47	2h
Uzcano <i>et al.</i>	Metacaulim	3	1	10	34	1 dia
Kong <i>et al.</i>	Metacaulim	3,08	0,42		45	3 dias
Rowles e O'Connor	Metacaulim	5	1,29	18,01	64	7 dias
Subaer e Riessen	Metacaulim	3	0,6	10	86	7 dias
Kani e Allahverdi	Pozolana	6	0,92	8,5	45	28 dias
Latella <i>et al.</i>	Metacaulim	4	1	7,2	70	10 dias
Yunsheng <i>et al.</i>	Metacaulim	5,5	1	7	34,9	28 dias
Barbosa <i>et al.</i>	Metacaulim	3,3	0,83	10	49	3 dias
Heah <i>et al.</i>	Caulim	3,28	0,92	14,61	6	180 dias
Kamalloo <i>et al.</i>	Metacaulim	3,6-3,8	1-1,2	10-11	80	7 dias
Duxson <i>et al.</i>	Metacaulim	3-3,8	1	11	80	-

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Yun-Ming *et al.* (2016)

Os teores de Si, Al e Na, como pode ser visto por meio da Tabela 1, afetam a resistência à compressão de materiais geopoliméricos, de forma que os valores são passíveis de variação em função do precursor utilizado, assim como da idade de produção do geopolímero (Yun-Ming *et al.*, 2016).

A possibilidade de adsorver resíduos tóxicos é uma propriedade dos geopolímeros que permite a retirada de agentes tóxicos do meio ambiente, de forma que a estrutura tridimensional do geopolímero retém e aprisiona esses resíduos. Os materiais zeolíticos também possuem propriedade semelhante (Davidovits, 1994; Mobasher, Bernal e Provis, 2016; Rashad *et al.*, 2013).

A resistência à abrasão proveniente dos geopolímeros é maior do que essa característica em produtos de cimento Portland. Esse fator está relacionado a maior capacidade de sorção que os materiais geopoliméricos possuem e isso é justificado pela capacidade da matriz do geopolímero de transmitir e absorver água por meio da porosidade e da sucção capilar (Zhao e Sanjayan, 2011).

Os geopolímeros possuem um baixo teor de água ligada quimicamente devido aos seus mecanismos de formação e a matriz geopolimérica resultante. Quando comparados aos materiais cimentícios, esse fator (Rashad *et al.*, 2012) em conjunto com teor de água, composição do ativador alcalino e tipo de cátion utilizado, resultam em materiais mais estáveis quando expostos a altas temperaturas (Lahoti, Tan e Yang, 2019).

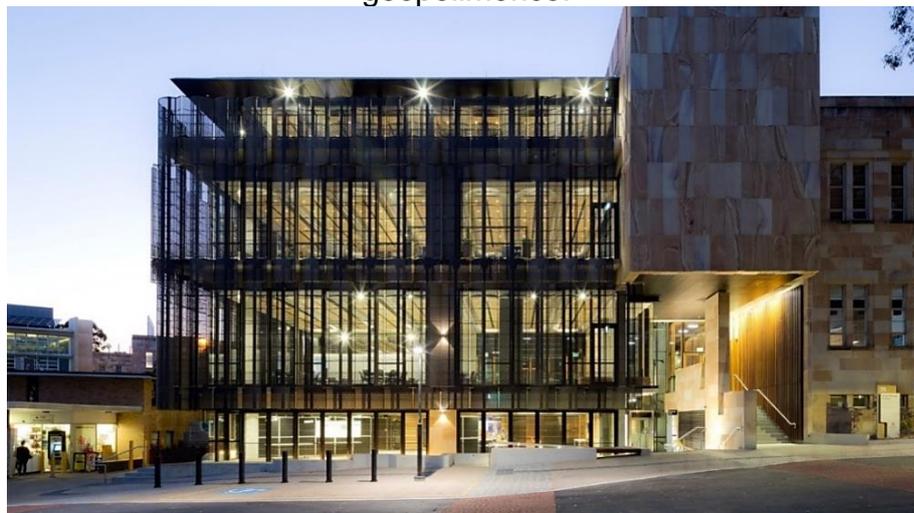
Os materiais geopoliméricos têm como característica uma gama de propriedades a serem alcançadas muito diversas. Outras propriedades dos geopolímeros que merecem destaque são resistência à ácido, à corrosão e à umidade, baixa retração e baixa condutividade térmica (Pouhet e Cyr, 2016; Xu *et al.*, 2015; Tchakoute *et al.*, 2015; Zeng e Wang, 2016), resistência ao congelamento e degelo (Bigno, 2008) e durabilidade (Palomo, Ruiz-Santaquiteria e Fernandezjimenez, 2009; Ramos *et al.*, 2018; Shi, Jiménez e Palomo, 2011).

2.1.7 Aplicações

A produção e aplicação de materiais geopoliméricos englobam construções localizadas na Rússia, China, Austrália e vários outros países em todo o mundo (Carrasco, 2015). De acordo com Davidovits (2015), os geopolímeros tem uma ampla variedade de aplicações, como materiais de construção de baixa tecnologia, isolamento térmico, materiais resistentes ao fogo, cimentos e betão, compósitos para reparação e reforço de infraestruturas, telhas cerâmicas de baixa energia, itens refratários, sistemas de resina de alta tecnologia, contenção de resíduos radioativos e tóxicos, compósitos para interior de aeronaves e automóveis, biotecnologias e decoração.

O primeiro edifício do mundo a utilizar concreto geopolimérico para fins estruturais foi em 2013, na Universidade de *Queensland* – Instituto de Mudança Global (*Geopolymer Institute*, 2013). De acordo com a ARUP (2015), *HASSELL, Bligh Tanner e Medland Metropolis* realizaram uma parceria para atender os níveis mais avançados de sustentabilidade do mundo com o projeto desse edifício (Fotografia 1), que foi capaz de reduzir o teor de carbono gerado em sua produção e aumentar os níveis de resistência ao fogo com o uso de um concreto geopolimérico pré-moldado para partes da estrutura. Devido ao uso desse material, houve uma redução de até 8 toneladas de CO₂ por 10 toneladas de concreto convencional (Futurarc, 2013).

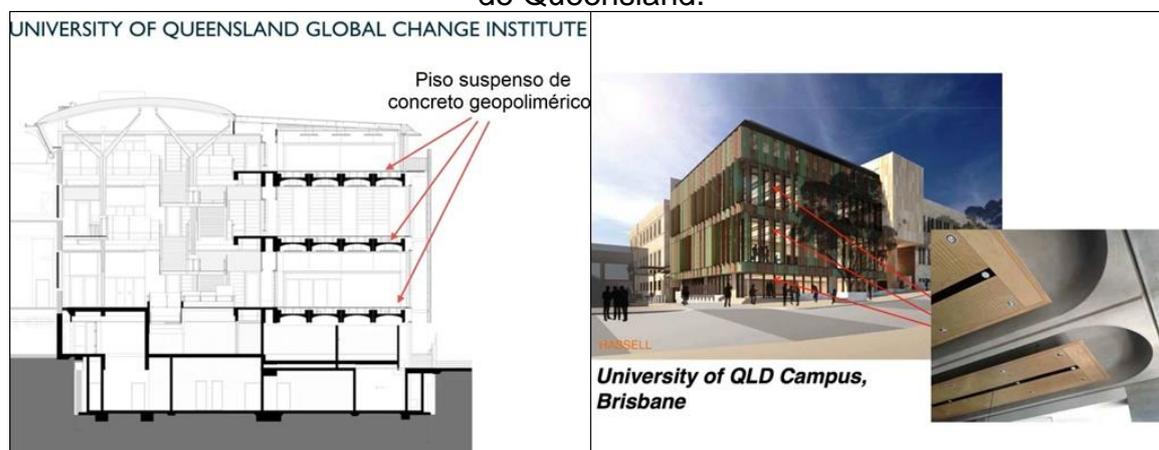
Fotografia 1 – Universidade de Queensland com 3 pisos construídos com concreto geopolimérico.



Fonte: *Geopolymer Institute* (2013)

É possível observar, na Figura 4, os locais onde foram aplicados o concreto geopolimérico no projeto.

Fotografia 2 - Locais onde foram aplicados concreto geopolimérico na Universidade de Queensland.



Fonte: A Autora (2025)

Adaptado de: *Geopolymer Institute* (2014)

Por meio desses três pisos suspensos, como pode ser identificado na Figura 4, foi possível gerar ambientes com desempenhos térmico e acústico otimizados e *desing* sustentáveis (Davidovits, 2014).

Considerado pelo *Geopolymer Institute* (2014) o aeroporto mais verde do mundo, o aeroporto *Brisbane West Wellcamp* (Fotografia 2) é outra aplicação onde se utilizou mais de trinta mil metros cúbicos de concreto geopolimérico. Localizado em

Toowoomba, Austrália, ele foi construído pela empresa *Wagners*, em 2014 (Geo-Pol, 2015).

Fotografia 3 - Aeroporto de Brisbane West Wellcamp.



Fonte: *Geopolymer Institute* (2014)

A Austrália é um dos principais países que possui uma quantidade significativa de trabalhos na área de materiais alcalinos e que trabalham com materiais geopoliméricos na escala comercial. Dessa forma, é possível observar na Fotografia 3, exemplos de aplicações que utilizam produtos geopoliméricos em grande volume para projetos de infraestrutura civil, constituídos pela mistura de cinzas volantes e escória granulada de alto forno (Provis e Bernal, 2014).

Fotografia 4 - Exemplos de construções com material geopolimérico.



Fonte: Provis e Bernal (2014)

É possível observar na Fotografia 4a uma habitação residencial com uma laje que está sendo concretada com material geopolimérico. Na Figura 4b, observa-se uma série de painéis externos que foram pré-fabricados com concreto baseado em

geopolímero. Quando se refere a moldagem *in loco*, pode ser visto na Figura 4c, uma calçada moldada com concreto geopolimérico. Por fim, na Fotografia 4d, foi construído um muro de contenção no perímetro de uma ponte rodoviária (Provis e Bernal, 2014).

No Brasil, a aplicação e comercialização de materiais geopoliméricos ainda é feita de maneira mais contida. A empresa *Wincret Designer Concrete Products Ltda*, conhecida pela marca *Geo-Pol*, comercializa três produtos de base geopolimérica: Cimento GP, Microcimento GP-E (composto por cimento geopoliméricos, agregados e fibras sintéticas) e “Musse” GP-B (um isolante térmico expandido). As aplicações mais conhecidas envolvem a produção de pedras e peças arquitetônicas, como o acabamento do Templo de Salomão e os cobogós do Restaurante *Manish* (Fotografia 5), em São Paulo (Froener, 2016).

Fotografia 5 - Exemplos de aplicações de materiais geopoliméricos no Brasil.



Fonte: Froener (2016)

É possível observar, na Fotografia 5a, o restaurante árabe *Manish* e os elementos vazados que foram produzidos com material geopolimérico. Já na Fotografia 5b, observa-se o Templo de Salomão com peças especiais que replicam a cor e a textura da Pedra de Israel (Froener, 2016).

2.2 RESÍDUOS SÓLIDOS

O aumento da densidade populacional, a migração das pessoas da área rural para área urbana e o crescimento industrial acompanham avanços na tecnologia e na ciência que buscam melhorar a qualidade de vida da população de modo geral. Uma das consequências desse processo é a geração de resíduos de origens diversas que

podem ser danosos ao meio ambiente e a vida da população (Moya *et al.*, 2017; Sondh *et al.*, 2022).

De acordo com o *United Nations Department of Economic and Social Affairs* (2022), a população mundial alcançou 8 bilhões, em novembro de 2022, e tem projeções que alcançará 8,5 bilhões em 2030, 9,7 bilhões em 2050 e 10,4 bilhões em 2100. Com esse rápido aumento da população global, a geração e o acúmulo de resíduos sólidos preocupam o cenário mundial de gestão de resíduos (Sondh *et al.*, 2022).

Os resíduos sólidos podem ser definidos como produtos resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição que se encontram nos estados sólidos e semissólidos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004). No Brasil, o crescimento e o desenvolvimento do país têm relação direta com o gerenciamento de resíduos sólidos (Brito, 2021).

Em 2020, conforme os últimos dados registrados pelo panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), foram geradas 82,5 milhões de toneladas de resíduo. Dessa quantia, 92,2% (76,1 milhões) foi coletado, o que evidencia que 6,4 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidas junto aos serviços de limpeza. Dos resíduos coletados, 30,3 milhões de toneladas foram dispostos em lixões e aterros controlados. Esse tipo de destinação inadequada não observam as normas operacionais específicas previstas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), o que pode resultar em danos ou riscos à saúde pública e à segurança, além de maximizar os impactos ambientais adversos.

Impactos ambientais oriundos da disposição irregular e da diversidade de resíduos sólidos promovem, também, riscos à saúde humana. A exposição humana a uma série de substâncias tóxicas pode ser intensificada devido à disposição dos resíduos no solo. Além disso, a contaminação do ar e da água advinda da degradação dos resíduos também possibilitam riscos e danos à população, de forma a desencadear fontes originárias de diversas doenças (Gouveia, 2012).

Sendo assim, a busca de aproveitamento destes materiais através de metodologias ambientalmente seguras é o foco de várias pesquisas (Ding *et al.*, 2021; Paiva, 2009; Sondh *et al.*, 2022). Nas áreas de construção civil, de materiais, de química e de minas, há uma série de estudos que envolvem o aproveitamento de resíduos provenientes de pneus (Martins, 2019), vidros (Rollim, 2019), cerâmicas (Melo, 2017), restos de demolição (Santos, 2007), fumo de sílica (Bianchini, 2010) e

outros, de forma que são inseridos na matriz de um novo material, a fim de reutilizar o resíduo, diminuir a poluição do meio ambiente e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos destinados de forma inadequada (Paiva, 2009).

A NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os resíduos sólidos quanto ao seu potencial risco à saúde da população e ao meio ambiente:

a) Classe I – resíduos perigosos: apresentam periculosidade ou inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade;

b) Classe II A – resíduos não perigosos e não inertes: não pertencem a classe I ou classe II B e apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;

c) Classe II B – resíduos não perigosos e inertes: quando submetidos ao contato com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não resultarem em constituintes solubilizados a concentrações maiores que os padrões de potabilidade de água, excluindo-se, aspecto, turbidez, cor, sabor e dureza, de acordo com anexo G desta norma.

Com base nesta classificação, os resíduos de vidros provenientes das garrafas *long neck* se enquadram na classe II B, de forma que são considerados resíduos não perigosos e não inertes, o que facilita o manuseio durante os processos de coleta, beneficiamento e aproveitamento do resíduo de vidro na produção de novos materiais geopoliméricos.

2.3 VIDRO

2.3.1 Aspectos Históricos

Desde a Idade da Pedra os vidros naturais eram formados quando certos tipos de rochas eram fundidas a elevadas temperaturas e solidificadas rapidamente, assim como podia ocorrer nas erupções vulcânicas. Esses vidros formados naturalmente permitiram que os humanos da Idade da Pedra produzissem ferramentas de corte para uso doméstico e para defesa (Alves, Gimenez, Mazalli, 2001).

O descobrimento da produção do vidro artificial, assim como grande parte dos materiais antigos, tem uma origem incerta. A história mais aceitável por parte dos historiadores remete a origem do vidro aos fenícios. A descoberta ocasional do vidro é datada de cerca de 7000 anos a.C, na qual navegadores fenícios acenderam uma

fogueira com blocos de salitre sobre a areia. Com o passar do tempo, observaram a formação de uma substância líquida brilhante e que solidificava rapidamente, de forma a marcar a descoberta do vidro (Akerman, 2000; Alves, Gimenez, Mazalli, 2001).

A arte de fazer objetos de vidro teve um desenvolvimento fundamental com a técnica de sopro desenvolvida por volta de 300 a.C. na região da Babilônia. Por meio dessa técnica, uma peça oca de vidro é gerada através de um tubo de ferro que é inserido na massa de ferro fundida e soprada pela extremidade contrária. A importância dessa técnica é tão representativa que, ainda hoje, o princípio da sopragem é utilizada nos equipamentos mais modernos para fabricação de vidros (Akerman, 2000).

A obtenção de vidro incolor só foi possível por volta de 100 d.C., por meio da introdução de óxido de manganês como constituinte e por melhorias nos fornos (produção de altas temperaturas e controle da atmosfera de combustão), o que resultaram também em um melhor processo de fusão e, conseqüentemente, vidros com melhores qualidades (Alves, Gimenez, Mazalli, 2001).

O uso de vidros para janelas e vitrais foi popularizado na Idade Média e, por volta de 1700, os copos e jarras brilhantes originados de Veneza, também conhecidos como cristais, tornaram-se famosos. Apenas no início deste século, a produção de recipientes de vidro, vidro plano, tubos e fibras foi automatizada (Zanotto, 1989).

Em 1915, foi inaugurado o primeiro departamento dedicado ao ensino e pesquisa de vidros na Universidade de Sheffield, na Inglaterra. Ocorreu um notável avanço científico e tecnológico, a partir dos anos 60, com o desenvolvimento dos vidros (Zanotto, 1989).

No Brasil, a história do vidro teve início com as invasões holandesas entre 1624 e 1635, em Olinda e Recife. Quatro artesãos, que acompanhavam o príncipe Maurício de Nassau, criaram a primeira oficina de vidro, na qual fabricava vidros para janelas, copos e frascos. Até o século XX, a produção do vidro era artesanal e as peças eram produzidas uma a uma através de sopro e prensagem. A partir do início deste século, a indústria do vidro se desenvolveu por meio dos fornos contínuos para recuperação de calor e equipados com máquinas para produções em massa (Companhia Brasileira de Cristal, CEBRACE, 2012).

2.3.2 Definição

O vidro se enquadra dentre os diversos resíduos sólidos que são gerados mundialmente e que precisam de uma destinação adequada a fim da otimização dos recursos e diminuição da poluição ambiental (Associação Brasileira das Indústrias de Vidro, ABIVIDRO, 2021). Uma definição utilizada em vários procedimentos em tecnologia de vidro, como nas normas DIN, ISO e ASTM, associam a palavra vidro a produtos inorgânicos que foram submetidos a um processo de fundição e resfriamento rápido, mas sem cristalizar. Ao longo dos últimos dois séculos, muitas definições foram propostas, assim como pode ser observado no Quadro 2 (Zanotto, Mauro, 2017).

Em 2017, Edgar Dutra Zanotto, professor do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e coordenador do *Center for Research, Technology and Education in Vitreous Materials (CerTEV)* – um dos Centros de Pesquisa, Inovação e Difusão (CEPIDs) financiados pela FAPESP, relatou uma série de erros relacionados as definições de vidros elaboradas até o momento, entre eles, a afirmação de que o vidro é um material sólido, isotrópico.

Quadro 2 - Definições de vidro.

Autor	Ano	Definição
Gustav Heinrich J. A. Tammann	1933	“os vidros são fundidos solidificados sub-resfriados”
Robert H. Doremus	1973	“um material formado pelo resfriamento do estado líquido normal que não mostrou nenhuma mudança descontínua nas propriedades a qualquer temperatura, mas mais ou menos rígida por meio de um aumento progressivo de sua viscosidade”
J. Wong e C. Austen Angell	1976	“o vidro é um material amorfo aos raios-X que exhibe a transição vítrea. Isso sendo definido como aquele fenômeno no qual uma fase sólida amorfa exhibe com a mudança de temperatura (aquecimento) uma mudança mais ou menos repentina em suas propriedades termodinâmicas derivadas, como capacidade de calor e coeficiente de expansão, de valores semelhantes a cristais para líquidos.”
Eduardo Mari	1976	“sólidos amorfos que são obtidos pelo resfriamento rápido de uma massa fundida evitando sua cristalização”
Jerzi Zarzycki	1982	“um sólido não cristalino que apresenta o fenômeno da transição vítrea”
K. J. Rao	2002	“um sólido obtido por super-resfriamento de um líquido e que é amorfo aos raios X”.
Arun K. Varshneya	2012	“O vidro é um sólido com uma estrutura não cristalina, que se converte continuamente em líquido ao ser aquecido”
Ivan S. Gutzow e Juern W. Schmelzer	2013	“Os vidros são sólidos amorfos termodinamicamente não-equilíbrios estabilizados cineticamente, nos quais a desordem molecular e as propriedades termodinâmicas correspondentes ao estado do respectivo sub-resfriamento fundem em uma temperatura T^* são congelados. Assim, T^* difere da temperatura real T .”

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Zanotto e Mauro (2017)

Além disso, Zanotto e Mauro (2017) elaboraram uma crítica ao estado da arte do vidro, a fim de esclarecer alguns pontos e trazer uma definição atualizada do material, na qual relata que o vidro é um material em um estado físico fora do equilíbrio termodinâmico, aparentemente sólido em uma curta escala de tempo, porém relaxa em direção ao estado líquido de forma contínua.

Em uma definição ainda mais elaborada, Zanotto relata que:

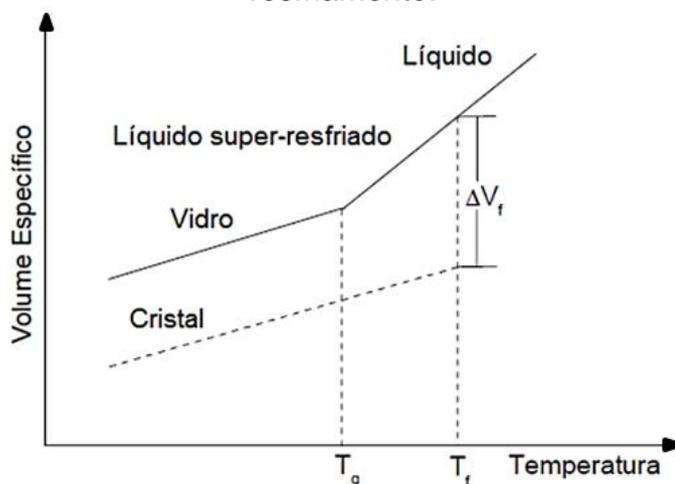
O vidro é um estado de matéria condensado, não cristalino e não equilibrado, que exibe uma transição vítrea. A estrutura dos vidros é semelhante à de seus líquidos super-resfriados (LSR) e eles relaxam espontaneamente em direção ao estado LSR. Seu destino final é solidificar, ou seja, cristalizar (Zanotto, Mauro, 2017, p. 5).

Esta definição pode ser compreendida com maior facilidade quando se tem conhecimento do fenômeno de transição vítrea (Zanotto, Mauro, 2017).

2.3.3 Transição Vítrea

A transição vítrea descreve a região de temperatura de um material, na qual separa estados da matéria que possuem propriedades diferentes. De acordo com Araújo (1997), quando um material no estado líquido é submetido a um decréscimo de temperatura gradativo, chega-se a uma temperatura de fusão (T_f), na qual podem ocorrer dois fenômenos. Um deles é o fenômeno da cristalização, com alteração do volume específico do material, associado a ordenação das moléculas. O outro evento possível é o estado líquido super-resfriado, no qual não há alteração do volume específico proveniente da orientação das moléculas. Na Figura 5, é possível observar os fenômenos descritos anteriormente.

Figura 5 - Variação do volume em função da temperatura no processo de resfriamento.



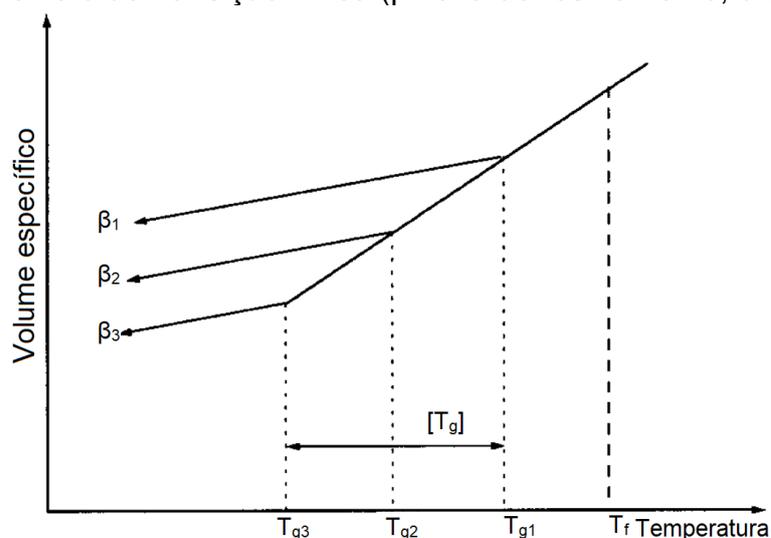
Fonte: Araújo (1997)

À medida que a temperatura continua a diminuir no estado líquido super-resfriado, a viscosidade do material aumenta, o que dificulta a mobilidade atômica e impossibilita a cristalização. A partir dessa temperatura (T_g), ainda que o material permaneça com a característica de líquido (moléculas desorganizadas sem um arranjo definido), ocorre uma mudança de fase e o líquido super-resfriado passa para o estado vítreo, como pode ser observado na Figura 5. Em virtude dessa mudança, T_g é definida como temperatura de transição vítrea (Akerman, 2000; Araújo, 1997).

Dessa forma, entende-se que T_g é a temperatura que separa a passagem de um material do estado vítreo para o estado viscoelástico. Quando no estado viscoelástico, um material responde de forma elástica a uma força aplicada e não deforma de forma permanente. Em contrapartida, no estado vítreo, um material não deforma nem modo permanente, nem modo elástico, sendo mais propenso a quebrar-se (Alves, Gimenez, Mazalli, 2001).

A posição de T_g pode variar de acordo com a taxa de resfriamento. Um resfriamento mais rápido pode deslocar a T_g para temperaturas maiores, enquanto resfriamentos mais lentos deslocam a T_g para menores temperaturas. Em virtude disso, prefere-se substituir T_g por um intervalo de transição vítrea [T_g], de forma a delimitar valores de T_g para taxa de resfriamento alta e baixa, conforme pode ser observado na Figura 6 (Araújo, 1997).

Figura 6 - Intervalo de transição vítrea (β : taxa de resfriamento, onde $\beta_1 > \beta_2 > \beta_3$).



Fonte: Araújo (1997)

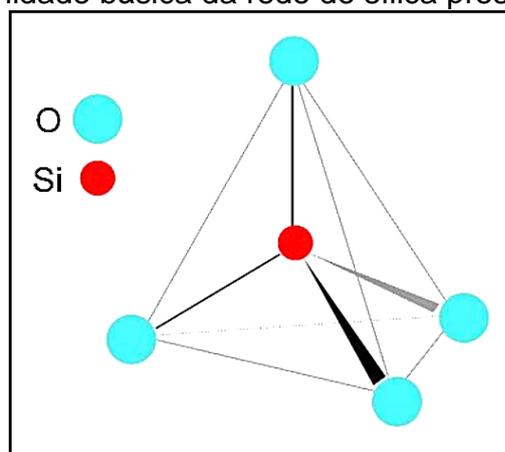
Assim como observado na Figura 6, a temperatura de transição (T_g) não representa um valor fixo, mas sim uma faixa, de forma que dentro desse intervalo, T_g pode assumir diversos valores, em função da velocidade de resfriamento do material (Akerman, 2000).

2.3.4 Estrutura e Composição

A natureza química e a ordenação dos elementos constituintes são o que condicionam as propriedades dos vidros. Em vista disso, as possíveis aplicações para este material são funções da estrutura e da composição química apresentada pelo vidro (Navarro, 2003).

A estrutura básica encontrada nos vidros mais comuns (vidros silicatos) é composto por redes conectadas tridimensionalmente. Como pode ser observado na Figura 7, a unidade básica da rede de sílica, que constitui o vidro, é o tetraedro de silício-oxigênio, sendo este formado por um átomo menor de silício ligado a quatro átomos maiores de oxigênio (Akerman, 2000).

Figura 7 - Unidade básica da rede de sílica presente no vidro.

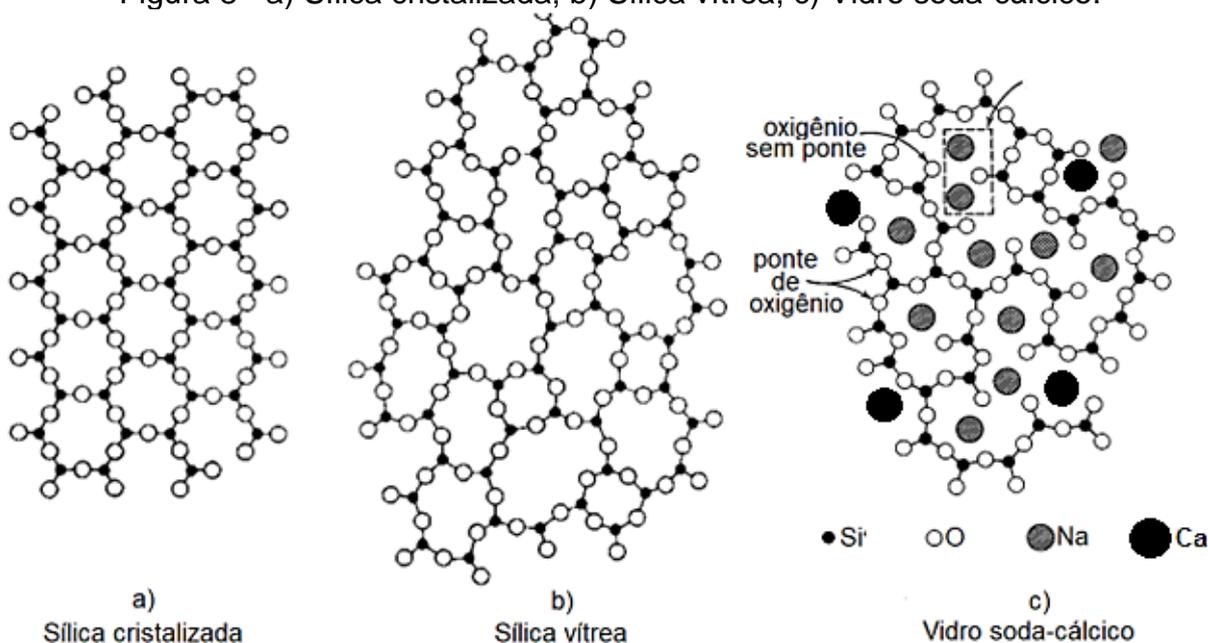


Fonte: Gomes, Furtado, Souza (2018)

Segundo Akerman (2000), os tetraedros de sílica estão ligados pelos vértices por meio do compartilhamento de um átomo de oxigênio, por dois átomos de silício. Uma rede tridimensional é formada quando quatro átomos de oxigênio de um tetraedro são compartilhados com quatro outros tetraedros, assim como acontece em minerais de sílica pura (Figura 8a). Pelo fato de cada oxigênio estar ligado a dois átomos, conforme a Figura 8b, eles formam pontes e, por isso, são chamados de pontantes.

A continuidade da rede é interrompida quando átomos, como o sódio, ligam-se ionicamente ao oxigênio, tendo em vista que alguns átomos de oxigênio passam a se ligar apenas a um átomo de silício. Este tipo de átomo de oxigênio passa a ser denominado oxigênio não pontante (Figura 8c). Sendo assim, óxidos alcalinos são utilizados para facilitar o processo de produção ao diminuir a viscosidade do vidro, quando quebram algumas ligações (pontes) e, por isso, são utilizados como fundentes (Akerman, 2000).

Figura 8 - a) Sílica cristalizada; b) Sílica vítrea; c) Vidro soda-cálcico.



Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Zachariasen (1932) e Toffoli (2014)

Os vidros produzidos de forma comercial são obtidos a partir de uma mistura de minerais (Shelby, 2005), que são combinados a fim de desempenhar funções que irão refletir nas propriedades finais do vidro, conforme pode ser observado no Quadro 3 (Pinto-Coelho, 2009).

Quadro 3 - Principais componentes do vidro simples e suas funções.

Componente	Fórmula	%	Função
Óxido de Sílica	SiO ₂	74	Vitrificante
Óxido de Sódio	Na ₂ O	12	Baixa o ponto de fusão da sílica
Óxido de Cálcio	CaO	9	Estabilidade
Óxido de Magnésio	MgO	2	Resistência Mecânica
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	2	Resistência
Potássio	K	1	Estabilidade

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Pinto-Coelho (2009)

De acordo com Shelby (2005), quaisquer que sejam as origens dos componentes utilizados na produção do vidro, os componentes da rede vítrea podem ser divididos em cinco categorias tendo por base seu papel no processo: formador de vidro, fundente, modificador de propriedade, corante e agente de colagem. Diferentes categorias podem ser atribuídas para um mesmo composto quando estes são

utilizados para diferentes finalidades. A nível de exemplificação, a alumina pode ser utilizada tanto como formadora de vidro, como modificador de propriedade, dependendo da finalidade para a qual foi adicionada no momento da produção do vidro.

O formador de vidro, também conhecido como formadores de rede, é o elemento principal na produção do vidro. A identidade desses compostos geralmente serve de base para o nome genérico do vidro. Nos casos em que a sílica é o formador de rede, o vidro é chamado de silicato. Quando o óxido bórico também tiver uma quantidade significativa, além da sílica, a amostra é chamada de vidro borossilicato (Shelby, 2005).

Alguns dos principais formadores de vidro são óxido bórico (B_2O_3), óxido fosfórico (P_2O_5) e sílica (SiO_2), sendo este último o principal formador de vidro utilizado comercialmente (Shelby, 2005). Como componente da rede vítrea, os formadores de rede são responsáveis por formar a rede vítrea, de tal forma que os cátions e oxigênios ligam-se entre si e promovem ilhas estáveis dentro de uma estrutura de alta viscosidade (Navarro, 2003).

A produção de vidros exclusivamente de sílica resultaria em um processo extremamente oneroso, devido sua alta temperatura de fusão. Dessa forma, utilizam-se fundentes para facilitar o processo de produção, ao reduzir a temperatura de processamento, por exemplo. Os fundentes mais comumente utilizados são os óxidos alcalinos, como Na_2O , K_2O e PbO (Shelby, 2005).

A adição de grandes quantidades de óxidos alcalinos, assim como afirma Shelby (2005) pode resultar na degradação de muitas propriedades do vidro, como a durabilidade química, que pode ser afetada a nível de impossibilitar o uso do vidro para recipientes, janelas ou fibras de isolamento. Os modificadores de propriedades, que incluem óxidos de metais alcalino-terrosos e de transição (em especial óxido de alumínio), são utilizados para combater essa degradação, de forma a romper a estrutura vítrea e diminuir a viscosidade.

A cor final do vidro, ainda de acordo com esse autor, é controlada por corantes. Geralmente, são utilizados óxidos dos metais de transição 3d ou das terras raras 4f. Os corantes são utilizados em pequenas quantidades e apenas quando o controle da coloração é desejado. Impurezas presentes na areia utilizada para produzir vidros comerciais, como óxidos de ferro, agem como colorantes não intencionais no vidro e

corantes podem ser utilizados para neutralizar esse efeito, sendo conhecidos como descolorantes.

A remoção de bolhas do fundido é realizada pelos agentes de colagem, os quais incluem vários sulfatos, óxidos de arsênio e antimônio, nitratos de potássio e sódio, NaCl e fluoretos como CaF_2 , NaF e Na_3AlF_6 . Os agentes de colagem são inseridos em quantidade menores de 1%, em peso, mas sua presença é de extrema importância nos vidros comerciais, cuja produção seria bastante onerosa com a ausência desses agentes para reduzir o teor de bolhas indesejadas no produto final (Shelby, 2005).

2.3.5 Tipos de Vidros

Determinadas alterações na composição química do vidro podem promover propriedades específicas a eles, tais como: índice de refração, coloração, viscosidade e durabilidade. Sendo assim, é usual classificar os vidros em famílias principais, de acordo com sua composição química (Sales, 2014). Segundo Pinto-Coelho (2009), os vidros podem ser do tipo sílica vítrea, sodo-cálcico, boro-silicato, ao chumbo, alumínio-boro-silicato e vidros planos.

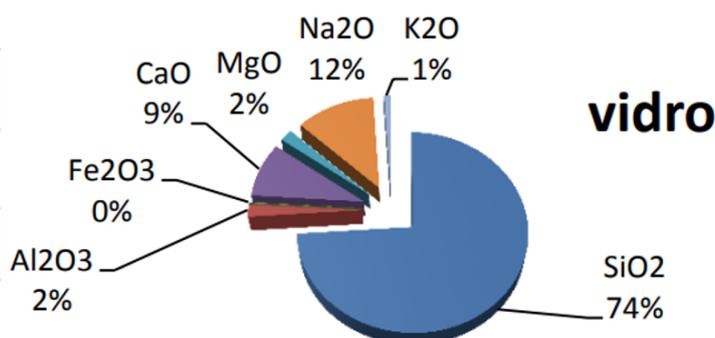
Os vidros sílica vítrea são compostos por sílica pura e tem aplicações na indústria aero-espacial, em telescópios e em fibras óticas. No caso dos vidros sodo-cálcico, eles apresentam até 73% de sílica, 10 a 12 % de óxido de cálcio e 12 a 14% de óxido de sódio; além disso, suas aplicações envolvem embalagens, eletrodomésticos e construção civil. Os vidros boro-silicatos possuem teores de até 13% de óxido de boro e são comumente encontrados em utensílios resistentes a choques térmicos. Parcelas de até 37% de PbO podem ser encontrados nos vidros ao chumbo, com aplicações que envolvem cristais, como copos e taças. Os vidros alumino-boro-silicato possuem alto teor de alumina e são utilizados em fibras de reforço e vidros com alta resistência química. Já os vidros planos são amplamente utilizados para vidros temperados, laminados, de controle solar e para espelhos (Pinto-Coelho, 2009).

Como as garrafas *long neck* se enquadram nos vidros sodo-cálcicos e elas são o foco dessa pesquisa, será dado uma ênfase maior a este tipo de vidro.

2.3.5.1 Vidro Soda-Cálcico

Os vidros soda-cálcicos são largamente utilizados e compreendem a família de vidros mais antiga. A categoria dos vidros soda-cálcicos envolve a maioria das garrafas, potes, frascos, bulbos, janelas e tubos de lâmpadas (Pinto-Coelho, 2009). Conforme pode ser visto na Figura 6, a semelhança entre composição química dos vidros da crosta terrestre e dos vidros soda-cálcicos justificam sua ampla utilização e durabilidade (Barros, 2010).

Óxido	% na crosta terrestre	% nos vidros comuns
SiO ₂ (sílica)	60	74
Al ₂ O ₃ (alumina)	15	2
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	7	0,1
CaO (cálcio)	5	9
MgO (magnésio)	3	2
Na ₂ O (sódio)	4	12
K ₂ O (potássio)	3	1



Fonte: A Autora (2025)
Nota: Adaptado de Barros (2010)

Nos vidros soda-cálcicos, são utilizados fluxos estabilizantes no lugar de fluxos alcalinos na composição do vidro, com a finalidade de reduzir a solubilidade dos vidros e manter a facilidade de fusão. O cálcio é o oxido estabilizante mais utilizado, muitas vezes juntos com o óxido de magnésio. Em vista disso, foi atribuída sua denominação (Pinto-Coelho, 2009).

Grande parte dos vidros soda-cálcicos estão inseridos em uma faixa estreita de composição. Normalmente, eles contêm entre 8 e 12% de óxido de cálcio e de 12 a 17% de óxido alcalino, em especial óxido de sódio. Grandes quantidades de cálcio resultam em um vidro com tendência a devitrificar (cristalizar) durante o processo de produção. Com a adição de pouco cálcio, ou com o aumento significativo do teor de

alcalinos resulta em um vidro com baixa durabilidade química. Geralmente, utiliza-se de 0,6 a 2,5% de alumina para otimizar a durabilidade química (Akerman, 2000).

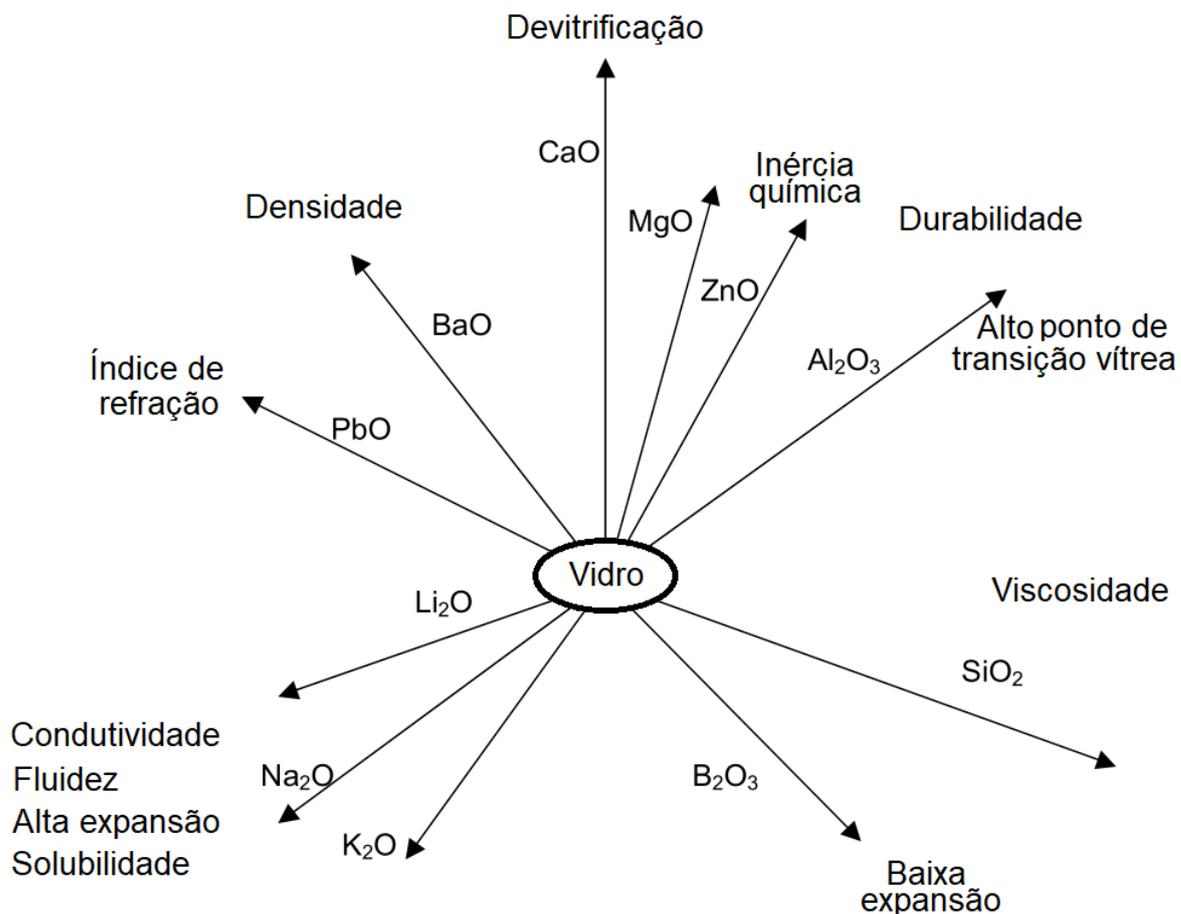
2.3.6 Propriedades

As propriedades dos vidros são influenciadas pelas características estruturais, que, por sua vez, estão condicionadas pela composição química e, em menor escala, pela história térmica. Tendo em vista que a composição do vidro pode ser alterada pela adição de diversos componentes e em várias proporções, é possível a obtenção de vidros com propriedades variadas. A história térmica tem influência, através da relação estrutural, nas características finais do produto e esse fato está relacionado com a velocidade que o vidro é resfriado dentro do intervalo de transformação, ou seja, com o tempo que o vidro teve para dissipar o calor (Akerman, 2000). Posto isso, através do conhecimento do efeito dos componentes inseridos na estrutura do vidro, composições de vidros apropriadas para cada processo produtivo e consequentes aplicações podem ser projetadas (Akerman, 2013).

A variação dos óxidos constituintes pode alterar as propriedades dos vidros. A nível de exemplificação, a presença do óxido de cálcio no vidro favorece a divitrificação. Já o aumento do óxido de sódio, diminui a durabilidade e aumenta a solubilidade, a fluidez e a expansão do vidro. Ao contrário do óxido de sódio, o óxido de alumínio aumenta a viscosidade e a durabilidade, enquanto o aumento da densidade e da expansão térmica e a redução da viscosidade são atribuídos a presença dos óxidos de bário e chumbo. Através da Figura 9 é possível observar o comportamento qualitativo de alguns óxidos presentes no vidro (Akerman, 2000).

Entre as principais propriedades que podem ser obtidas através do vidro, encontram-se: viscosidade (Alves, Gimenez, Mazalli, 2001; Shelby, 2005), dureza (Shelby, Lacourse, Clare, 1991), resistência química (Akerman, 2000; Zanotto, 2002), resistência mecânica (Ackerman, 2013) e cor (Alves, Gimenez, Mazalli, 2001; Helmenstine, 2018).

Figura 9 - Funções relativas aos óxidos no vidro.

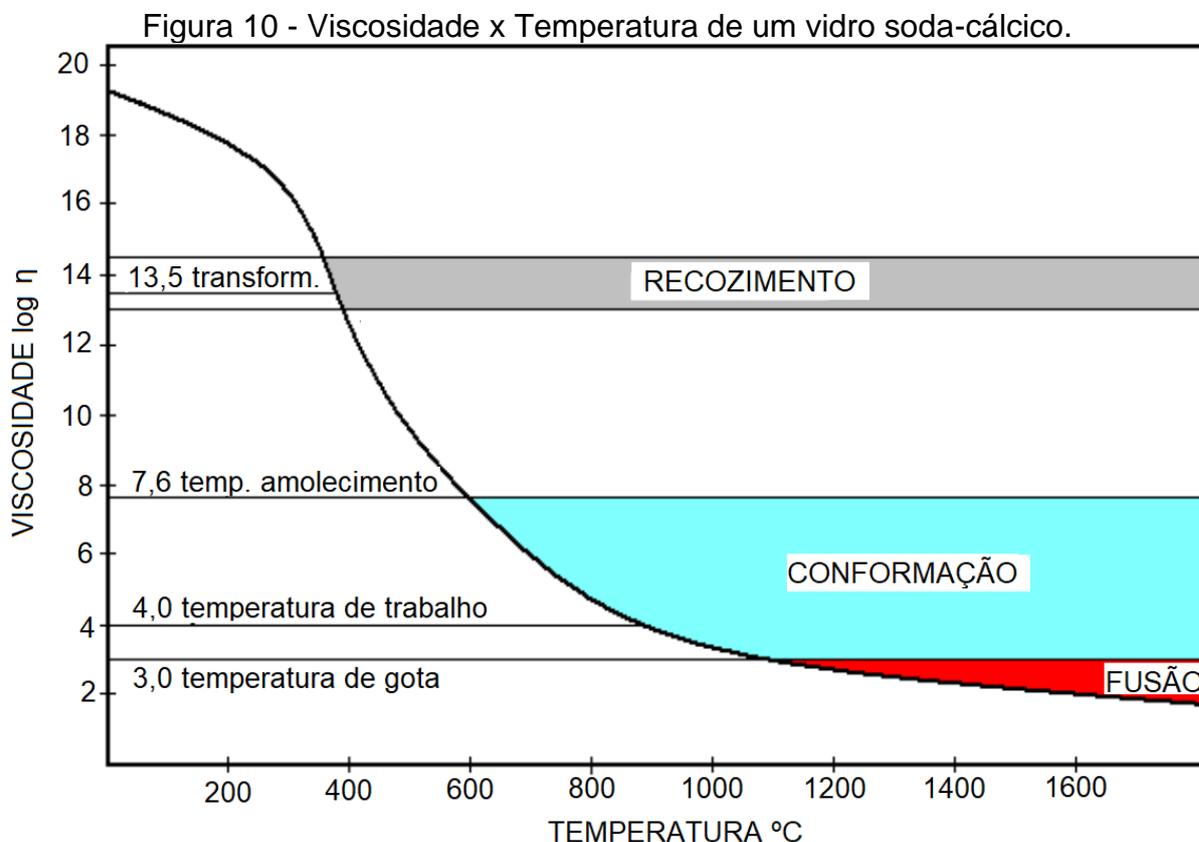


Fonte: A Autora (2025)
Nota: Adaptado de Pokorny (2011)

A viscosidade é o inverso da fluidez e pode ser entendida como a dificuldade de um líquido escoar. Essa propriedade é considerada uma das mais importantes sob o ponto de vista de elaboração e conformação do vidro, tendo em vista que ela estabelece condições de fusão, temperaturas de trabalho e recozimento, temperatura máxima de utilização, taxa de devitrificação e comportamento na afinagem (remoção de bolhas) (Akerman, 2000).

A temperatura do meio e a composição química são fatores que podem alterar a viscosidade do vidro. Para conformação (fabricação) de uma peça de vidro, a viscosidade deve ser suficiente para permitir sua deformação e a produção de uma massa homogênea e capaz de liberar as bolhas presas. Nas etapas finais da conformação, a viscosidade deve ser tal qual permita a preservação da forma final da peça. A temperatura na qual a viscosidade viabiliza a conformação do vidro é

conhecida por temperatura de trabalho, que pode ser observada na Figura 10, para embalagens de vidro soda-cálcico (Akerman, 2013).



Fonte: A Autora (2025)
Nota: Adaptado de Akerman (2000)

Em alta temperatura, a temperaturas no domínio da conformação e a baixa temperatura, o vidro se comporta como um líquido viscoso, um sólido elástico e um sólido viscoelástico, respectivamente. Assim como visto na Figura 10, determinados valores de viscosidade (poises) correspondem a algumas temperaturas características. Quando log η é igual a 3, tem-se a conhecida como temperatura de gota. Já em log η igual a 4, tem-se a temperatura de trabalho, na qual diversas operações de conformação são iniciadas. Abaixo da temperatura de amolecimento, em log η igual a 7,6, o vidro não pode mais ser conformado plasticamente, encontrando-se rígido (sólido elástico). Em log η igual a 13,5, a temperatura de transformação é alcançada e é onde surge a primeira anomalia da curva de dilatação de um vidro recozido (Akerman, 2000).

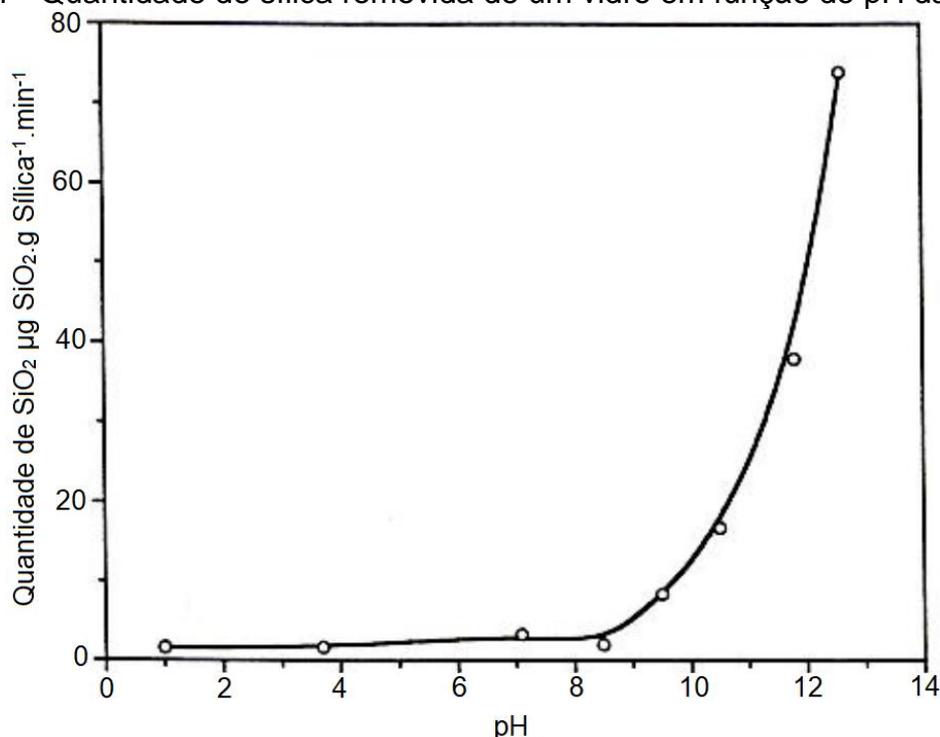
A propriedade de dureza pode ser definida como a resistência ao risco ou à formação de uma marca permanente obtida por um material quando este é

pressionado por marcadores padronizados ou por outro material. Um dos principais métodos para determinação da dureza é o teste de risco, que tem o ensaio de dureza Vickers como uma metodologia amplamente utilizada para investigar a dureza de materiais (Garcia, Spim, Santos, 2012).

De acordo com Shelby, Lacourse e Clare (1991), a dureza dos vidros silicatos não tem uma variação drástica. O valor da dureza obtida por meio do ensaio de microindentação Vickers do vidro de sílica pura é de 6,0 GPa e para a maioria dos vidros de silicato, a dureza é de aproximadamente 30% deste valor.

Com relação a resistência química, a inércia química do vidro é considerada como uma propriedade fundamental para grande parte de suas aplicações (Akerman, 2013). Os vidros possuem elevada durabilidade química, tendo em vista que são muito resistentes a soluções ácidas (com exceção do ácido fluorídrico) e levemente básicas ($\text{pH} < 9$). No entanto, eles podem ser fortemente atacáveis por soluções básicas. Na Figura 11, é possível observar o comportamento do vidro em contato com soluções com diferentes valores de pH (Akerman, 2000).

Figura 11 - Quantidade de sílica removida de um vidro em função do pH da solução.



Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Akerman (2000)

Como visto na Figura 11, é possível observar a quantidade de sílica que é removida de um vidro quando em contato com soluções para diferentes valores de

pH. O comportamento da figura descreve que até a solução com pH igual a 9, o ataque químico é mínimo, todavia para valores de pH superiores a este, a remoção da sílica é mais expressiva (Akerman, 2000).

O vidro também está passível a ataques hidrolíticos, que correspondem aos ataques químicos da água em relação ao vidro. No caso de vidros soda-cálcicos, parte dos íons de hidrogênio presentes na água tendem a se difundir no vidro e ocupar espaços deixados pelos íons de sódio que migram para solução. Esse processo resulta na formação de hidróxido de sódio, o que contribui para o aumento do pH da solução (Zanotto, 2002).

No que diz respeito a propriedade de resistência à compressão, muitos julgam o vidro como um material fraco. Todavia, um material fraco é àquele que não resiste e se quebra ao aplicar uma força mesmo que baixa, assim como o giz. Ao aplicar uma força com a mesma intensidade para quebrar o giz, um vidro não quebraria. Logo, ao contrário de ser um material fraco, o vidro é muito forte. Na forma de vidros laminados, já é comum o uso de vidros como pisos dado a sua resistência (Akerman, 2013). Por outro lado, o vidro é frágil, tem uma baixa resistência a impactos e não é apropriado para aplicações sujeitas a impactos, pois não é tenaz (Akerman, 2000).

A força necessária para romper o vidro é a força exigida para quebrar as ligações dos seus átomos. Teoricamente, para os vidros comerciais, essa força corresponde a 21 GPa (2100 kg/mm²). Na prática, todavia, esse valor raramente chega a 15 GPa (1500 kg/mm²). No caso de vidros comuns, como no caso de garrafas de cerveja, a resistência apresentada por eles é da ordem de 0,01 a 0,1 GPa (1 a 10 kg/mm²) (Akerman, 2000).

A propriedade da cor atribuída aos vidros é gerada por meio de componentes que são dissolvidos em sua massa no processo de produção. Usualmente, são utilizados metais que interagem com a luz, filtram algumas cores e deixam outras passarem. Além do aspecto estético, as cores do vidro têm a função de filtrar certas radiações não desejáveis. Devido a isso, determinadas cervejas e vinhos tem envase em recipientes verdes ou âmbar. No caso de vidraças, a coloração evita que os raios ultravioletas desbotem mobiliários e tecidos, além de evitar a passagem de raios infravermelhos, os quais são responsáveis pelo aquecimento, e dessa forma, otimizam o conforto térmico e a economia de energia gasta com ar-condicionado no interior de residências e veículos (Akerman, 2013).

Os agentes de cor utilizados para produção de vidros coloridos são, usualmente, compostos de metais de transição 3d ou de terras raras 4f. No entanto, o estado de oxidação do metal, sua concentração, a composição do vidro e o tratamento térmico ao qual foi submetido são os fatores que influenciam na cor final obtida para o vidro. Alguns dos óxidos mais utilizados para pigmentar os vidros podem ser observados no Quadro 4 (Alves, Gimenez, Mazali, 2001).

Quadro 4 - Espécies químicas (agentes de pigmentação) para dar cor aos vidros.

Agente de pigmentação	Estado de oxidação	Cor
Cobre	Cu^{2+}	Azul claro
Crômio	Cr^{3+} Cr^{6+}	Verde Amarelo
Manganês	Mn^{3+} Mn^{4+}	Violeta Preto
Ferro	Fe^{3+} Fe^{2+}	Âmbar Verde
Cobalto	Co^{2+} Co^{3+}	Azul intenso ou rosa Verde
Níquel	Ni^{2+}	Âmbar, amarelo, verde, azul a violeta (de acordo com a matriz vítrea)
Vanádio boratos	V^{3+}	Verde (em vidros silicatos) e âmbar (em vidros)
Titânio	Ti^{3+}	Violeta
Neodímio	Nd^{3+}	Violeta-avermelhado
Praseodímio	Pr^{3+}	Verde claro
Ouro	Au^0	Rubi (partículas coloidais dispersas na matriz vítrea)
Cádmio	CdS , CdSe	Laranja

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Alves, Gimenez, Mazali (2001)

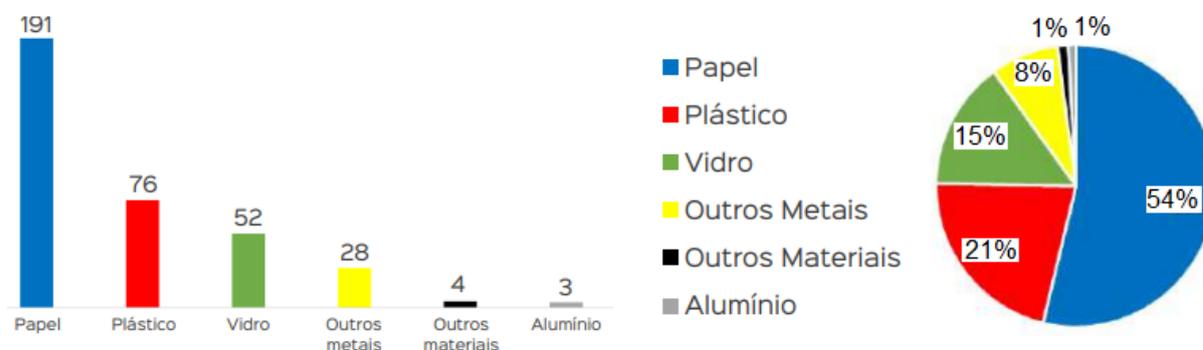
Além do vidro colorido obtido pela introdução proposital de minerais ou de sais metálicos purificados (pigmentos), como visto no Quadro 4, os vidros coloridos também podem resultar de impurezas naturais presentes em suas matérias-primas. Para remoção dessas cores indesejadas, para produzir um vidro transparente ou para prepará-lo para coloração, são utilizados descolorantes para precipitar compostos de ferro e de enxofre. Colorantes comuns utilizados são o dióxido de manganês e óxido de cério (Helmenstine, 2018).

2.3.7 Resíduos de Vidro

Segundo dados do Panorama do Saneamento Básico no Brasil, que é desenvolvido pelo Ministério do Desenvolvimento Regional (2021), o vidro corresponde a 5% de toda a composição de lixo sólido mundial. Todavia, a coleta seletiva ainda é atributo das regiões mais desenvolvidas e, em grande maioria, urbanas. Essa medida envolve 33,9% da população urbana do Brasil.

De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO, 2019), o mercado brasileiro produz 8,6 bilhões de unidades de garrafas anualmente, o que corresponde a 1,3 milhões de toneladas de vidro. Conforme a Figura 12, do volume total de vidro produzido em 2019, foram coletadas apenas 52 mil toneladas para reciclagem. Da quantia total de resíduos sólidos gerados neste ano, esse montante corresponde a cerca de 10% do volume que é direcionado para reciclagem (Associação Nacional Dos Catadores, ANCAT, 2020).

Figura 12 - Volume total coletado por material pelas cooperativas e associações (em mil toneladas).



Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de ANCAT (2020)

Conforme os dados da Figura 12, milhares de toneladas de vidros são descartados de forma inadequada, de forma a gerar impactos à sociedade por milhares de anos. O tempo de decomposição dos vidros, assim como pode ser observado no Quadro 5, mostra o quanto o vidro é resistente às alterações climáticas e, conseqüentemente, pode ser prejudicial ao ser humano (Anavidro, 2013).

Quadro 5 - Tempo de decomposição do vidro de acordo com variadas fontes.

Referência	Tempo
Campanha Ziraldo	1 milhão de anos
Comlurb website	Indefinido
SMA São Sebastião	Mais de 10 mil anos
DMLU Porto Alegre	Indeterminado
UNICEF	4 mil anos

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de ANAVIDRO (2020)

A decomposição total do vidro na natureza, como visto no Quadro 5, pode chegar até 1 milhão de anos, de acordo com as condições às quais o material é submetido. Ainda com uma grande variação do tempo mínimo de desgaste do vidro em função da fonte de referência, o menor valor atribuído é de 4 mil anos, um tempo bem maior do que os itens produzidos com plástico ou alumínio (Anavidro, 2020).

Milhares de toneladas de vidro não retornam a indústria para serem recicladas, pois após seu uso, o vidro é descartado e tratado como lixo, de forma a ocupar áreas e causar impacto ambiental. Esse vidro corresponde a embalagens de garrafas conhecidas por *long neck* ou *one way* (somente uma via) (Funverde, 2009).

2.3.8 Garrafas *Long Neck*

As embalagens do tipo *long neck* ou *one way* (apenas uma via) tiveram origem a partir do interesse das indústrias de vidros e de envase de bebidas em criar um produto que fosse capaz de competir com embalagens de outros materiais, em especial alumínio e vidro (Funverde, 2009). Para isso, foram criadas garrafas mais leves, com menores espessuras obtidas através dos moldes, com o consumo menor de matérias-primas e quantidades menores de energia no processo de fabricação (Jorge, 2013).

O setor cervejeiro do Brasil foi responsável por 1,6% do PIB nacional, em 2018, com a produção de 14,1 bilhões de litros por ano (Associação Brasileira da Indústria Cerveja, CERVBASIL, 2018). Com relação a produção por embalagem, 51,1% correspondem ao vidro retornável, 45,4% equivalem a produção em lata e 3,5% retratam o vidro descartável, como é o caso das garrafas *long neck*. Ainda que aparente um valor ínfimo quando comparado aos demais tipos de embalagem, essa parcela representa cerca de 490 milhões de litros por ano de garrafas *long neck* de

355ml, o que totaliza aproximadamente 1,4 bilhões de unidades não retornáveis (Cervbrasil, 2015).

As garrafas do tipo *long neck* são consideradas um dos resíduos sólidos mais ofensivos em todo o mundo, tendo em vista que após o consumo da bebida, as embalagens não são reutilizadas ou retornadas a indústria. Esse processo resulta em um material que é tratado como lixo e que é direcionado para lixões ou aterros sanitários, de forma a gerar poluição ambiental e ocupar espaço em depósitos que poderiam ser utilizados para materiais orgânicos com rápida decomposição (Funverde, 2009).

Devido aos problemas ambientais resultantes das garrafas *long neck*, alguns Projetos de Leis foram propostos para tentar minimizar a situação, como a PL 1574 (2007), na qual proíbe a industrialização e comercialização de garrafas não retornáveis, a partir de janeiro de 2010. Assim como, a Lei nº 4 (2012) desenvolvida pela Câmara Municipal de Foz do Iguaçu, na qual obriga os revendedores a coletar e destinar as embalagens de vidro do tipo *long neck*. Além destas, a Câmara Municipal da Serra, por meio da Lei nº 28 (2017) proíbe os organizadores de eventos artísticos, culturais e desportivos do município realizarem a venda em embalagens de vidro descartáveis.

Mesmo que esses projetos e leis sejam bastante relevantes no combate ao impacto ambiental gerado pelas garrafas não retornáveis, ainda são muito pontuais. A quantidade de unidades produzidas no Brasil e no mundo com destino inadequado justifica a busca por novos destinos e reuso dos resíduos de garrafas *long neck* em aplicações de novos produtos, como o geopolímero, de forma a criar uma solução extremamente promissora para redução do impacto ambiental proveniente deste resíduo sólido.

2.4 ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA

Estudos a respeito de geopolímeros com resíduos de garrafa *long neck* ainda não foram realizados no meio acadêmico. Por isso também, essa temática é considerada tão atrativa e pertinente nas perspectivas ambientais, sociais e econômicas. Com a finalidade de aprofundar o conhecimento sobre o possível comportamento da matriz geopolimérica na presença de resíduos de vidro provenientes de garrafas não retornáveis, buscou-se estudos sobre geopolímeros que

já foram estudados com resíduos de vidros diversos (garrafas retornáveis, lâmpadas fluorescentes, pó de vidro, vidrarias laboratoriais e outros) assim como, pesquisou-se sobre novos materiais (geralmente baseados em cimento Portland) que foram produzidos com resíduos de garrafas *long neck*.

2.4.1 Estudos sobre Materiais Geopoliméricos com Vidro

Os produtos geopoliméricos com a adição e/ou substituição de resíduos de vidro de origens diversas já foram estudados no meio acadêmico devido ao seu grande potencial de reatividade (Zhang *et al.*, 2017) e a necessidade de criar um destino adequado para estes tipos resíduos que, por severas vezes, têm destinação inadequada e cada vez mais degrada o meio ambiente (Moya *et al.*, 2017; Paiva, 2009; Sondh *et al.*, 2022). Os principais estudos que foram desenvolvidos com materiais geopoliméricos e resíduos de vidro, podem ser observados no Quadro 6.

Quadro 6 - Estudos de materiais geopoliméricos com resíduos de vidro.

Autores	Ano	Título
Cyr, Idir e Poinot	2012	<i>Properties of inorganic Polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet</i>
Puertas e Torres-Carrasco	2014	<i>Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation</i>
Pascual, Tognonvi e Tagnit-Hamou	2014	<i>Waste glass powder-based alkali-activated mortar</i>
Torres-Carrasco e Puertas	2015	<i>Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation</i>
Torres-Carrasco e colaboradores	2015	<i>Durability of alkali-activated slag concretes prepared using waste glass as alternative activator</i>
Bobirica e colaboradores	2015	<i>Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers</i>
Novais e colaboradores	2016	<i>Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers</i>
Torres-Carrasco e Puertas	2017	<i>Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products</i>
Toniolo e colaboradores	2017	<i>Fly-Ash-Based Geopolymers: How the Addition of Recycled Glass or Red Mud Waste Influences the Structural and Mechanical Properties</i>

(Continuação Quadro 6)

Wang colaboradores	e	2017	<i>Study on the engineering properties and prediction models of an alkali-activated mortar material containing recycled waste glass</i>
Zhang colaboradores	e	2017	<i>Waste glass as partial mineral precursor in alkali-activated slag/fly ash system</i>
Si e colaboradores		2020	<i>Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder</i>
Burciaga-Días colaboradores	e	2020	<i>Effect of waste glass incorporation on the properties of geopolymers formulated with low purity metakaolin</i>
Alvarenga colaboradores	e	2022	<i>Use of glass waste in the production of metakaolin-based geopolymer submitted to room temperature and thermal curing</i>
Dinh colaboradores	e	2024	<i>Influence of Si/Al molar ratio and ca content on the performance of fly ash-based geopolymer incorporating waste glass and GGBFS</i>
Cakmak colaboradores	e	2024	<i>Geopolymer mortars having glassy materials considering mechanical and microstructural features</i>

Fonte: A Autora (2025)

Assim como observado no Quadro 6, Cyr, Idir e Poinot (2012) estudaram argamassas geopoliméricas constituídas por areia, hidróxidos de sódio (NaOH) ou de potássio (KOH) e resíduos de vidro provenientes de garrafas. A temperatura de cura, que variou entre 20, 40 e 60 °C, e a natureza e a concentração (1, 5 e 10M de NaOH ou de KOH) do ativador alcalino foram avaliadas.

Os resultados obtidos mostraram que, para este sistema, as argamassas precisam ser curadas acima da temperatura ambiente para alcançar resistência à compressão superiores a 6 Mpa, pois o aumento da temperatura facilita a dissolução das espécies reativas. Os autores acreditam que a temperatura de 20 °C não tenha sido suficiente para dissolver completamente o vidro, ainda com as altas concentrações de álcalis utilizadas. A temperatura ótima destacada para o estudo foi de 40 °C (Cyr, Idir, Poinot, 2012).

Além disso, entre as concentrações estudadas, quaisquer que sejam a natureza do ativador, o valor considerado ótimo foi de 5 M. A concentração de 10 M foi considerada menos favorável para a reatividade do vidro. A justificativa atribuída para este comportamento é de que a resistência decai com o aumento da concentração do álcali, sendo este resultante do excesso de íon K⁺ nas cavidades

estruturais do material recém-formado. Para os autores, o processo de geopolimerização pode ser retardado com o aumento da concentração do ativador, devido a mobilidade iônica limitada nestes casos (Cyr, Idir, Poinot, 2012).

Este estudo revelou que é possível solidificar um material com base em resíduo de vidro e solução ativadora, com a cinética de endurecimento em função da temperatura de cura. O produto foi obtido sem o uso de metacaulim ou cinzas volantes e sem o uso dos silicatos. Todavia, para alcançar resistências mecânicas representativas, foram necessárias temperaturas, no mínimo de 40 °C (Cyr, Idir, Poinot, 2012).

Em 2014, Pascual, Tognonvi e Tagnit-Hamou, pesquisaram argamassas baseadas em resíduos de vidros mistos de garrafas, escória de alto forno, pequenas porcentagens de metacaulim (com substituições ao resíduo de 0, 5 e 8 %) e hidróxido de sódio (5, 8 e 10 M). A cura foi realizada a 60 °C, nas primeiras 48 horas, e a 20 °C e umidade relativa de 50 %, até a idade dos ensaios.

De forma semelhante aos resultados de Cyr, Idir e Poinot (2012), o aumento da concentração molar de NaOH, reduziu a resistência à compressão das amostras, justificado também pelo retardo do processo de geopolimerização devido à baixa mobilidade de íons alcalinos, o que limita sua difusão até a solução. Além disso, a formação de um produto de reação não uniforme, com baixa resistência do gel, também pode ser resultante do excesso de NaOH (Pascual, Tognonvi e Tagnit-Hamou, 2014).

Além disso, Pascual, Tognonvi e Tagnit-Hamou (2014) afirmam que é necessária uma certa porcentagem de metacaulim para fixação dos íons alcalinos na matriz e formar um gel mais denso. A pesquisa também rematou a possibilidade de utilizar resíduo de vidro como fonte base e precursor ativador em materiais geopoliméricos.

Torres-Carrasco e Puertas, em conjunto com outros pesquisadores, em 2014, 2015 e 2017, analisaram materiais geopoliméricos com base em escória de alto forno e ativadores baseados em diferentes teores de resíduos de vidro como fonte de sílica. Misturas de hidróxido e carbonato de sódio (NaOH e Na₂CO₃), sistemas com NaOH ou KOH e silicato de sódio comercial foram utilizados a nível de comparação nos estudos. Os procedimentos de cura também variaram entre 99 % e 6,5 % de umidade relativa.

A combinação entre NaOH e Na₂CO₃ resultou nos menores valores de resistência à compressão. No caso do ativador de resíduo de vidro, quanto maior a porcentagem de resíduo inserida, maior a resistência à compressão obtida, embora nenhum deles superasse a pasta produzida com silicato de sódio comercial (Puertas, Torres-Carrasco, 2014). A resistência mecânica resultou também em maiores valores quando uma fonte suplementar de sílica, seja silicato, seja resíduo, foi adicionada (Torres-Carrasco *et al.*, 2015).

Além disso, a resistência a compressão foi atingida negativamente quando se utilizou o KOH como ativador, quando comparados a sistemas com NaOH. Isso foi justificado pelo fato do cátion K⁺ dissolver menos íons presentes na matéria-prima, o que resulta em menos produtos de reação precipitados. A menor mobilidade do íon potássio pode ser atribuída ao seu maior raio iônico, quando comparado ao do Na⁺ (Torres-Carrasco, Puertas, 2017).

Com relação a solubilidade, quanto maior a porcentagem do resíduo, maior a quantidade de silício dissolvido (Puertas, Torres-Carrasco, 2014). Os resíduos de vidro atuaram como ativadores alcalinos, de forma a dissolver a fonte de aluminossilicato (Torres-Carrasco *et al.*, 2015). Ainda que a reatividade do silício proveniente do silicato de sódio comercial seja melhor do que a reatividade do silício proveniente do resíduo de vidro (Torres-Carrasco, Puertas, 2017), géis de C-A-S-H (silicoaluminato de cálcio hidratado), ricos em silício, são produzidos devido a interação entre a solução ativadora produzida com resíduo de vidro e o precursor geopolimérico, de forma que o gel formado possui composição e estrutura semelhante ao gel formado no sistema com o silicato de sódio comercial (Puertas, Torres-Carrasco, 2014). Outra informação que merece destaque é que o silício derivado do resíduo de vidro não favoreceu o desenvolvimento da resistência mecânica em 1 dia, como ocorre em sistemas convencionais (Torres-Carrasco, Puertas, 2017).

Para todas as amostras, os produtos de reação são géis com alto teor de silício e baixo teor de alumínio. Conseqüentemente, as razões Si/Al foram muito altas (Torres-Carrasco, Puertas, 2017). Os autores ainda relatam que o alto teor de sílica ativa presente nos resíduos de vidro é o que promove boas propriedades mecânicas ao geopolímero (Torres-Carrasco, Puertas, 2015).

Com relação as condições de cura analisadas por Torres-Carrasco e Puertas, em 2017, mais trincas foram observadas nas amostras curadas a 85 °C, por 20 horas

e 99 % de umidade relativa, do que nas amostras submetidas a cura de 85 °C, por 20 horas e uma umidade relativa de 6,5 %.

O desempenho microestrutural e a resistência à compressão das amostras avaliadas foram comparáveis ao desempenho de pastas produzidas com ativadores convencionais, de forma que esses resíduos podem ser utilizados como ativadores em sistemas ativados por álcalis (Puertas, Torres-Carrasco, 2014). De forma geral, conclui-se que as condições de cura, natureza e concentração do ativador tiveram impacto na resistência mecânica e na microestrutura dos produtos geopoliméricos (Torres-Carrasco, Puertas, 2017).

Em 2015, Bobirica e outros colaboradores estudaram a influência de resíduos de vidro derivados de lâmpadas fluorescentes na microestrutura e resistência de polímeros inorgânicos baseados em cinzas volantes ou cinzas volantes/escória de alto forno. As soluções ativadoras foram compostas por uma solução de NaOH, ou solução de silicato de sódio comercial. Foram realizadas três misturas: cinza volante ativada com NaOH, cinza volante ativada com silicato de sódio e cinza volante com escória ativadas com NaOH. Para cada mistura, o resíduo de vidro foi utilizado como substituição a cinza volante, em peso, em diferentes proporções (0, 10, 20, 30 %).

Com relação aos resultados de resistência à compressão, Bobirica *et al.* (2015) encontraram que, quanto maior a porcentagem de resíduo adicionada na síntese, menor a resistência à compressão. Esse comportamento foi relacionado ao aumento da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e isso é justificado pelo acréscimo das partículas de vidro não reagidas, que aumentam a densidade de defeitos na matriz. Além disso, os produtos que precipitam rapidamente e cobrem as partículas, inibem a ativação, o que resulta em uma geopolimerização de grau moderado, principalmente no sistema de cinza volante ativado com NaOH.

A análise da microestrutura do resíduo de vidro demonstra uma distribuição heterogênea de partículas irregulares e lisas. No caso da microestrutura apresentada pelas amostras, os melhores resultados foram obtidos pelas sínteses ativadas com silicato de sódio, ainda com uma razão molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ maior. Esse resultado foi relacionado à presença de oligo-siloxonatos solúveis na solução de ativação, que parecem aumentar o grau geral de reação. Todavia, os autores alcançaram um grau moderado de geopolimerização no sistema produzido com cinzas volantes e ativados pela solução de NaOH (Bobirica *et al.*, 2015).

Na pesquisa de Novais e colaboradores (2016), foram estudados o nível de incorporação de resíduos de vidro (12,5; 25 e 37,5 %), a molaridade de NaOH (10 e 12 M) e as condições de cura (40 °C, por 1 e 7 dias, e selados ou não em sacos) de geopolímeros baseados em metacaulim, com resíduos de vidros provenientes de lâmpadas fluorescentes em fim de vida. A solução ativadora foi formada por soluções de NaOH e silicato de sódio comercial.

A resistência à compressão dos geopolímeros com substituição de 12,5 % do resíduo de vidro, resultou em melhores valores do que as amostras constituídas puramente por metacaulim; esse comportamento foi justificado pelo fato do maior teor de resíduo aumentar a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ e gerar mais ligações Si-O-Al do que Al-O-Al, que são consideradas mais fracas. A porcentagem de 37,5% de resíduos foi utilizada com sucesso, de forma a obter resultados de resistência à compressão satisfatórios para aplicações não estruturais.

Os resultados mostraram que o fator mais influente são as condições de cura do geopolímero, enquanto a molaridade do NaOH não tem uma influência tão representativa nas propriedades dos geopolímeros obtidos. As condições de cura fechadas são consideradas piores por dificultar a evaporação da água e, conseqüentemente, aumentar a solução alcalina disponível, enquanto que as condições de cura aberta permitem a evaporação da água, o que promove um ganho de resistência com o tempo de cura. Já o tempo de cura a 40 °C não tem influência significativa no desenvolvimento da resistência. O aumento da molaridade de NaOH afeta o tempo de geopolimerização inicial, no entanto, para idades mais avançadas (28 dias), a resistência à compressão se iguala (Novais *et al.*, 2016).

Em 2017, Toniolo, em colaboração com outros pesquisadores, estudaram geopolímeros à base de cinzas volantes com a substituição parcial de resíduos de vidro e de lama vermelha, nos teores de 0, 10, 20 e 30 %. A solução alcalina foi produzida com silicato e hidróxido de sódio e a cura foi realizada a 60 °C, em estufa, por 24h.

Assim como encontrado por Bobirica *et al.* (2015), a substituição dos resíduos resultou na redução da resistência à compressão de todas as amostras, principalmente na adição de 20 %. Através da microestrutura, eles observaram nas amostras contendo resíduos de vidro, partículas de vidro não reagidas e cinzas volantes. Dessa forma, demonstra-se que não é esperado que todas as partículas de vidro participem do processo de geopolimerização (Toniolo *et al.*, 2017).

Também em 2017, Wang e colaboradores estudaram argamassas alcali-ativadas baseadas em escória de alto forno moída, contendo resíduos de vidro provenientes de *Display* de Cristal Líquido (LCD). Os resíduos substituíram a areia em 0, 20 e 40 %, em peso, com ativadores constituídos por hidróxido e silicato de sódio e curados em temperatura ambiente.

A resistência à compressão obtida mostra que com a evolução do tempo de cura, o valor da resistência à compressão aumenta em consequência. O aumento do teor do resíduo de vidro, assim como estudos anteriores, decaiu o valor de resistência à compressão. Sendo assim, o valor de 20 % resulta no melhor valor de resistência à compressão ao adicionar resíduo de vidro (Wang *et al.*, 2017).

Zhang e outros colaboradores (2017) estudaram sistemas de escória/cinzas volantes ativados por álcalis com resíduos de pó de vidro. O sistema foi composto por 50 % de escória de alto forno e 50 % de cinzas volantes. O resíduo de pó de vidro foi substituído em 0, 10, 20 e 30 % das cinzas volantes e o ativador utilizado foi uma solução de 4 M de NaOH. Além disso, foi estabelecida uma relação l/s de 0,42 para manter uma trabalhabilidade adequada para as misturas. O processo de cura foi realizado a 20 °C e 98% de umidade relativa até a idade do ensaio.

Em comportamento contrário ao que foi visto na literatura até este ponto, os melhores resultados de resistência à compressão foram para a substituição de 30 % do resíduo, comportamento justificado pela maior reatividade do resíduo de vidro e pela disponibilidade de sílica solúvel fornecida pela reação entre o resíduo de vidro e o NaOH (Zhang *et al.*, 2017).

Em 2020, Si, em conjunto com outros pesquisadores, estudaram geopolímeros e argamassas geopoliméricas à base de metacaulim, com resíduos de pó de vidro como substituição ao metacaulim nas porcentagens de 0, 5, 10 e 20 %, em peso. O ativador alcalino utilizado foi preparado com NaOH, solução de silicato de sódio e água destilada. Foram adotados 2 métodos de cura: temperatura ambiente (23 °C) até idade dos ensaios e 60 °C por 24h, seguida por temperatura ambiente até idade dos experimentos.

Através da microscopia, Si *et al.*, (2020) observaram que a amostra com 20 % de substituição e cura ambiente apresentou microestrutura ligeiramente mais densa do que a amostra de metacaulim puro, o que corrobora com os resultados de Zhang *et al.*, (2017) para os resultados de resistência à compressão. Além disso, as partículas de vidro não reagidas foram cobertas pelo gel geopolimérico e foi indicado

que essas partículas de vidro não reagidas podem servir como microagregados na mistura de geopolímeros.

Também em 2020, Burciaga-Díaz e colaboradores estudaram geopolímeros baseados em metacaulim de baixa pureza com a incorporação de resíduos de vidro soda-cálcicos em sua síntese. A solução ativadora foi composta por silicato e hidróxido de sódio e as proporções de metacaulim/resíduo utilizadas foram de 100/0, 85/15 e 70/30, em peso. A cura ocorreu em câmaras isotérmicas a 20 °C, com umidade relativa de 80 %, por até 90 dias.

Os autores encontraram uma tendência de redução dos valores de resistência à compressão com o acréscimo do teor de resíduo de vidro. Uma maior alcalinidade foi desfavorável nos processos de cura e de resistência dos geopolímeros e pesquisas com maiores porcentagens de resíduos são necessárias para um melhor esclarecimento deste comportamento (Burciaga-díaz *et al.*, 2020).

Em 2022, Alvarenga e colaboradores analisaram geopolímeros à base de metacaulim com o uso de resíduo de vidro em substituição ao metacaulim em 12,5 %, em peso. Para a ativação alcalina, foram utilizados hidróxido de sódio e silicato de potássio. Após a síntese, as amostras foram submetidas a cura ambiente e aquecida, em estufa, a 40 °C, por 24 horas.

Os resultados de resistência à compressão com a incorporação de 12,5 % de resíduos de vidro aumentaram, quando comparados as amostras de referência. Esse comportamento foi atribuído a maior relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ obtida com a substituição do metacaulim pelo resíduo de vidro e, tendo em vista, que as ligações Si-O-Si são mais fortes que as ligações Si-O-Al e Al-O-Al em geopolímeros. Além disso, a cura em temperatura ambiente não afetou a resistência à compressão das amostras contendo resíduo de vidro, no entanto a cura a 40 °C acelerou as reações de geopolymerização (Alvarenga *et al.*, 2022).

De forma geral, as pesquisas realizadas até o momento que envolvem materiais geopoliméricos com resíduos de vidro proveniente de origens diversas (garrafas retornáveis, lâmpadas fluorescentes, pó de vidro, vidrarias laboratoriais e outros) demonstram a possibilidade de reduzir o impacto ambiental gerado por garrafas não retornáveis *long neck* e, simultaneamente, produzir um material com boas propriedades técnicas e passível de ser utilizado em várias áreas da construção civil.

Em 2024, Dinh *et al.* estudaram a influência da razão molar Si/Al e o teor de Ca no desempenho de geopolímeros à base de cinza volante, com resíduos de vidro e escória de alto-forno. Foram estudados cinco grupos de argamassa geopolimérica com resíduo de pó de vidro em substituições a cinza volante, nas porcentagens de 0, 10, 20, 30 e 40%. Outra parcela de amostras foi estudada com o resíduo de pó de vidro substituindo a areia e diferentes proporções de cinza volante e escória (20, 40, 60 e 80 %). A cura foi realizada em temperatura ambiente e umidade relativa de $65\pm 10\%$ e em temperatura aquecida a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os resultados vistos por Dinh *et al.* (2024) demonstraram que o Ca do pó de vidro reage tanto em temperatura ambiente, quanto aquecida. De forma geral, a reatividade do Ca da escória e do pó de vidro melhorou em até em 50 % e 30 % a resistência à compressão e absorção de água, respectivamente. As razões molares mais efetivas foram de 3,5 e 4,0 e foram verificadas usando Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva.

Características mecânicas e microestruturais de argamassas geopoliméricas, com materiais vítreos também foram estudadas por Cakmak *et al.* (2024). As amostras foram produzidas com obsidiana, pó de vidro proveniente de edifícios, em diferentes dosagens (0, 25, 50, 75 e 100 %) e um ativador alcalino de NaOH 12M. A cura variou entre 4 temperaturas: 75, 90, 105 e $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 72 horas.

Os ensaios laboratoriais detectaram que a melhor resistência à compressão foi obtida para a cura de 75 ° e de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, das argamassas com resíduo de vidro e ligante obsidiana. A substituição da obsidiana por resíduos de vidro aumentou as resistências à flexão e à compressão. Microestruturalmente, a obsidiana e os resíduos de vidro podem ser empregados juntos ou separados para criar um novo produto geopolimérico.

2.4.2 Estudos sobre Materiais com Resíduos de Garrafas *Long Neck*

Os resíduos provenientes de garrafas não retornáveis *long neck* já foram estudados algumas vezes no meio acadêmico, com a finalidade de criar uma destinação apropriada para esse material, que tem um intenso impacto ambiental. A maioria dos trabalhos realizados com resíduos de garrafas *long neck* envolvem materiais baseados em cimento Portland, como argamassas e concretos. Os

principais estudos que envolvem esse tipo de resíduo estão sintetizados no Quadro 7.

Quadro 7 - Estudos de materiais com resíduos de garrafas *long neck*.

Autores	Ano	Título
Righi e colaboradores	2011	Efeitos da substituição de areia por vidro moído no comportamento de concretos em elevadas temperaturas
Silveira	2016	Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro na produção de argamassa
Costa, Almeida e Moreira	2020	Análise do desempenho mecânico de concretos e argamassas mediante a substituição parcial da massa do agregado miúdo (areia) por vidro moído oriundo de garrafas de cerveja <i>long neck</i>
Trentin e colaboradores	2020	Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa
Brito	2021	Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia
Nogueira, Paula e Coelho	2022	Incorporação de vidro moído de garrafas <i>long neck</i> ao concreto para a fabricação de <i>pavers</i>

Fonte: A Autora (2025)

Em 2011, Righi, em conjunto com colaboradores, estudaram concretos com resíduos de vidro proveniente de garrafas *long neck* em substituição de areia, em peso, nas porcentagens 0, 5, 10, 15, 20 e 100 %. Após a coleta, as garrafas foram submetidas a remoção dos rótulos, limpeza e moagem. Os corpos de prova foram produzidos com os variados teores de vidro, traço 1,00:1,94:3,06 (cimento:areia:brita) e relação água/cimento (*a/c*) de 0,45. As amostras foram curadas por imersão e posteriormente secas em estufa à 60 °C para eliminar o excesso de umidade. Além disso, as amostras foram aquecidas a 600 °C para análise de concretos submetidos a altas temperatura e simulação de situações de incêndio.

Os resultados obtidos por Righi *et al.*, (2011) relatam que o melhor teor de substituição para o resíduo de vidro de garrafas *long neck* para concretos foi de 20 %, tendo em vista que o resultado de resistência à compressão para essa porcentagem reproduziu resistências equivalentes as amostras sem adição de resíduo. Para as amostras com substituição de 100 % de resíduo, a trabalhabilidade foi altamente prejudicada, de forma a inviabilizar a moldagem manual das amostras. Na análise das amostras submetidas a altas temperaturas, sua exposição reduziu a resistência à compressão gradativamente, sendo esse comportamento proporcional ao tempo de

exposição. Os autores encerram a discussão relatando a importância em estudar reações álcali-sílica devido a possibilidade da ocorrência de géis expansivos provenientes das reações entre os álcalis do cimento, a sílica do vidro e a presença de umidade.

Argamassas com resíduo de vidro *long neck* foram estudadas por Silveira (2016), com substituições de 0, 10, 5 e 20 %, em peso, de areia para três tipos de resíduos de vidros não retornáveis. A remoção dos resíduos de cerveja, rótulos e demais contaminantes foram realizados com imersão em água por 24 horas, para então seguir para os processos de trituração e moagem. As amostras foram produzidas com o traço 1:3 (cimento:areia), relação a/c de 0,7 e resíduos nas proporções determinadas. Após 24 horas de moldagem, os corpos de prova foram imersos em tanque de cura e permaneceram até 1 hora antes da realização dos ensaios.

As conclusões provenientes do estudo de Silveira (2016) relatam que as variadas porcentagens de resíduo de vidro substituídas nas argamassas não afetaram a resistência à compressão das amostras estudadas. Essa constatação foi determinada partindo da comparação dos resultados estatisticamente similares entre as amostras de referência e as amostras com substituição do resíduo. Posto isso, os resultados sugerem que a incorporação de vidros residuais *long neck* pode ser aplicada na indústria da construção civil, de forma a reduzir o consumo de matérias-primas das argamassas e o depósito desnecessário destes resíduos em aterros e lixões.

Em 2020, Costa, Almeida e Moreira analisaram o desempenho mecânico de argamassas e concretos com substituição de 10, 20 e 30 %, em peso, de areia por resíduo de vidro proveniente de garrafas *long neck*. Após a coleta das garrafas *long neck*, elas foram submetidas aos processos de lavagem, secagem ambiente, trituradas e moídas manualmente. Os traços adotados para as amostras de concreto foi 1,00:1,50:1,83 (cimento:areia:brita) e a relação a/c de 0,58 e no caso das argamassas foi 1:3 (cimento:areia) e relação a/c de 0,48. Os procedimentos de moldagem, desmoldagem e cura foram realizados conforme a ABNT NBR 5738 (2015).

Os resultados obtidos no estudo de Costa, Almeida e Moreira (2020) relatam que a substituição parcial dos resíduos de vidro de garrafas *long neck* apresentaram ganhos de resistência à compressão em torno de 40 % para concreto e 3 % para

argamassa, quando comparados as amostras de referência. Esse comportamento foi atribuído ao efeito do preenchimento dos vazios por parte das partículas finas de vidro moído. O melhor resultado alcançado foi para o teor de 20 % de substituição, corroborando com os resultados encontrados por Righi *et al.*, em 2011.

Na pesquisa de Trentin *et al.* (2020), foram estudadas argamassas com substituição de 10, 15, 25 e 50 % de areia por resíduo de vidro *long neck*. Os autores relatam que as garrafas passaram por um processo de trituração manual e, na sequência, foram submetidas ao processo de moagem. As argamassas foram produzidas com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia) e relação a/c em torno de 0,70. Após produção e desmoldagem dos corpos de prova, eles foram submetidos a cura em câmara climatizada, à 23 °C e umidade relativa de 80 %, até as idades de ensaio.

Os resultados alcançados por Trentin *et al.* (2020) corroboram com os resultados de Costa, Almeida e Moreira (2020) e demonstram que para o teor de 50 % de substituição de resíduo, sua resistência à compressão foi superior a amostra de referência em 27 %. A justificativa atribuída a este comportamento é o maior preenchimento da porosidade da argamassa, tendo em vista que a porosidade e a resistência dos sólidos possuem uma relação inversa. Os autores relatam ainda que a combinação entre sílica, alumina, água e hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] são capazes de formar compostos estáveis, com propriedades aglomerantes e que geram resistência e impermeabilidade para os sistemas, assim como ocorre nas argamassas. Sendo assim, o uso de resíduos de *long neck* em argamassas é tecnicamente viável do ponto de vista de resistência mecânica, além do benefício ambiental agregado a essa produção.

Em 2021, Brito enxergou a atividade pozolânica atribuída ao vidro como uma oportunidade de estudar argamassas com resíduos provenientes de garrafas *long neck* em substituição a massa do cimento, com teores de 3, 5, 10 e 15 %. Após a coleta das garrafas, o material foi submetido ao beneficiamento até alcançar dimensões em escalas micrométricas. A dosagem adotada seguiu as recomendações da ABNT NBR 7215 (2019), com traço 1:3 (cimento:areia) e relação a/c de 0,48. O processo de cura envolveu câmara úmida por 24 horas e, após a desmoldagem, imersão das amostras em água saturada com cal.

A resistência à compressão para as amostras com substituição de resíduo foi superior as amostras de referência, em especial para o teor de 15 %, que alcançou um valor 34 % maior do que o valor de referência, aos 28 dias de cura. No caso da

resistência à tração, todas as amostras superaram os valores de referência, aos 91 dias de cura. Além disso, o aumento do teor de resíduo promove o consumo do hidróxido de cálcio para formarem silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), reação característica dos materiais pozolânicos e que conferem resistência aos produtos (Brito, 2021).

Como foi visto anteriormente, os resíduos provenientes de garrafas não retornáveis *long neck* foram bastante analisados na substituição de agregados miúdos nas matrizes cimentícias, de forma que sua característica *filler* de reduzir a porosidade ao preencher os vazios e, em consequência, aumentar a resistência à compressão, foi evidenciada. Com o avanço das pesquisas, análises que levam em consideração seu efeito químico e sua reatividade já foram realizadas em matrizes cimentícias e confirmaram sua característica reativa (Brito, 2021), de forma a destacar a possibilidade do uso dessa reatividade em novos materiais, assim como geopolímeros.

Em 2022, Nogueira, Paula e Coelho incorporaram resíduos de garrafas *long neck* na produção de concreto para *pavers*. As garrafas foram coletadas e submetidas a um beneficiamento com etapas de lavagem, retirada de rótulos, higienização, secagem e moagem. O resíduo de garrafas *long neck* substituíram o agregado miúdo, em massa, nos teores de 0, 15, 20 e 25 %. Foram utilizados três traços base (1:5; 1:6,5; 1:3,5) para alcançar o traço de referência.

Os autores concluíram que as amostras com resíduo de vidro apresentaram resistências à compressão mais elevadas do que as amostras de referência (sem adição de resíduo). Entretanto, nenhuma delas alcançou os 35 MPa limitados pela norma. A sugestão dos autores é a aplicação do concreto com resíduos *long neck* para locais com baixa intensidade de sobrecarga.

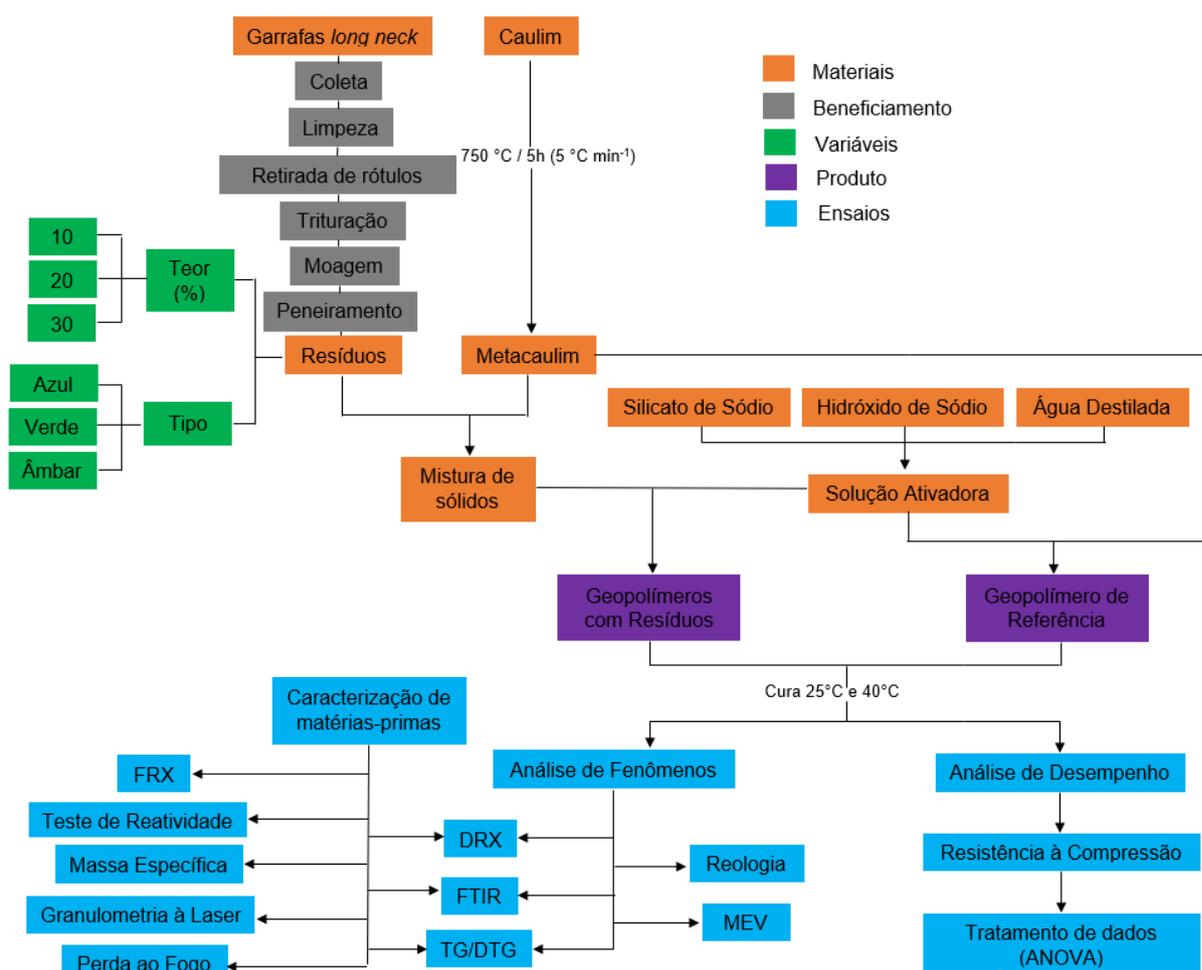
CAPÍTULO 3

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia proposta neste projeto consistiu no desenvolvimento de ensaios laboratoriais selecionados de acordo com a finalidade principal de estudar a viabilidade técnica da produção de geopolímeros com resíduos de vidros moídos provenientes de garrafas não retornáveis *long neck*. Para isso, no Fluxograma 1, é possível observar um esquema que especifica as atividades que foram desenvolvidas a fim de atingir o objetivo da pesquisa.

Fluxograma 1 - Esquema das atividades que foram desenvolvidas.



Fonte: A Autora (2025)

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para a produção dos geopolímeros pesquisados são subdivididos em precursor geopolimérico, solução alcalina e resíduos de garrafas *long neck*.

3.1.1 Precursor Geopolimérico

O precursor utilizado como fonte principal de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) foi obtido a partir do processo de calcinação do caulim à temperatura de $750\text{ }^\circ\text{C}$, por um tempo de 5 horas e uma taxa de aquecimento de $5\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. O caulim e o metacaulim, obtido após o processo de calcinação, foram caracterizados por Fluorescência de Raios-X (FRX), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Termogravimetria (TG/DTG) e Perda ao Fogo (PF). Por ser o produto final utilizado na produção dos geopolímeros, o metacaulim também foi submetido a ensaios de massa específica, reatividade e granulometria à laser.

3.1.2 Solução Ativadora

A solução ativadora foi obtida através de um sistema altamente alcalino para o desenvolvimento do processo de geopolimerização e, para isso, foi utilizado hidróxido de sódio e silicato de sódio, como fonte de álcalis, e água destilada para produção da solução.

3.1.2.1 Hidróxido de Sódio

O Hidróxido de Sódio em pérolas, proveniente do fabricante Química Moderna, tem uma pureza mínima de 97 %, com 75,18 % correspondente a Na_2O e 21,83 % equivalente a H_2O .

3.1.2.2 Silicato de Sódio Comercial

O Silicato de Sódio Neutro N.C., $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$, tem por fabricante a empresa Pernambuco Química e é utilizado como fonte complementar de SiO_2 nas amostras de referência. A composição química do silicato é dada por SiO_2 (26,42 %), Na_2O (8,26 %) e H_2O (65,32 %) e suas especificações técnicas estão descritas na Tabela 2, conforme informações do fabricante.

Tabela 2 - Especificações técnicas do silicato de sódio.

Determinação	Especificação	Resultado
Estado Físico (20 °C)	Líquido	Líquido
Coloração	Translúcido a opaco cinza	Translúcido a opaco cinza
Alcalinidade – Na ₂ O (%)	8,00 – 11,00	8,26
Sílica – SiO ₂ (%)	26,40 – 36,30	26,43
Sólidos Totais (%)	34,40 – 47,30	34,69
Densidade (20 °C)	1,400 – 1,490	1,36

Fonte: A Autora (2025)

Nota: Adaptado de Pernambuco Química

3.1.2.3 Água Destilada

A água utilizada na produção dos geopolímeros e no preparo das soluções foi destilada em destilador tipo Pilsen.

3.1.3 Resíduos de Garrafas *Long Neck*

Os resíduos são derivados de três tipos de garrafas não retornáveis *long neck*, que irão complementar a fonte de SiO₂ na síntese geopolimérica, tendo em vista seu alto teor de SiO₂ e sua capacidade reativa em meio alcalino.

Foram coletadas 75 garrafas *long neck*, de 330 ml, nas cores azul, verde e âmbar em estabelecimentos comerciais como bares e boates na cidade de Caruaru – Pernambuco, conforme observado na Fotografia 6.

Fotografia 6 – Os três tipos de garrafas *long neck* coletadas.

Fonte: A Autora (2025)

3.1.3.1 Beneficiamento do Resíduo

Após a coleta, o beneficiamento das garrafas *long neck* passou pelas etapas de lavagem, retirada de rótulos, trituração, moagem e peneiramento.

A retirada dos rótulos, assim como pode ser observado na Fotografia 7, foi realizada com a finalidade de que o material moído fosse constituído apenas por vidro.

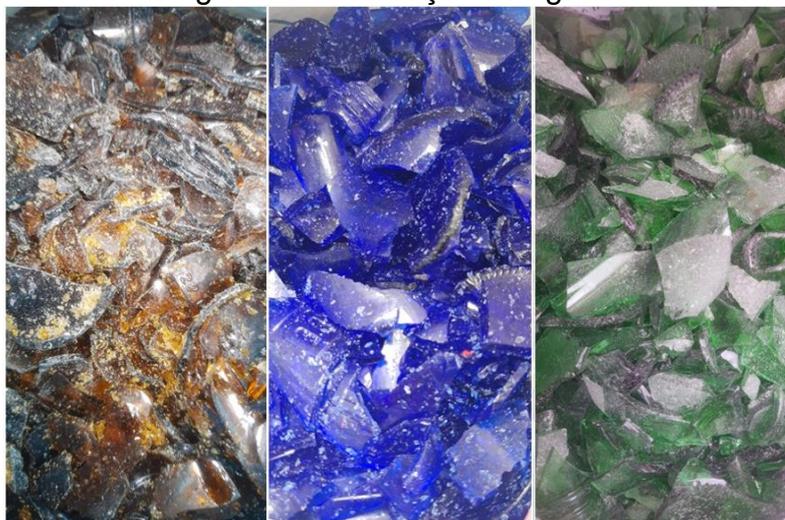
Fotografia 7 - Retirada dos rótulos das garrafas.



Fonte: A Autora (2025)

Para que as garrafas fossem submetidas ao processo de moagem, foi necessária realizar uma trituração prévia, a fim de fragmentar a garrafa de vidro em frações menores, conforme pode ser observado na Fotografia 8.

Fotografia 8 - Trituração das garrafas.



Fonte: A Autora (2025)

Os fragmentos foram então moídos, via seca, em um moinho de bolas planetário da marca Retsch, modelo PM-100 e com um revestimento interno de um corpo moedor de alta alumina. O material foi moído por partes, com o auxílio de 10 esferas, taxa de 500 RPM.min⁻¹ e um tempo 10 minutos, a fim de obter o resíduo em forma de pó. Após o processo de moagem, o resíduo passou pela peneira de malha 0,075 mm para garantir uma granulometria padrão e de escala nanométrica a ser utilizada na síntese geopolimérica. É possível observar na Fotografia 9, os resíduos após o beneficiamento e aptos a serem utilizados na síntese do geopolímero.

Fotografia 9 - Resíduo resultante do beneficiamento.



Fonte: A Autora (2025)

Após o processo de beneficiamento, os resíduos foram submetidos à análises de FRX, DRX, FTIR, TG/DTG, perda ao fogo, massa específica, reatividade e granulometria à laser para sua caracterização e aplicação nos geopolímeros.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparo dos Geopolímeros

A produção do geopolímero foi subdividida em três etapas: preparo da solução de hidróxido de sódio, preparo da solução ativadora e síntese geopolimérica. A solução de hidróxido de sódio foi produzida com uma concentração de 10 M, tendo em vista os estudos preliminares realizados. Na síntese geopolimérica, os materiais sólidos (metacaulim e resíduo) foram misturados previamente e, na sequência, envolvidos pela solução ativadora até sua homogeneização.

As pastas foram dispostas em moldes cilíndricos constituídos de Policloreto de Vinila (PVC), com diâmetro de 25 mm e altura de 50 mm. Os moldes foram vedados com material à base de látex e submetidos a cura ambiente (25 °C) e aquecida (40 °C) (Aq), por 24 horas e, após esse período, em temperatura ambiente, até a realização dos ensaios.

3.2.2 Identificação das Amostras

As identificações adotadas correspondem ao teor e tipo de resíduo utilizado e a temperatura de cura adotada para a amostra. No caso das amostras Ref25 e Ref40, elas correspondem a amostra de referência (sem o resíduo de vidro) e com curas a 25 °C e 40 °C, respectivamente. Já na amostra 10Az25, ela corresponde a uma substituição de 10 % do resíduo (10), com o uso do resíduo azul (Az) e uma temperatura de cura de 25 °C (25). As identificações adotadas para as amostras estão especificadas no Quadro 8.

Quadro 8 - Identificação das amostras

Identificação	Tipo de resíduo	Teor de resíduo (%)	Temperatura de Cura (°C)
Ref25	-	-	25
Ref40	-	-	40
10Az25	<i>Long neck</i> azul	10	25
10Az40	<i>Long neck</i> azul	10	40
20Az25	<i>Long neck</i> azul	20	25
20Az40	<i>Long neck</i> azul	20	40
30Az25	<i>Long neck</i> azul	30	25
30Az40	<i>Long neck</i> azul	30	40
10Ve25	<i>Long neck</i> verde	10	25
10Ve40	<i>Long neck</i> verde	10	40
20Ve25	<i>Long neck</i> verde	20	25
20Ve40	<i>Long neck</i> verde	20	40
30Ve25	<i>Long neck</i> verde	30	25
30Ve40	<i>Long neck</i> verde	30	40
10Am25	<i>Long neck</i> âmbar	10	25
10Am40	<i>Long neck</i> âmbar	10	40
20Am25	<i>Long neck</i> âmbar	20	25
20Am40	<i>Long neck</i> âmbar	20	40
30Am25	<i>Long neck</i> âmbar	30	25
30Am40	<i>Long neck</i> âmbar	30	40

Fonte: A Autora (2025)

3.2.3 Ensaios de Caracterização Caulim, Metacaulim e Resíduos

3.2.3.1 Análise Granulométrica

A distribuição granulométrica tem a finalidade de quantificar a distribuição por tamanho das partículas individuais de cada material. A análise granulométrica foi realizada por meio de difração de raio laser, em um analisador de tamanho de partículas modelo CILAS 1090, por via seca, e faixa de medição entre 0,1 µm a 500 µm.

3.2.3.2 Massa Específica

A massa específica é uma propriedade das substâncias que permite calcular o consumo de materiais a serem utilizados. Com isso, a massa específica de cada material foi obtida de acordo com a ABNT NBR NM 23. O ensaio é realizado de acordo com o princípio de Arquimedes, de forma que a massa específica é obtida através do deslocamento do querosene, em um frasco Le Chatelier, proveniente da inserção do material no frasco. O valor da massa específica é dado pela razão entre a massa e o volume do material, assim como na equação 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Onde,

ρ é a massa específica do material ensaiado (g/cm^3)

m é a massa do material ensaiado (g)

V é o volume deslocado pela massa do material ensaiado ($V_2 - V_1$)

3.2.3.3 Perda ao Fogo (PF)

Com a finalidade de avaliar a inflamabilidade dos materiais, calculou-se a Perda ao Fogo (PF) de cada matéria-prima. O ensaio para obtenção dos valores de Perda ao Fogo (PF) dos materiais foi realizado conforme a ABNT NBR 18. Pesou-se 1,000g do material e colocado em um cadinho de porcelana de massa conhecida. A amostra

foi para forno mufla, à 900 °C, por 1 hora, e resfriando em dessecador. A PF dos materiais foi dada pela equação 2.

$$PF = \left(\frac{m_1 - m_2}{m} \right) 100 \quad (2)$$

Onde,

PF é a Perda ao Fogo

m_1 é a massa do cadinho mais a massa de amostra ensaiada (g)

m_2 é a massa do cadinho mais a amostra, após a calcinação (g)

m é a massa de amostra utilizada no ensaio (g)

3.2.3.4 Reatividade das Matérias-primas

Para estimar o grau de participação na reação de geopolimerização do metacaulim e dos resíduos, realizou-se o teste de reatividade destes materiais. Para isso, utilizou-se o método Chapelle Modificado, seguindo as orientações da ABNT NBR 15895. O ensaio consistiu na reação, por 16 horas, à $90 \pm 5^\circ\text{C}$, de 1,000g do material pozolânico com 2,000g de CaO na presença de 250 ml de água. Ao final do processo, 250 ml de solução de sacarose é inserida no recipiente, que é submetido a uma rotação mecânica. A solução é então filtrada e titulada com uma solução de HCl 0,1 M. O óxido de cálcio não combinado é analisado e o resultado é expresso através da Equação 3.

$$I_{\text{Ca(OH)}_2} = \frac{28 (V_3 V_2) F_c}{m_2} \cdot 1,32 \quad (3)$$

De forma que,

$I_{\text{Ca(OH)}_2}$ é o índice de atividade pozolânica Chapelle obtido no ensaio, que corresponde ao teor de hidróxido fixado, expresso em mg de Ca(OH)_2 por g de material;

m_2 é a massa do material pozolânico (g);

V_2 é o volume de HCl 0,1 consumido no ensaio com amostra do material pozolânico (mL);

V_3 é o volume de HCl 0,1 consumido no ensaio sem amostra do material pozolânico – ensaio em branco – (mL)

F_c fator de correção do HCl para uma concentração de 0,1 M;

1,32 é a relação molecular $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$.

3.2.3.5 Fluorescência de Raios-X (FRX)

Para identificar e analisar os elementos químicos de cada matéria-prima sólida, realizou-se a caracterização química dos materiais caulim, metacaulim e resíduos azul, verde e âmbar através da Fluorescência de Raios-X (FRX). A análise foi realizada em um espectrômetro modelo Primini, da marca Rigaku. As amostras foram previamente secas em estufa a 105 °C, por 24 horas, e peneiradas na malha de 0,075 mm. Na sequência, o material foi prensado por 15 minutos, em uma prensa hidráulica até a formação de uma pastilha, a qual foi levada ao dessecador e submetida a análise após atingir a temperatura ambiente.

3.2.3.6 Difração de Raios-X (DRX)

Com a finalidade de identificar as fases e as estruturas cristalinas e a presença de material amorfo das matérias-primas, foi realizada a Difração de Raios-X através do difratômetro de Raios-X modelo XRD-6000, da marca Rigaku, com potência de 3 kW, varredura com velocidade angular de 0,02° a 2 θ por passo e com tempo de contagem de 1,0 segundo. As amostras foram peneiradas na malha 0,075 mm e o material foi analisado com o $\text{CuK}\alpha$ como fonte de radiação, voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA e ângulo de varredura 2 θ , variando de 10 a 70°.

3.2.3.7 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Para a identificação dos grupos funcionais presentes no caulim, metacaulim e resíduos azul, verde e âmbar, realizou-se a caracterização de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), em um espectrofotômetro modelo Prestigie-21, da marca Shimadzu. As amostras foram trituradas e prensadas em pastilhas com KBr, na proporção de 99 % KBr para 1 % de amostra. A leitura foi

realizada na região espectral de 4000 a 500 cm^{-1} , ganho 1 cm^{-1} , resolução 4 cm^{-1} , 40 varreduras.

3.2.3.8 Termogravimetria (TG/DTG)

Com a intenção de analisar a variação de massa das amostras, causadas por transformações físicas ou químicas, em função da temperatura e do tempo, foram realizados ensaios de Termogravimetria, TG/DTG, em uma balança analítica modelo STA 2500, marca Regulus da Netzsch. O ensaio ocorreu por meio de um cadinho, de alumina, com volume de 3,4 mL, sem tampa, atmosfera de nitrogênio (N_2) tipo 5, com vazão de 60 mL/min. e uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, até 900 $^{\circ}\text{C}$.

3.2.4 Ensaios nos Geopolímeros

3.2.4.1 Reologia

As propriedades reológicas dos geopolímeros foram coletadas através do viscosímetro digital Brookfield RVDV-E. A metodologia utilizada foi semelhante àquelas utilizadas em estudos anteriores (Dadsetan *et al.*, 2021; Han, Yoon, Kim, 2019; Mahmoodi *et al.*, 2023) para materiais geopoliméricos, uma vez que as propriedades reológicas foram coletadas com precisão para os geopolímeros estudados nesses casos. O programa reológico foi realizado com o spindle s06 e com um aumento constante de rotação de cisalhamento de 0,5 rotações por minuto (RPMs) para 200 RPMs, seguida por uma redução gradual da velocidade de cisalhamento de 200 RPMs para 0,5 RPMs, com um tempo total de 240 s (4 minutos). A coleta de dados do torque e da viscosidade foi realizada a cada 5 segundos e calculado a média a cada 10 segundos.

Os dados reológicos foram ajustados com o uso do modelo matemático de Bingham modificado e, com base no trabalho de Mitschka (1982), a tensão e a taxa de cisalhamento foi calculada através das Equações (1) e (2).

$$\tau_i = k_{\text{BT}} \alpha_i \quad (1)$$

$$\gamma_i = k_{\text{MY}}(n) N_i \quad (2)$$

Onde, τ_i (Pa) é a tensão de cisalhamento, k_{GT} é um fator de conversão de torque, α_i é a deflexão da escala no mostrador de torque em unidades de escala de 0 a 100, γ_i (s^{-1}) é a taxa de cisalhamento, k_{MY} é um fator de conversão baseado no spindle utilizado, n é o índice de fluxo determinado com base na inclinação da relação $\log \tau_i \times \log N_i$ e N_i é a velocidade de rotação (RPM).

3.2.4.2 Resistência à Compressão

A capacidade do geopolímero de suportar cargas de compressão antes da falha foi avaliada por meio do ensaio de resistência à compressão, nas idades de 7 e de 91 dias de cura, com 5 réplicas por amostra. Os corpos de prova cilíndricos foram produzidos em moldes de Policloreto de Vinila (PVC), com diâmetros de 25 mm e altura de 50 mm. Um grupo de amostras foi curado à temperatura ambiente e outra parcela de amostras foi curada à 40 °C, por 24 horas, e, na sequência, à temperatura ambiente até a idade do ensaio, em reprodução aos trabalhos de Alvarenga *et al.* (2022), Cyr, Idir e Poinot (2012) e Novais *et al.* (2016) também com vidros. Foi utilizada uma prensa servo controlada, da marca EMIC, modelo CCE300kN, com capacidade de 300 kN e taxa de carregamento de 0,20 MPa/s.

3.2.4.3 Difração de Raios-X

A difratometria de Raios-X foi utilizada para a identificação das fases e estruturas cristalinas e, também, a detecção de halos amorfos, que podem indicar a presença de reações geopoliméricas criadas nos geopolímeros de referência e com os resíduos de vidro long neck. Utilizou-se um difratômetro de Raios-X modelo XRD-6000, da marca Rigaku, com potência de 3 kW, varredura com velocidade angular de 0,02° a 2 θ por passo e com tempo de contagem de 1,0 segundo. As amostras de geopolímeros passaram pela peneira de malha 0,075 mm e o material foi analisado com o CuK α como fonte de radiação, voltagem de 40 kV, corrente de 30 mA e ângulo de varredura 2 θ , variando de 10 a 70°. As amostras que foram submetidas a análise de DRX foram àquelas com resultados mais promissores, detectados através da análise de resistência à compressão e avaliação estatística (ANOVA).

3.2.4.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

A Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foi utilizada com a finalidade de identificação dos grupos funcionais e confirmar a formação de geopolímero nas amostras. As amostras selecionadas para análise foram àquelas com resultados mais promissores, detectados através da análise de resistência à compressão e avaliação estatística (ANOVA). Foi utilizado um espectrofotômetro modelo Prestigie-21, da marca Shimadzu. Com uma proporção de 99 % KBr para 1 % de amostra, as amostras foram trituradas e prensadas em pastilhas com KBr e a leitura foi realizada na região espectral de 4000 a 500 cm^{-1} , ganho 1 cm^{-1} , resolução 4 cm^{-1} , 40 varreduras.

3.2.4.5 Termogravimetria (TG/DTG)

A análise termogravimétrica foi utilizada para avaliar a variação de massa dos geopolímeros causadas por transformações físicas e químicas, de acordo com a variação de tempo e temperatura. Foi utilizada uma balança analítica modelo STA 2500, marca Regulus da Netzsch. Um cadinho de alumina, sem tampa, com volume de 3,4 mL foi usado, em uma atmosfera de nitrogênio (N_2) tipo 5, com vazão de 60 mL/min. e uma taxa de aquecimento de 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min.}$, que variou de 20 $^{\circ}\text{C}$ até 900 $^{\circ}\text{C}$. As amostras analisadas por TG/DTG foram àquelas com resultados mais promissores, detectados através da análise de resistência à compressão e avaliação estatística (ANOVA).

3.2.4.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)

A análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada a fim de avaliar a morfologia das amostras. A análise de MEV foi realizada com acoplamento da Espectroscopia por energia dispersiva (EDS), com a finalidade de realizar uma análise elementar da amostra. As amostras submetidas à análise de MEV/EDS foram àquelas com resultados mais promissores, detectados através da análise de resistência à compressão e avaliação estatística (ANOVA). Os fragmentos das amostras foram colados nos *stubs* (porta amostras) e recobertos por uma fina camada

de ouro através de uma metalizadora. Após o recobrimento, as amostras foram submetidas a análise em um equipamento TESCAN VEGA 4, com EDS da TESCAN. A formação das imagens no MEV foi realizada através de elétrons secundários, em alto vácuo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

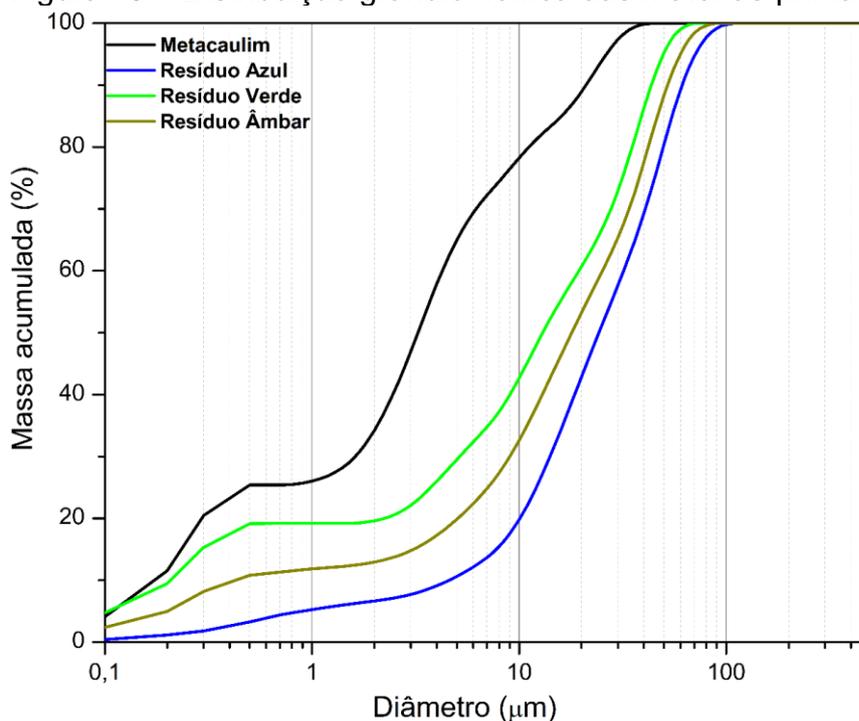
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÕES DO CAULIM, METACAULIM E RESÍDUOS

4.1.1 Análise Granulométrica

Uma pesquisa realizada por Weng *et al.* (2005) sobre os efeitos dos aluminatos na formação de geopolímeros relata o quanto o tamanho das partículas do precursor geopolimérico têm influência nas propriedades do geopolímero. Os autores relatam ainda que precursores com altas áreas superficiais específicas resultam em características como microestrutura mais homogênea e maior resistência à compressão dos geopolímeros. A distribuição granulométrica do metacaulim e dos resíduos de vidro azul, verde e âmbar podem ser observados na Figura 13.

Figura 13 – Distribuição granulométrica das matérias-primas



Fonte: A Autora (2025)

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas, é possível observar que o metacaulim (curva preta) é o material que possui a distribuição granulométrica mais homogênea e com partículas menores. A porcentagem de massa acumulada do metacaulim atinge 100% em 45 μm, o que significa que todas as partículas possuem tamanho menor ou igual a 45 μm, criando uma alta área específica e favorecendo as reações de geopolimerização.

Os resíduos de vidro apresentam partículas maiores que o metacaulim, com curvas deslocadas mais à direita, na Figura 13. Os resíduos com granulometrias mais promissoras, de acordo com as menores dimensões das partículas, foram os resíduos âmbar e verde, com apenas 15,51 % e 7,69 % de material retido na peneira de 45 μm . Para uma análise mais detalhada sobre o comportamento das partículas, é possível observar os valores de $D_{10\%}$, $D_{50\%}$, $D_{90\%}$ e $D_{\text{médio}}$ na Tabela 3.

Tabela 3 - Diâmetro médio das matérias-primas

Material	$D_{10\%}^*$ (μm)	$D_{50\%}^*$ (μm)	$D_{90\%}^*$ (μm)	$D_{\text{médio}}$ (μm)
Metacaulim	0,17	3,25	17,96	6,02
Resíduo Azul	4,34	23,68	58,91	28,86
Resíduo Verde	0,21	12,57	40,60	17,73
Resíduo Âmbar	0,43	17,96	52,06	23,41

* $D_{10\%}$ - 10% das partículas abaixo deste diâmetro

$D_{50\%}$ - 50% das partículas abaixo deste diâmetro

$D_{90\%}$ - 90% das partículas abaixo deste diâmetro

Fonte: A Autora (2025)

De acordo com os dados observados na Tabela 3, 50 % das partículas de metacaulim estão abaixo de 3,25 μm . Já o resíduo azul, possui 50 % das partículas com diâmetro menor que 23,68 μm . O resíduo verde resulta em uma granulometria intermediária entre o metacaulim e o resíduo azul, com 50 % de suas partículas menores que 12,57 μm . Entre o resíduo verde e o resíduo azul pode-se observar a granulometria do resíduo âmbar, com 50 % das partículas menores que 17,96 μm .

A distribuição do tamanho das partículas de um precursor é uma propriedade relevante para prever a sua reatividade no sistema (Santana *et al.*, 2021). O resíduo de vidro presente neste estudo é sílica amorfa. A moagem, por reduzir o tamanho das partículas, em conjunto com o pH alcalino pode favorecer sua participação nas reações geopoliméricas. Ao considerar apenas o diâmetro das partículas, percebe-se que o resíduo azul pode ser mais duro do que os demais, com partículas mais grosseiras, o que pode direcioná-lo a atuar como um efeito filler na matriz geopolimérica. Os resíduos verde e âmbar possuem granulometrias intermediárias entre o metacaulim e o resíduo azul.

4.1.2 Massa Específica

As massas específicas do metacaulim e dos resíduos azul, verde e âmbar podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Massas específicas das matérias-primas

Material	Massa Específica (g/cm³)
Metacaulim	2,63
Resíduo Azul	2,42
Resíduo Verde	2,48
Resíduo Âmbar	2,44

Fonte: A Autora (2025)

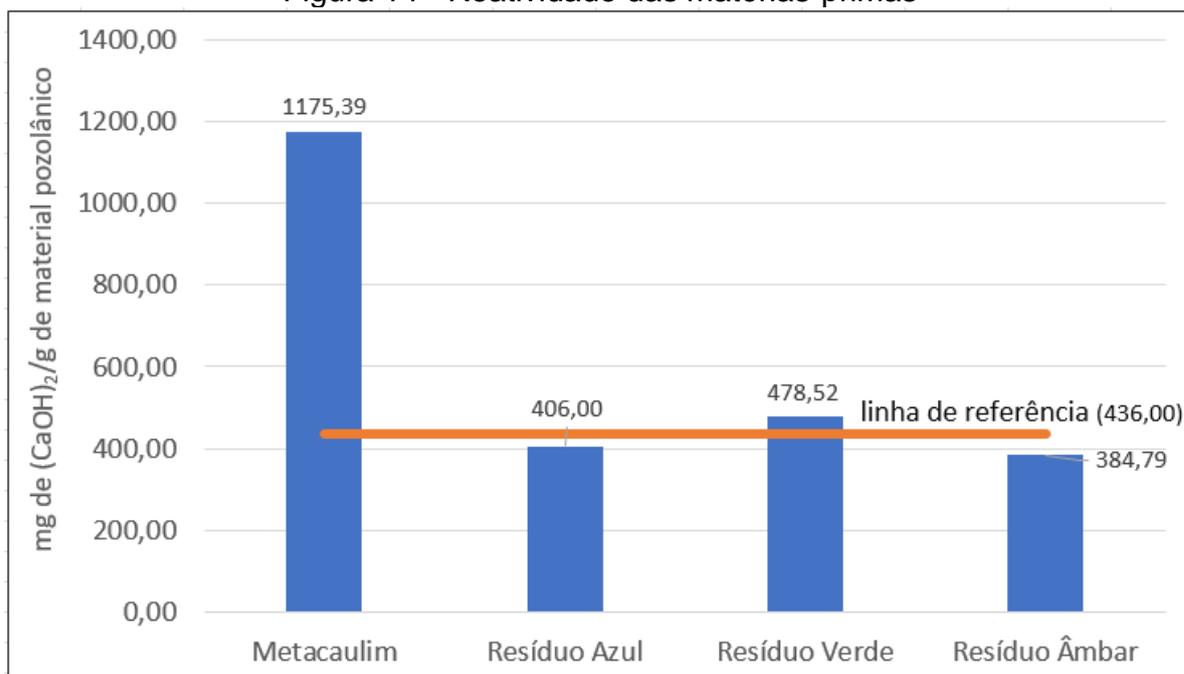
Como visto na Tabela 4, o metacaulim apresentou o maior valor de massa específica, tendo em vista que ele é composto por partículas mais compactas e minerais pesados, como sílica e alumina, que são formados por átomos relativamente mais pesados (Si – 28u - e Al – 27u), que estão fortemente ligados. Resultados semelhantes foram observados por Júnior (2023) e Torres (2019), em estudos que também trabalharam com a caracterização de metacaulim.

Os resíduos de vidro azul, verde e âmbar resultaram em massas específicas semelhantes ao metacaulim, com reduções de apenas 7,98 %, 5,70 % e 7,22 %, respectivamente, em comparação ao metacaulim. Além disso, os óxidos de sódio e cálcio são modificadores de rede, o que significa que eles quebram a estrutura contínua da sílica de vidro e cria vazios, que também diminui sua massa específica. Esses resultados de massa específica das garrafas *long neck* corroboram os valores encontrados por Trentin *et al.* (2020) ao trabalharem com argamassas cimentícias produzidas com resíduos de vidro de garrafas *long neck*.

4.1.3 Reatividade das Matérias-primas

A reatividade dos materiais foi avaliada através do índice de atividade pozolânica, que indica a quantidade de sílica e alumina reativas no material, como sugerido por Filho *et al.* (2017) e por Panato (2023), ao estudarem a reatividade de materiais pozolânicos. A capacidade de reatividade das matérias-primas pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 - Reatividade das matérias-primas



Fonte: A Autora (2025)

O valor mínimo para um material ser classificado como pozolânico é de 436 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$, de acordo com a análise de Raverdy *et al.* (1980), sobre materiais que possuem propriedades pozolânicas adequadas. Em vista disso, uma linha de referência foi traçada, na Figura 14, a fim de estabelecer um parâmetro para os materiais analisados.

O metacaulim apresentou a maior reatividade entre os materiais analisados, com um valor de 1.175,39 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$. O resíduo verde resultou em um valor 9,75 % superior ao limite mínimo estabelecido, enquanto os resíduos azul e âmbar alcançaram 93,12 % e 88,26 % do valor mínimo necessário para serem classificados como materiais pozolânicos, o que significa dizer que tais resíduos são passíveis de interações químicas, ainda que não alcancem a sua totalidade.

4.1.4 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A composição química determinada por meio de fluorescência de raios-X, para o caulim, o metacaulim e os três tipos de resíduos de garrafas não retornáveis *long neck*, pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 5 - Composição química caulim, metacaulim e resíduos.

Óxidos	Caulim (%)	Metacaulim (%)	Resíduo Azul (%)	Resíduo Verde (%)	Resíduo Âmbar (%)
SiO ₂	53,66	52,61	72,73	71,83	73,15
Al ₂ O ₃	44,78	45,93	1,77	1,99	1,79
Na ₂ O	-	-	8,55	6,13	7,35
K ₂ O	0,91	0,66	0,24	0,91	0,49
CaO	0,08	0,07	15,82	18,02	15,90
Fe ₂ O ₃	0,49	0,33	0,15	0,91	0,84
SrO	-	-	0,03	0,04	0,05
SO ₃	-	-	0,20	0,03	0,03
Cl	0,08	-	0,02	0,01	0,02
MgO	-	-	-	-	0,18
Co ₂ O ₃	-	-	0,14	-	-
Rb ₂ O	-	-	0,07	-	-
P ₂ O ₅	-	0,09	-	-	-
H ₂ O	-	0,30	0,28	0,12	0,20
PF*	13,19	1,19	1,67	0,99	2,03

* PF = Perda ao fogo

Fonte: A Autora (2025)

Os valores encontrados na composição química do caulim e do metacaulim, conforme a Tabela 3, mostram que os seus principais componentes são sílica e alumina, com quantidades menores de outros óxidos. Esses resultados são similares ao comportamento dos caulins e metacaulins encontrados na literatura (Diffo *et al.*, 2015; Geraldo, Fernandes e Camarini, 2017; Huseien *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022).

Para o uso do metacaulim como precursor principal da síntese geopolimérica, a alta concentração de SiO₂ e Al₂O₃ é um requisito imprescindível (Khale, Chaudhary, 2007) e sua quantidade total no metacaulim alcança 98,5 %, classificando-o como um material adequado para o uso como fonte de aluminossilicato.

No caso da composição obtida no resíduo de vidro para os três tipos de garrafas, o óxido de silício (SiO₂) tem presença predominante com os valores de 72,73 %, 71,83 % e 73,15 % para os resíduos de vidro azul, verde e âmbar, respectivamente. Sua composição complementar é constituída basicamente por óxido de cálcio (CaO), com valores em torno de 15 %, e óxido de sódio (Na₂O), correspondente a aproximadamente 7 % para os três tipos de resíduos. Essas porcentagens permitem

sua classificação como vidro soda-cálcico, assim como relatado por Pinto-Coelho (2009) em seu livro sobre reciclagem e desenvolvimento sustentável.

As cores características de cada tipo de resíduo proveniente de garrafas *long neck* são atribuídos ao metal cobalto, no caso do resíduo azul, e ao ferro, no caso dos resíduos verde e âmbar, assim como detectado nos resultados de FRX vistos na Tabela 3. É importante destacar a presença singular do CO_2O_3 no resíduo de vidro azul, e os teores de Fe_2O_3 nos valores de 0,94 % e 0,89 %, para os resíduos verde e âmbar, respectivamente, enquanto o resíduo azul apresenta apenas 0,22 %. Estes resultados são condizentes com as informações de Alves, Gimenez e Mazali (2001), ao relatarem os agentes de pigmentação responsáveis pela cor dos vidros.

Quanto ao teor de óxido de alumínio (Al_2O_3), sua quantidade não é tão representativa, com valores por volta de 2 %. Diante disso, o foco desta pesquisa é trabalhar com o resíduo de vidro em substituição parcial do metacaulim para que este último seja a fonte principal de Al_2O_3 . Os autores Brito (2021) e Shayan e Xu (2004), ao trabalhar com resíduos de vidro soda-cálcicos, encontraram valores de FRX que corroboram com os aqui descritos.

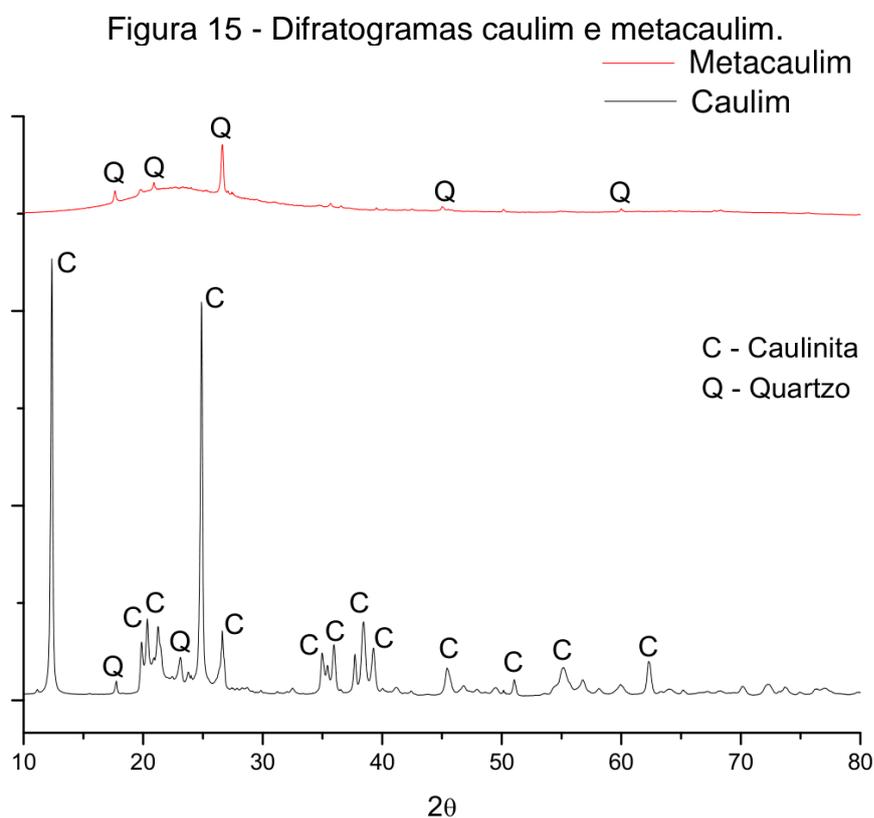
Com relação a Perda ao Fogo (PF), é importante destacar a eficiência do processo de calcinação do caulim, uma vez que seu valor inicial era de 13,19, o que indica a presença de matéria volátil (água, gases ou materiais orgânicos), o que afeta na estabilidade do material. Após o processo de calcinação, esse valor teve uma redução de 90,98 %, o que é comum em metacaulins e demonstra a eficiência da calcinação, assim como os valores encontrados por Manikandan e Vasugi (2022). Já a PF dos resíduos de vidro são semelhantes entre si, com pequenas variações que refletem as diferenças da composição química de cada resíduo.

4.1.5 Difração de Raios-X (DRX)

As fases cristalinas e o material amorfo do caulim e do metacaulim podem ser observados através dos difratogramas de Raios-X da Figura 15. Cartas cristalográficas indexadas em *The International Centre for Diffraction Data* (ICDD) foram utilizadas para obter os dados resultantes, com referências em 00-046-1045 (SiO_2 – Quartzo) e 00-058-2028 ($[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ – Caulinita).

O caulim utilizado para realizar a calcinação é um material com cristalinidade representativa e apresenta fases de Caulinita (C) e de Quartzo (Q) identificados pelos

picos localizados em 12,59 °, 17,91 °, 23,22 °, 24,96 °, 36,62 ° e 62,36 °. O aspecto macroscópico do caulim tem coloração branca, o que é correspondente a ausência de picos de fases de ferro observados no difratograma, afirmando também os resultados de FRX, que demonstram uma composição química inferior a 1 % de Fe_2O_3 .



Fonte: A Autora (2025)

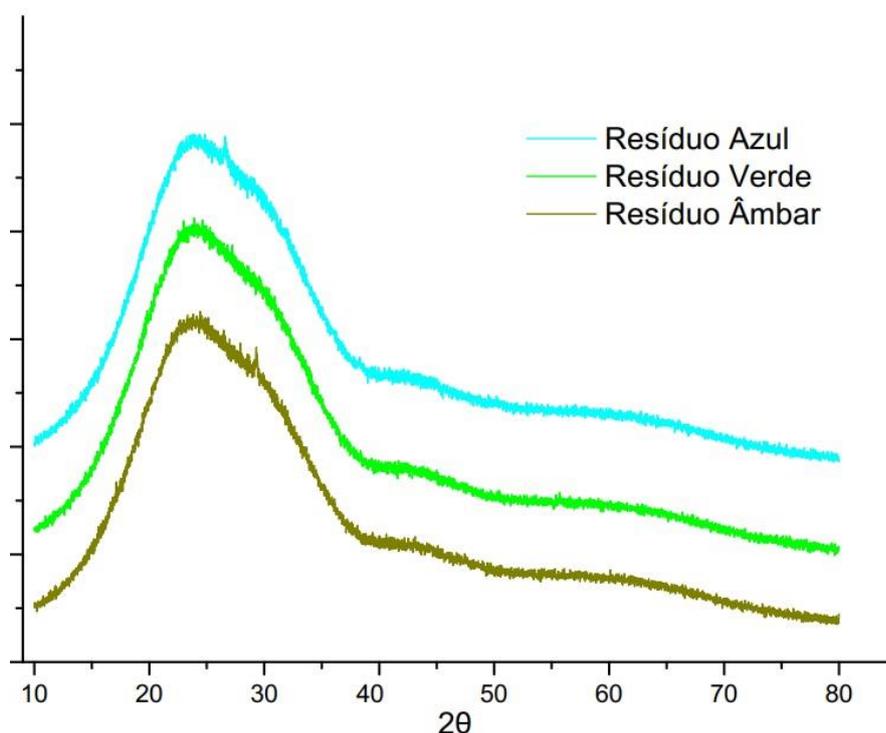
Já o metacaulim é derivado do processo de calcinação e é caracterizado pela predominância de halos amorfos. A região em 2θ entre 15 ° e 30 °, com uma corcova centrada em 22,8 °, indica a presença de alumina e sílica amorfas, o que corrobora com as informações apontadas por He (2012), ao estudar a síntese e caracterização de geopolímeros. Esse comportamento confirma que o tratamento térmico resultou em uma desordem da estrutura da caulinita e gerou a amorficidade do material, o que demonstra que o material está em sua forma reativa e é adequado para síntese geopolimérica (Bigno, 2008; Duxson *et al.*, 2007a).

Além disso, como encontrado por Ozer e Uzun (2015) e por Sarkar, Dana e Sukhen (2015) em estudos de geopolímeros com diferentes razões molares e ativadores, o pico característico, em 26,2 °, é correspondente a impurezas de quartzo presentes no metacaulim. Assim como afirmam Boschi, Lot e Melchiades (2016) ao

estudarem os efeitos das matérias-primas no geopolímero, a presença de fases cristalinas interferem na reatividade da geopolimerização e é desejável que a fonte de aluminossilicato tenha um caráter amorfo para que haja uma maior reatividade com a solução alcalina.

A análise por DRX do resíduo de vidro moído para os três tipos de garrafas *long neck* não apresentam fases cristalinas, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Difrátogramas resíduos azul, verde e âmbar.

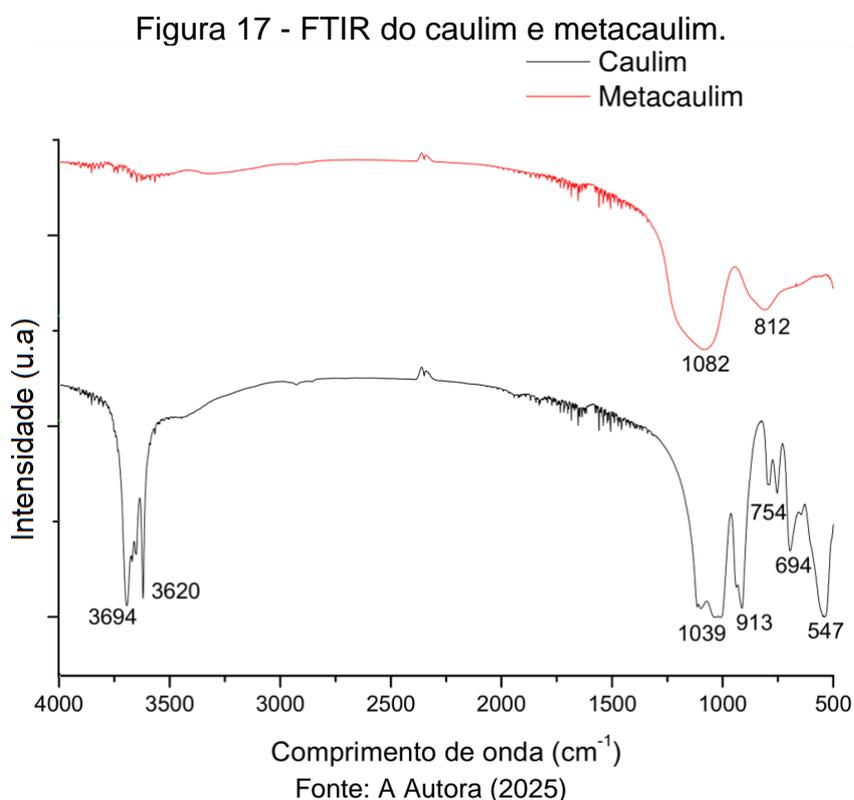


Fonte: A Autora (2025)

Apenas a banda de material amorfo característica dos vidros, entre 18 ° e 35 ° em 2θ , pode ser observada na Figura 16. Estudos de atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-calcicos realizados por Sales (2014) e análises de argamassas cimentícias com resíduos de vidro *long neck* produzidas por Brito (2021) caracterizaram o vidro como amorfo por meio desta mesma banda amorfa característica. Essa estrutura sem forma e desordenada encontrada no resíduo de vidro torna o material propício a combinações e transformações com outros elementos (Brito, 2021), o que demonstra o intenso potencial do uso deste resíduo na síntese geopolimérica.

4.1.6 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As bandas de absorção no infravermelho obtidas para o caulim e metacaulim podem ser observadas na Figura 17.

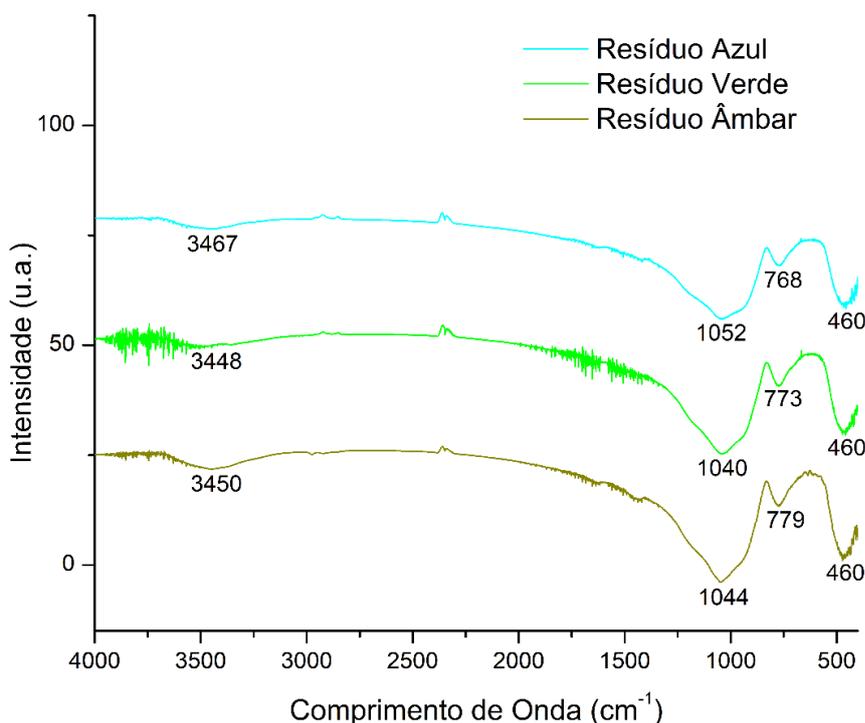


Conforme o espectro visto na Figura 17, o caulim (curva preta) apresenta indícios de silicato e aluminossilicato bem característicos do caulim e que podem ser identificados pela banda 547 cm^{-1} , que corresponde a deformação simétrica de Al-O-Si (García, 2013; Tironi *et al.*, 2012). A cristalinidade da caulinita está relacionada as bandas de estiramento vibracional do grupo O-Al-OH, observadas nas bandas 694 cm^{-1} e 754 cm^{-1} (Silva, Oliveira E Viana, 2012; Turhan, Dogan, Alkan, 2010). Em 913 cm^{-1} , foi observado o pico de absorção de Al-OH (Saikia e Parthasarathy, 2010; Vollmann, 2016; Tironi *et al.*, 2012). A deformação assimétrica de Si-O é indicada pela banda de 1039 cm^{-1} (Tironi *et al.*, 2012; Turhan, Dogan, Alkan, 2010). Existentes na estrutura da caulinita, na região entre 3600 cm^{-1} e 3700 cm^{-1} , são observadas duas bandas bem definidas, 3620 cm^{-1} e 3694 cm^{-1} , que estão relacionadas às vibrações do estiramento de hidroxilas (García, 2013; Saikia e Parthasarathy, 2010; Silva, Oliveira E Viana, 2012; Turhan, Dogan e Alkan, 2010).

Já na curva vermelha da Figura 17, é possível observar o tratamento térmico eficiente realizado no caulim, que por sua vez se transformou em metacaulim. Quando os resultados são comparados entre si, a calcinação por 5 horas, a 750 °C removeu as bandas características da caulinita relativas aos picos característicos Si-O (1039 cm^{-1}), O-Al-OH (694 cm^{-1} e 754 cm^{-1}) Si-O-Al (547 cm^{-1}), e Al-OH (913 cm^{-1}) do caulim, assim como eliminou as bandas em 3620 cm^{-1} e 3694 cm^{-1} , o que indica a remoção das hidroxilas que diferenciam o caulim do metacaulim. Além disso, apenas as bandas 1082 cm^{-1} e 812 cm^{-1} puderam ser detectadas no espectro vermelho, as quais correspondem ao estiramento assimétrico da ligação Si-O-Si e é atribuído à presença de sílica amorfa, assim como também foi visto por Sarkar, Dana e Sukhen (2015) em seu trabalho sobre geopolímeros baseados em metacaulim com diferentes ativadores.

Os espectros obtidos para os três tipos de resíduos de garrafas long neck podem ser verificados na Figura 18.

Figura 18 - FTIR dos resíduos azul, verde e âmbar.

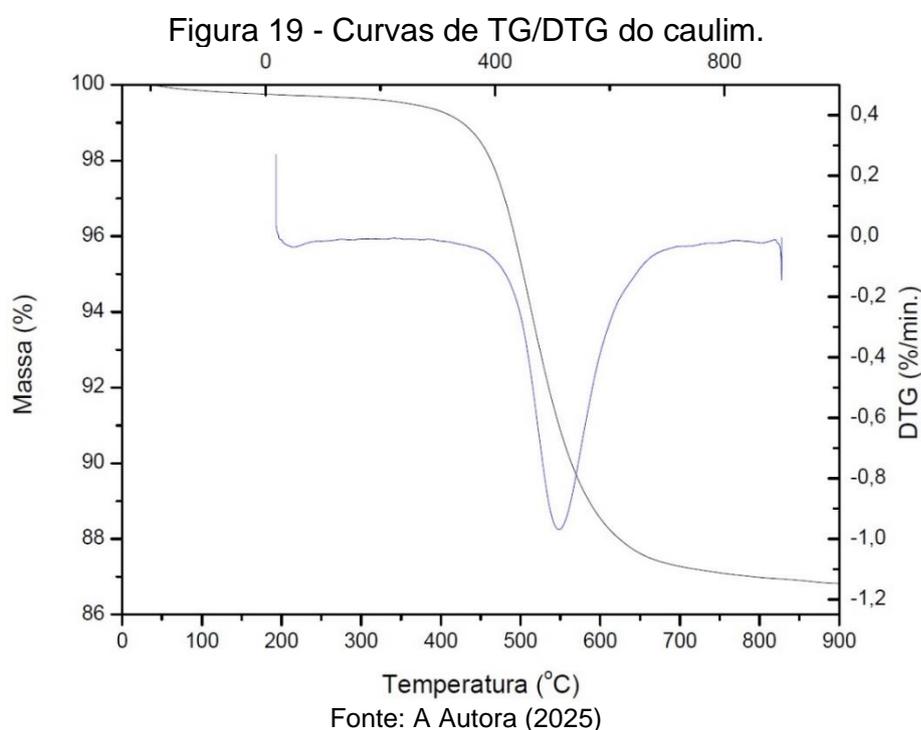


Os resultados para os três tipos de resíduos de vidros mostraram três regiões de absorção fortes em torno de 1040 cm^{-1} , 770 cm^{-1} e 460 cm^{-1} , que são relacionados à rede de SiO_2 presente nos vidros. As bandas de intensidades 1052 cm^{-1} , 1040 cm^{-1} e 1044 cm^{-1} , nos três espectros, estão relacionados ao alongamento assimétrico das

ligações Si-O-Si do SiO₂ dentro do tetraédrico. Também estão detectadas vibrações em 768 cm⁻¹, 773 cm⁻¹ e 779 cm⁻¹, nos diferentes tipos de resíduos, que são referentes ao alongamento simétrico Si-O-Si. Picos vibracionais detectados em 460 cm⁻¹ são referentes à deformação angular O-Si-O. Estes resultados são indícios da amorficidade dos resíduos de vidro e foram semelhantes a trabalhos envolvendo também resíduos de vidro soda-cálcicos (Alvarenga *et al.*, 2022; El-naggar e El-dessouky, 2017; Sales, 2014). Além destes, são detectados picos em 3467 cm⁻¹, 3448 cm⁻¹ e 3450 cm⁻¹, que são atribuídos a bandas de H₂O e OH, ligadas a água molecular (Dimas, Giannopoulou, Panias, 2009; El-Naggar e El-Dessouky, 2017; Husung e Doremus, 1990).

4.1.7 Termogravimetria

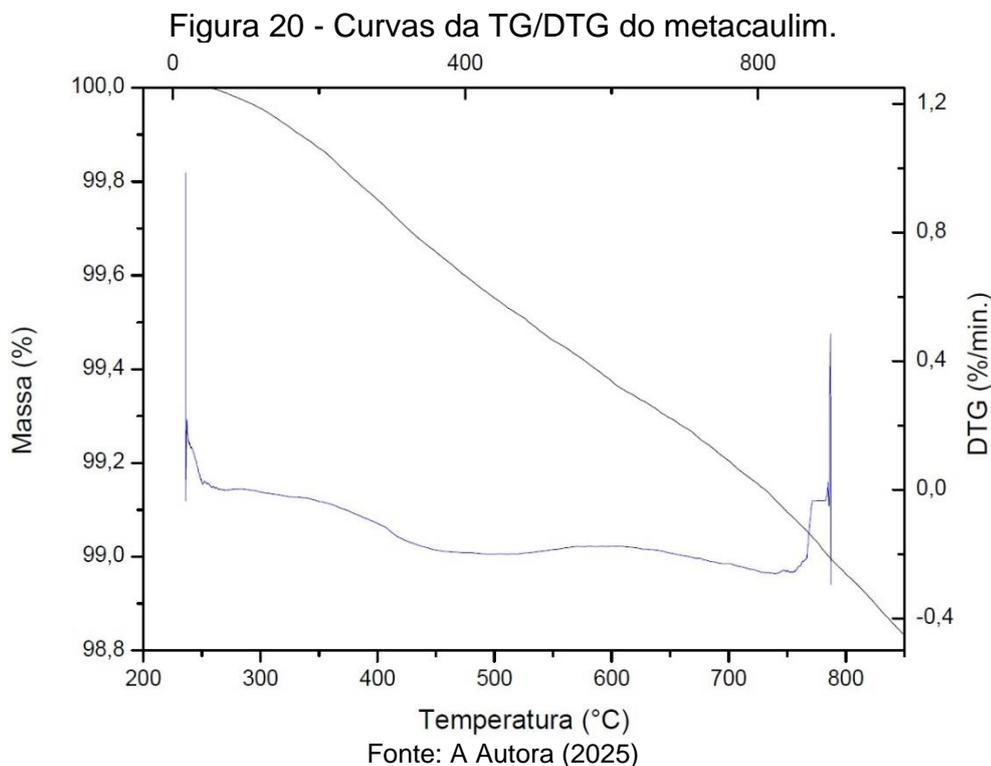
A análise do resultado de termogravimetria (TG/DTG) para o caulim pode ser observado na Figura 19.



O fenômeno da desidroxilação que ocorre entre as temperaturas de 500 °C e 700 °C, conforme a Figura 19, representa uma perda de massa de 13,2 % e é um comportamento característico do material caulínico. No estudo do efeito das características das matérias-primas no desempenho de geopolímeros realizado, em

2016, por Boschi, Lot e Melchiades, o comportamento do caulim na análise de TG/DTG foi semelhante aos resultados aqui encontrados.

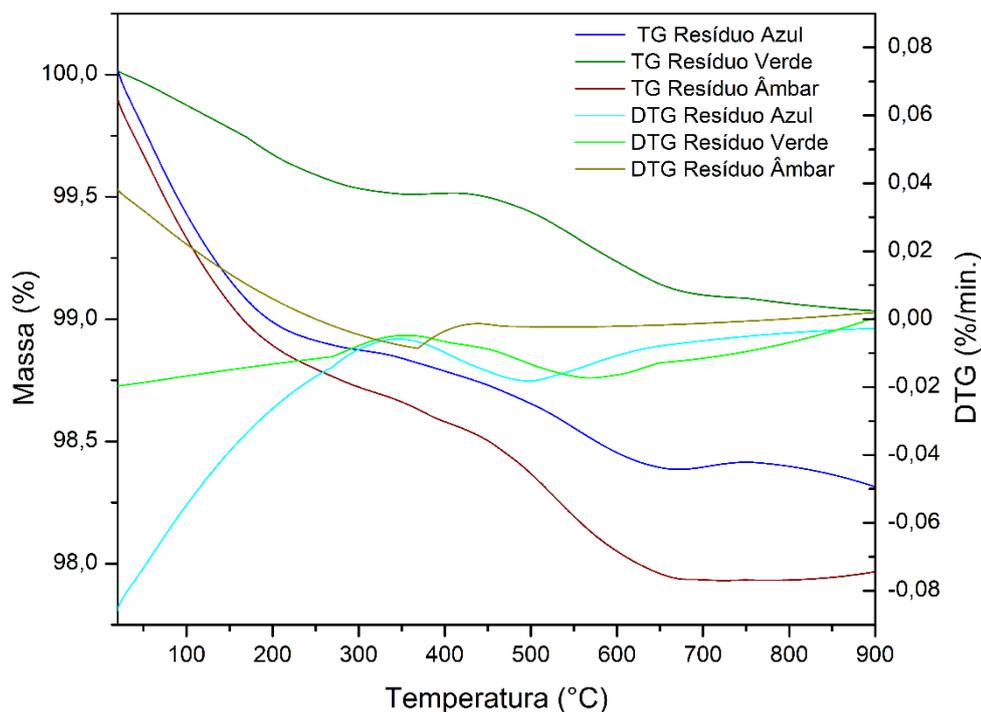
O material obtido após o processo de calcinação do caulim também foi submetido a análise de TG/DTG e o resultado pode ser observado na Figura 20.



Com o aumento da temperatura, assim como visto na Figura 20, ocorreu uma perda de massa correspondente 1,19 %. Esse comportamento é referente a desidroxilação do caulim residual do material de partida. O autor Medina (2011), em sua pesquisa sobre a pozolanicidade do metacaulim em sistemas com cimento Portland e hidróxido de cálcio, detectou resultados de acordo com estes aqui obtidos. O teor de massa perdida nesta análise sugere que o processo de calcinação foi eficiente e que a amostra é constituída predominantemente de metacaulim.

Os resultados de TG/DTG para os resíduos azul, verde e âmbar podem ser observados na Figura 21.

Figura 21 - Curvas da TG/DTG para os resíduos azul, verde e âmbar



Fonte: A Autora (2025)

As curvas de TG possibilitam a observação de reduções de massa de 1,67 %, 1,00 % e 2,03 % para os resíduos azul, verde e âmbar, respectivamente. Essa perda de massa é atribuída à liberação de água adsorvida, materiais degradáveis ou outros voláteis leves presentes nos resíduos (Pulidori *et al.*, 2024). É importante destacar que, entre os três tipos de vidro, o resíduo âmbar resultou na maior perda de massa, o que sugere uma maior quantidade de componentes orgânicos ou instáveis nesse material. Todavia, mesmo para a pior situação, as perdas de massa não se distanciaram do valor perdido pelo metacaulim.

Os fenômenos observados nas curvas de DTG permitem visualizar um pico entre 200 °C e 300 °C na curva do resíduo azul, o que indica uma perda de massa significativa nessa faixa, assim como visto na curva de TG. Já o resíduo verde, apresenta um pico mais amplo entre 100 °C e 400 °C, o que sugere a liberação inicial de água e gases leves e, em seguida, a decomposição de componentes mais pesados. O resíduo âmbar apresenta um pico entre 100 °C e 300 °C, que corresponde aos fenômenos de liberação de água e degradação de componentes voláteis.

4.2 ESTUDOS PRELIMINARES

A proposta inicial teve como objetivo utilizar três resíduos provenientes de garrafas *long neck* para substituir parcialmente o metacaulim, empregando-os como fontes complementares de SiO₂ na matriz geopolimérica. Conforme apresentado no Quadro 9, foram produzidos geopolímeros com relações SiO₂/Al₂O₃ de 3,00; 3,50; 3,78 e 4,66, utilizando os resíduos de vidro tanto como fonte base, quanto como precursor ativador do geopolímero. Isso se deve ao alto teor de SiO₂ presente na composição química dos resíduos de vidro, corroborado pelos resultados obtidos por Cyr, Idir e Poinot (2012) e Pascual, Tognonvi e Tagnit-Hamou (2014), que demonstraram sucesso na aplicação de outros tipos de resíduos de vidro na solidificação de materiais geopoliméricos.

Quadro 9 – Testes iniciais

Teste	Mk (%)	Az (%)	Ve (%)	Am (%)	Razões molares			Fenômeno observado	Soluções/Ações
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃		
1	63,8	36,2	-	-	3,00	1,00	3,00	O silício derivado do resíduo de vidro não favoreceu o desenvolvimento da resistência mecânica em 1 dia, como ocorre em sistemas convencionais.	Aumentar a temperatura de cura; Inserir silicato de sódio no sistema; modificar a molaridade da solução de NaOH; Avaliar outras relações SiO ₂ /Al ₂ O
2	63,8	-	36,2	-	3,00	1,00	3,00		
3	63,8	-	-	36,2	3,00	1,00	3,00		
4	54,2	45,8	-	-	3,00	0,86	3,50		
5	54,2	-	45,8	-	3,00	0,86	3,50		
6	54,2	-	-	45,8	3,00	0,86	3,50		
7	50,0	50,0	-	-	3,00	0,79	3,78		
8	50,0	-	50,0	-	3,00	0,79	3,78		
9	50,0	-	-	50,0	3,00	0,79	3,78		
10	40,0	60,0	-	-	3,00	0,64	4,66		
11	40,0	-	60,0	-	3,00	0,64	4,66		
12	40,0	-	-	60,0	3,00	0,64	4,66		

Fonte: A Autora (2025)

Os geopolímeros produzidos nas rodadas de 1 a 12 não apresentaram desenvolvimento de resistência mecânica em 24 horas, como é típico em sistemas geopoliméricos convencionais. Para resolver esse problema, foram adotadas algumas medidas com base em observações experimentais e em estudos relacionados ao uso de resíduos de vidro em matrizes geopoliméricas.

A primeira modificação implementada foi a realização da cura dos geopolímeros a 40 °C, além da cura em temperatura ambiente (25 °C ± 2 °C). Estudos anteriores com resíduos de garrafas retornáveis (Cyr, Idir, Poinot, 2012) e resíduos de vidro (Alvarenga *et al.*, 2022) indicaram que materiais geopoliméricos precisam ser submetidos a temperaturas de cura superiores à ambiente para acelerar as reações de geopolimerização e alcançar maiores valores de resistência à compressão.

O estudo de Torres-Carrasco e Puertas (2017) sobre geopolímeros à base de escória de alto-forno ativados com resíduos de vidro destacou que a concentração do ativador alcalino exerce grande influência na resistência mecânica do material. Por isso, foram analisadas concentrações de 5 M e 10 M, considerando que Cyr, Idir e Poinot (2012) identificaram 5 M como uma concentração ideal. Segundo esses autores, o aumento da concentração do ativador alcalino poderia reduzir a mobilidade iônica e retardar o processo de geopolimerização.

Bobirica *et al.* (2015) obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão em polímeros inorgânicos produzidos com resíduos de lâmpadas fluorescentes, utilizando silicato de sódio como ativador alcalino. Com base nisso, decidiu-se avaliar a resistência à compressão de sistemas que também empregam silicato de sódio comercial. O uso do SiO₂ presente no silicato de sódio como ativador alcalino influencia o cálculo das proporções químicas dos materiais e pode modificar as relações SiO₂/Al₂O₃.

Com o objetivo de incorporar o resíduo de vidro de garrafa *long neck* na matriz geopolimérica otimizada com silicato de sódio, foram analisadas as resistências à compressão de amostras padrão (sem resíduo), com relações SiO₂/Al₂O₃ de 2,0; 2,5 e 3,00, utilizando soluções de NaOH nas concentrações de 5 M e 10 M, e curadas a temperaturas de 25 °C e 40 °C, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Análises do geopolímero de referência

Rodada	Mk	NaOH (M)	SiO ₂	Al ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O	Temperatura de cura (°C)	Fenômeno observado	Soluções/Ações
13	100	5	2,0	1,0	2,0	25	Apto RC	RC
14	100	5	2,0	1,0	2,0	40	Apto RC	RC
15	100	5	2,5	1,0	2,5	25	Apto RC	RC
16	100	5	2,5	1,0	2,5	40	Apto RC	RC
17	100	5	3,0	1,2	2,5	25	Apto RC	RC
18	100	5	3,0	1,2	2,5	40	Apto RC	RC

Continuação Tabela 6

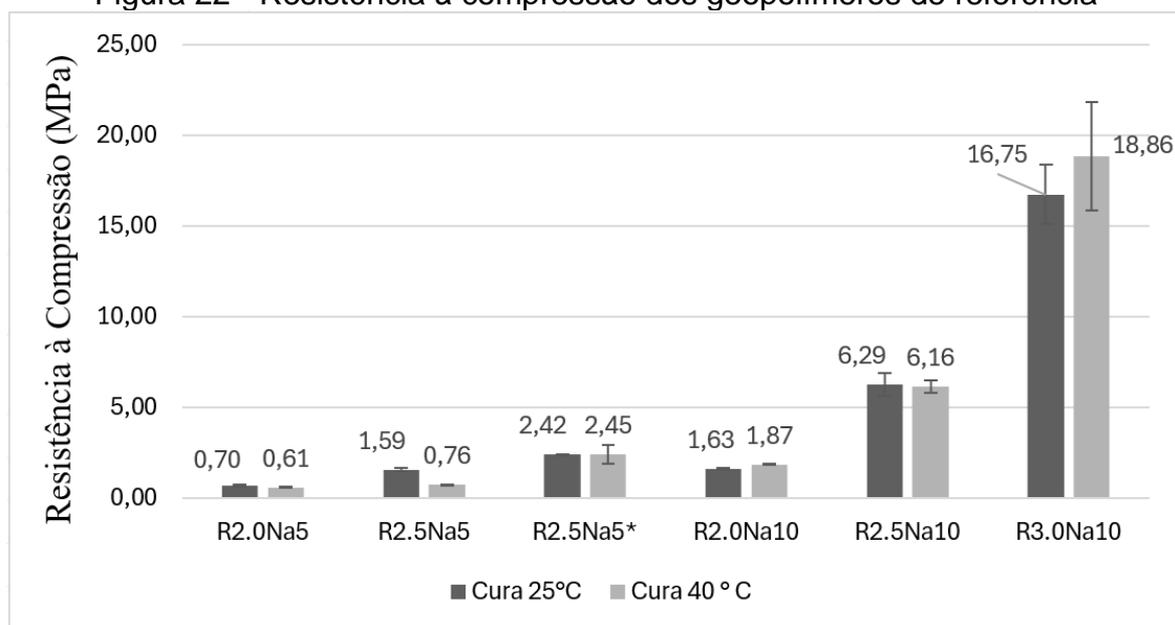
19	100	5	3,0	1,0	3,0	25	Amostra fluida	-
20	100	5	3,0	1,0	3,0	40	Amostra fluida	-
21	100	10	2,0	1,0	2,0	25	Apto RC	RC
22	100	10	2,0	1,0	2,0	40	Apto RC	RC
23	100	10	2,5	1,0	2,5	25	Apto RC	RC
24	100	10	2,5	1,0	2,5	40	Apto RC	RC
25	100	10	3,0	1,0	3,0	25	Apto RC	RC
26	100	10	3,0	1,0	3,0	40	Apto RC	RC

Apto RC = Amostra pode seguir para ensaio de RC; RC = Resistência à Compressão.

Fonte: A Autora (2025)

Foram produzidas 14 amostras com as relações especificadas na Tabela 6. Somente as amostras das rodadas 19 e 20 apresentaram um processo de geopolimerização mais lento em comparação com as amostras convencionais de geopolímero, o que afetou negativamente a resistência à compressão após 24 horas de cura. As demais amostras foram consideradas adequadas para continuar os testes de resistência à compressão, pois, macroestruturalmente, estavam firmes após 24 horas de moldagem. Os valores de resistência à compressão dos geopolímeros de referência, com 7 dias de idade, podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 - Resistência à compressão dos geopolímeros de referência

R2.0, R2.5 e R3.0: SiO₂/AlO₃ = 2.0; 2.5 e 3.0, respectivamente. Na5 e Na10: Concentração de 5 e 10 molar (solução NaOH)

Fonte: A Autora (2025)

A análise da resistência à compressão das amostras dos geopolímeros de referência indica que, para a matriz geopolimérica formada com esses materiais, a concentração de 10 M é mais promissora, uma vez que as amostras com 5 M não atingiram o valor de 3 MPa de resistência. Em contraste, na concentração de 10 M, a resistência à compressão aumentou conforme a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ foi elevada, alcançando os valores de 16,75 e 18,86 MPa na amostra R3.0Na10.

O aumento da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, para ambas as concentrações estudadas, resultou em valores de resistência à compressão crescentes. Para as amostras R2.0Na10, R2.5Na10 e R3.0Na10, as resistências obtidas foram de 1,63; 6,29 e 16,75 MPa, para cura a 25 °C, e 1,87; 6,16 e 18,86 MPa, para as amostras curadas a 40 °C.

Os valores de resistência à compressão das amostras curadas a 25 °C foram semelhantes aos das amostras curadas a 40 °C. Para verificar se houve diferença significativa na resistência à compressão entre as duas temperaturas de cura, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com nível de significância de 5%, para cada relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ estudada. A variação da temperatura de cura influenciou a resistência à compressão das amostras R2.5Na5 e R2.0Na10, enquanto não houve efeito significativo nas amostras R2.0Na5, R2.5Na5*, R2.5Na10 e R3.0Na10, curadas a 25 °C e 40 °C, pois o valor-P calculado foi superior ao nível de significância de 5% estabelecido para essas amostras.

Como mostrado na Figura 8, o melhor resultado de resistência à compressão foi obtido para a amostra de referência R3.0Na10. Assim, decidiu-se incorporar o resíduo de vidro na matriz geopolimérica com a relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,0, utilizando uma solução de NaOH com concentração molar de 10 M, e avaliar as amostras curadas a 25 °C e 40 °C, com o objetivo de verificar a influência da variação da temperatura de cura na resistência à compressão do geopolímero.

A experiência adquirida com os ensaios realizados até o momento, juntamente com os estudos sobre geopolímeros baseados em cinzas volantes (Toniolo *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017), escória de alto forno (Wang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2017) e metacaulim (Si *et al.*, 2020), além do uso de resíduos de vidro provenientes de garrafas retornáveis (Cyr, Idir, Pointot, 2012), lâmpadas fluorescentes (Bobirica *et al.*, 2015; Novais *et al.*, 2016) e Display de Cristal Líquido (LCD) (Wang *et al.*, 2017), serviram como base para determinar as porcentagens de substituição de 0, 10, 20 e 30 % em peso do resíduo de vidro de garrafas *long neck* pelo metacaulim. Assim, as

amostras produzidas para análises de reologia, resistência à compressão e demais ensaios, podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Consumo de materiais usados na produção dos geopolímeros

Teste	Id	Mk (kg/m ³)	Az (kg/m ³)	Ve (kg/m ³)	Am (kg/m ³)	SS (kg/m ³)	Solução NaOH (kg/m ³)	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Temperatura de cura (°C)
27	Ref25	355,19	-	-	-	384,15	122,77	3.0	25
28	Ref40	355,19	-	-	-	384,15	122,77	3.0	40
29	10Az25	319,67	35,52	-	-	384,15	122,77	3.4	25
30	10Az40	319,67	35,52	-	-	384,15	122,77	3.4	40
31	20Az25	284,16	71,04	-	-	384,15	122,77	3.9	25
32	20Az40	284,16	71,04	-	-	384,15	122,77	3.9	40
33	30Az25	248,64	106,56	-	-	384,15	122,77	4.5	25
34	30Az40	248,64	106,56	-	-	384,15	122,77	4.5	40
35	10Ve25	319,67	-	35,52	-	384,15	122,77	3.4	25
36	10Ve40	319,67	-	35,52	-	384,15	122,77	3.4	40
37	20Ve25	284,16	-	71,04	-	384,15	122,77	3.9	25
38	20Ve40	284,16	-	71,04	-	384,15	122,77	3.9	40
39	30Ve25	248,64	-	106,56	-	384,15	122,77	4.5	25
40	30Ve40	248,64	-	106,56	-	384,15	122,77	4.5	40
41	10Am25	319,67	-	-	35,52	384,15	122,77	3.4	25
42	10Am40	319,67	-	-	35,52	384,15	122,77	3.4	40
43	20Am25	284,16	-	-	71,04	384,15	122,77	3.9	25
44	20Am40	284,16	-	-	71,04	384,15	122,77	3.9	40
45	30Am25	248,64	-	-	106,56	384,15	122,77	4.5	25
46	30Am40	248,64	-	-	106,56	384,15	122,77	4.5	40

Id = identificação; Mk = metacaulim; Az = Resíduo azul; Ve = Resíduo verde; Am = Resíduo âmbar; SS = silicato de sódio

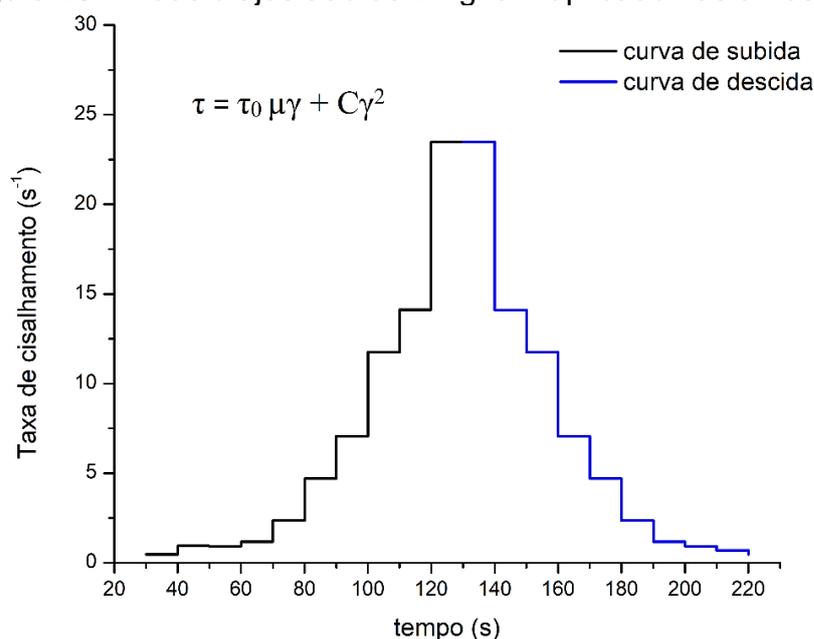
Fonte: A Autora (2025)

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS GEOPOLÍMEROS

4.3.1 Reologia

Os resultados de reologia foram determinados utilizando o modelo ajustado de Bingham, aplicado ao trecho ascendente do gráfico, conforme apresentado na Figura 23.

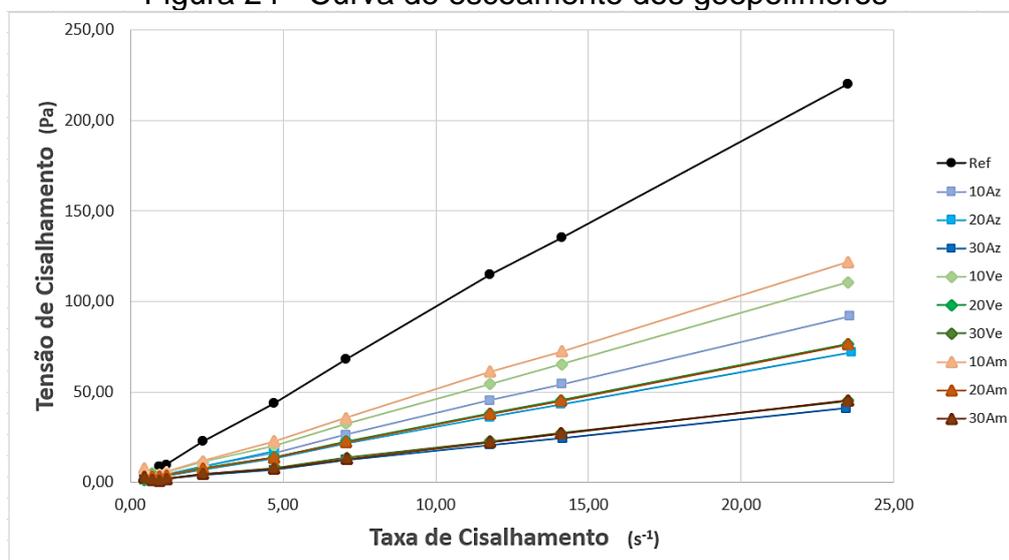
Figura 23 - Modelo ajustado de Bingham aplicado nas amostras



Fonte: A Autora (2025)

Na Figura 23, τ (Pa) representa a tensão de cisalhamento, τ_0 (Pa) é a tensão de escoamento, μ (mPa.s) é a viscosidade plástica, γ (s⁻¹) é a taxa de cisalhamento, e C (Pa.s²) é um coeficiente de segunda ordem ou constante pseudoplástica. A Figura 24 apresenta curvas típicas de fluxo descritas pelo modelo de Bingham, evidenciando a necessidade de superar um valor de tensão residual de cisalhamento para que as amostras geopoliméricas exibam comportamento de fluxo viscoso.

Figura 24 - Curva de escoamento dos geopolímeros

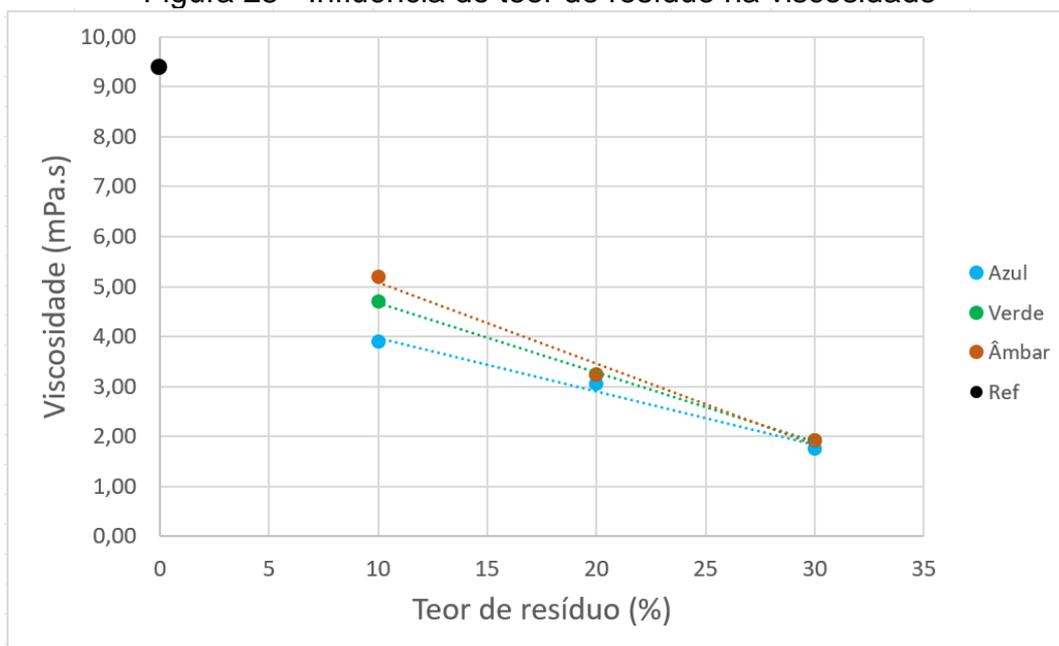


Fonte: A Autora (2025)

Conforme mostrado na Figura 24, todas as amostras contendo resíduo de vidro apresentam menor resistência ao escoamento em comparação com a amostra de referência. As amostras em que parte do metacaulim foi substituída por resíduo de vidro exibem menor resistência, o que é evidenciado pela maior inclinação de suas curvas de escoamento em relação à curva da amostra de referência. Isso indica que uma força menor é necessária para provocar a mesma deformação nas amostras com resíduo de vidro em comparação à amostra de referência.

A substituição parcial do metacaulim por resíduo de vidro *long neck* também influencia a viscosidade dos geopolímeros, conforme ilustrado na Figura 25. Embora não atinjam a viscosidade observada na amostra de referência, as amostras 10Az, 10Ve e 10Am apresentaram as maiores viscosidades entre as que contêm resíduo. Em contrapartida, as amostras 30Az, 30Ve e 30Am exibiram as menores resistências ao escoamento dentre todas as analisadas.

Figura 25 - Influência do teor de resíduo na viscosidade



Fonte: A Autora (2025)

A análise dos três tipos de resíduos, conforme mostrado nas Figuras 24 e 25, revela que as viscosidades das amostras com os resíduos Azul e Verde são bastante semelhantes entre si para cada porcentagem avaliada. Além disso, as amostras Âmbar apresentam as maiores viscosidades para cada porcentagem de substituição.

A variação do comportamento reológico e dos parâmetros de tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade nas amostras produzidas está

associada à alta área superficial por unidade de volume das partículas de metacaulim, conforme evidenciado na análise granulométrica. Esse comportamento também foi confirmado pela análise de partículas no desenvolvimento de materiais sustentáveis realizada por Provis, Duxson e Deventer (2010).

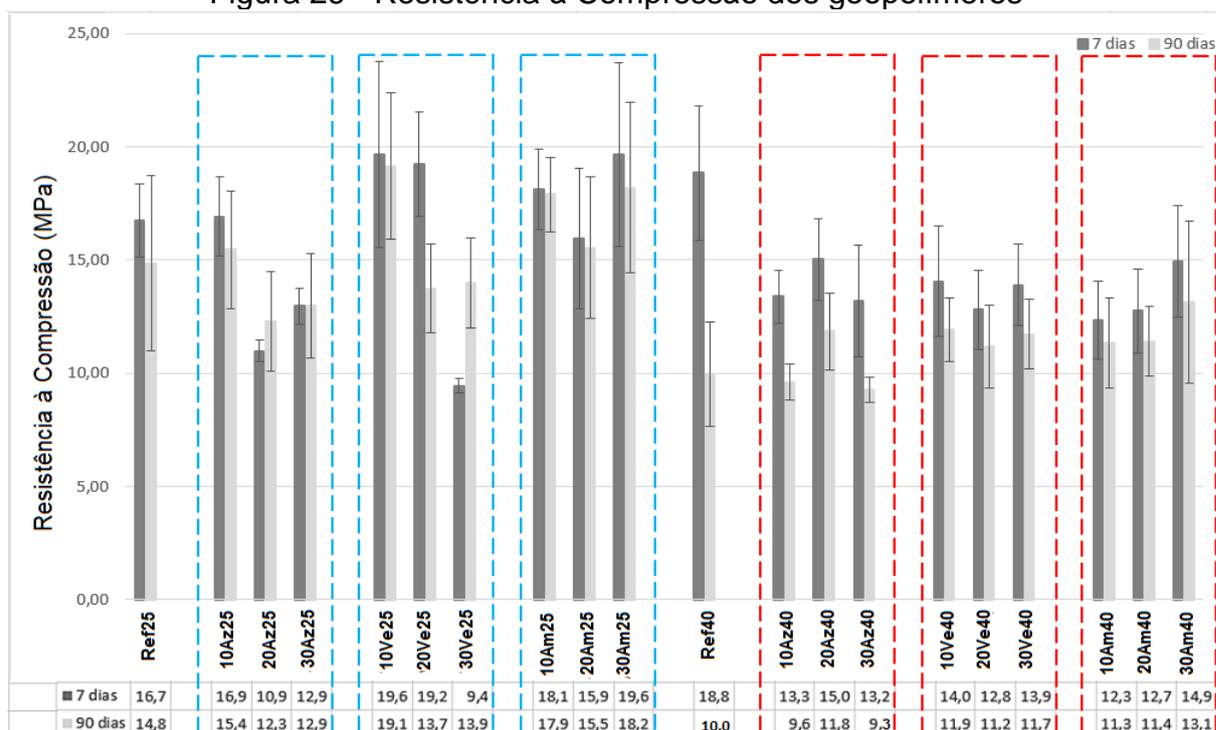
Segundo Han, Yoon e Kim (2019), geopolímeros com partículas de maior superfície específica tendem a apresentar maior viscosidade plástica, como observado nas amostras com 100% de metacaulim. Entretanto, ao substituir 10%, 20% e 30% das partículas de metacaulim por partículas de resíduo de vidro *long neck*, a alta área superficial característica do metacaulim é reduzida, impactando diretamente a viscosidade das amostras Az, Ve e Am, resultando em uma diminuição da viscosidade desses sistemas. Além disso, é provável que o sistema produzido apenas com metacaulim resulta em maior polimerização do que aqueles com resíduos de vidro, o que resulta em uma maior viscosidade plástica para as amostras de referência.

4.3.2 Resistência à Compressão

Conforme mostrado na Figura 26, a resistência à compressão da amostra de referência curada à temperatura ambiente (25 ± 2 °C) atingiu 16,7 MPa aos 7 dias de idade. Aos 90 dias, essa resistência apresentou uma redução de 11,4%, alcançando 14,8 MPa. Por outro lado, a cura a 40 °C elevou a resistência à compressão da amostra em 11,2%, chegando a 18,8 MPa, aos 7 dias. No entanto, aos 90 dias, essa resistência diminuiu significativamente, registrando uma queda de 46,8%, de 18,8 MPa para 10,0 MPa.

O aumento da resistência à compressão nas idades iniciais, devido à elevação da temperatura de cura, pode ser atribuído à maior interação entre os componentes da mistura, ao aumento da cinética reacional e à aceleração dos processos de policondensação e endurecimento, decorrentes da intensificação da dissolução das fases amorfas, conforme observado por Bing-hui *et al.* (2014), ao trabalhar com a variação da temperatura de cura em geopolímeros. No entanto, como relatado por Kong *et al.* (2008), a evaporação mais intensa da água causada pela maior temperatura de cura inicial pode gerar porosidade, o que reduz a resistência à compressão em idades mais avançadas, como observado na amostra Ref40.

Figura 26 - Resistência à Compressão dos geopolímeros



Fonte: A Autora (2025)

Observa-se que a cura a 40 °C também impactou negativamente as amostras contendo resíduos de vidro, pois nenhuma delas ultrapassou 15 MPa de resistência à compressão. Por outro lado, com exceção das amostras 20Az25, 30Az25 e 30Ve25, todas as demais superaram 15 MPa de resistência à compressão, demonstrando um comportamento semelhante ao observado nas amostras de referência.

A comparação entre as amostras com e sem a presença de resíduos de garrafas *long neck* indica que a porcentagem ideal de substituição pelo resíduo é de 10%. Nessa proporção, a resistência à compressão superou a do geopolímero de referência em todas as amostras curadas à temperatura ambiente. Esse resultado é atribuído à influência da substituição do metacaulim pelo resíduo de vidro na relação molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Nos geopolímeros com resíduo de vidro, as relações molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ para 10%, 20% e 30% de substituição foram de 3,4; 3,9 e 4,5, respectivamente. Duxson *et al.* (2007c) relataram que o aumento da relação $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ favorece a resistência à compressão devido à maior formação de ligações Si-O-Si, mais fortes que as ligações Si-O-Al (Bobirica *et al.*, 2015). No entanto, Duxson *et al.* (2007b) também destacaram que relações molares superiores a 3,8 têm um efeito inverso, reduzindo a resistência à compressão, como observado nas amostras com 20% e 30% de resíduos de garrafas *long neck*.

Dentre os três tipos de resíduos de garrafas *long neck* avaliados, o que apresentou melhor desempenho na cura ambiente, para os teores de substituição de 10%, 20% e 30%, foi o resíduo de garrafa âmbar. Aos 90 dias de idade, a resistência à compressão dessas amostras superou os valores obtidos pela amostra de referência. Esse comportamento é atribuído a capacidade do resíduo âmbar de atuar parcialmente na reatividade das reações de geopolimerização e, simultaneamente, agir na densidade de empacotamento das partículas e preencher lacunas da matriz geopolimérica, assim como visto nas características granulométricas desse resíduo.

No caso dos resíduos de garrafas *long neck* azul e verde, os melhores resultados foram observados com a substituição de 10% de metacaulim. Para os teores de 20%, houve uma redução na resistência à compressão de 16,9 % e 7,4 % nas amostras 20Az25 e 20Ve25, respectivamente, em comparação à amostra de referência aos 90 dias de cura. Esses comportamentos são atribuídos a tendência do resíduo azul atuar apenas no preenchimento físico da porosidade da matriz e a disposição do resíduo verde atuar apenas na reatividade das reações químicas, assim como visto nas características granulométricas desses materiais. De acordo com os resultados observados para os geopolímeros com resíduo âmbar, a combinação entre os dois fatores vistos anteriormente cria um sistema ótimo para a produção de geopolímeros com resíduos de vidro provenientes de garrafas *long neck*.

As amostras com resíduo curadas a 40 °C apresentaram valores de resistência à compressão bastante semelhantes, com médias de 13,6 MPa, aos 7 dias, e 11,3 MPa, aos 90 dias de cura. Excetuando-se a amostra de referência, que atingiu 18,8 MPa, aos 7 dias, e sofreu uma redução significativa (quase pela metade), aos 90 dias, nenhuma das demais amostras curadas a 40 °C teve seu valor de resistência à compressão destacado positivamente ou negativamente. Assim, o comparativo entre os três tipos de vidro estudados não revelou diferenças relevantes na resistência à compressão dos geopolímeros sob essas condições de cura.

Uma análise de variância (ANOVA) de fator duplo com repetição, com significância de 1 %, foi realizada com a finalidade de verificar se houve diferença significativa na variação da porcentagem dos resíduos utilizados, nos diferentes tipos de resíduos aplicados e na interação entre esses dois fatores, sob os valores de resistência à compressão obtidos para os geopolímeros. As ANOVAs foram realizadas separadamente para as amostras curadas à temperatura ambiente (25±2 °C), para 7 e 90 dias, e curadas à temperatura aquecida (40 °C), também para 7 e 90 dias.

O resumo dos dados obtidos para as amostras curadas à 25 °C, com 7 dias de cura, pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - ANOVA dos geopolímeros curados à 25°C, aos 7 dias de idade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	139,316	2	69,65802	14,98819	1,838E-05	5,247894
Colunas	138,2274	2	69,1137	14,87107	1,960E-05	5,247894
Interações	321,3277	4	80,33194	17,28488	5,372E-08	3,890308
Dentro	167,311	36	4,647527			
Total	766,1821	44				

SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = médias quadráticas; F = teste de Fischer;
Fonte: A Autora (2025)

A influência da variação do tipo de resíduo (azul, verde e âmbar) é destacada na linha amarela da Tabela 8. É possível perceber que a variação do tipo de resíduo tem influência significativa na resistência à compressão dos geopolímeros, visto que o valor-P é inferior ($1,84 \cdot 10^{-3}$) ao 1 % estabelecido inicialmente. Além disso, $F > F_{crít}$, como visto na Tabela 8. A análise da variação da porcentagem (10, 20, 30 %) é destacada na linha azul. Observa-se o valor-P de $1,96 \cdot 10^{-5}$ e o $F > F_{crít}$, o que significa que a variação da porcentagem adotada também tem influência significativa na resistência à compressão resultante. Além disso, destaca-se (linha verde) que a interação entre o tipo de resíduo e a porcentagem aplicada tem influência significativa na resistência à compressão dos geopolímeros, tendo em vista que $F > F_{crít}$ e o valor-P foi de $5,37 \cdot 10^{-5}$.

O resumo da análise ANOVA para as amostras curadas à 25 °C, com ruptura aos 90 dias pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - ANOVA dos geopolímeros curados à 25°C, aos 90 dias de idade

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	99,88276	2	49,94138	8,495594	9,50E-04	5,247894
Colunas	103,561	2	51,78049	8,808447	7,69E-04	5,247894
Interações	38,81027	4	9,702567	1,650516	0,182924	3,890308
Dentro	211,6261	36	5,878503			
Total	453,8801	44				

SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = médias quadráticas; F = teste de Fischer;
Fonte: A Autora (2025)

Aos 90 dias de cura, a variação do resíduo utilizado reproduz o comportamento dos 7 dias de idade, de forma a influenciar significativamente na resistência à

compressão do geopolímero. Através da linha amarela destacada na Tabela 9, observa-se que o valor-P é inferior ao 1% preestabelecido ($9,5 \cdot 10^{-2}$). O resultado $F > F_{\text{crít}}$ também corrobora essa informação. Já na linha azul desta mesma Tabela, observa-se a interferência significativa da variação percentual na resistência à compressão do geopolímero, visto que o valor-P foi de $7,7 \cdot 10^{-4}$ e $F > F_{\text{crít}}$. A interação entre a variação do resíduo e a variação do percentual aplicada na produção dos geopolímeros não tem interferência significativa na resistência à compressão obtida, uma vez que $F < F_{\text{crít}}$ e o valor-P ultrapassa 1%, com 18,3% resultante.

As análises realizadas nas amostras curadas à 40 °C, aos 7 e 90 dias de cura, podem ser observadas nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 - ANOVA dos geopolímeros curados à 40°C, aos 7 dias de idade
ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	2,056333	2	1,028167	0,260654	0,771989	5,247894
Colunas	4,291213	2	2,145607	0,543940	0,585152	5,247894
Interações	29,73609	4	7,434023	1,884623	0,134358	3,890308
Dentro	142,0044	36	3,944568			
Total	178,0881	44				

SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = médias quadráticas; F = teste de Fischer;

Fonte: A Autora (2025)

Tabela 11 - ANOVA dos geopolímeros curados à 40°C, aos 90 dias de idade
ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	24,78187	2	12,39094	3,919972	0,028826	5,247894
Colunas	2,320164	2	1,160082	0,367001	0,695371	5,247894
Interações	29,04828	4	7,262069	2,297414	0,077834	3,890308
Dentro	113,7951	36	3,160976			
Total	169,9454	44				

SQ = soma dos quadrados; gl = graus de liberdade; MQ = médias quadráticas; F = teste de Fischer;

Fonte: A Autora (2025)

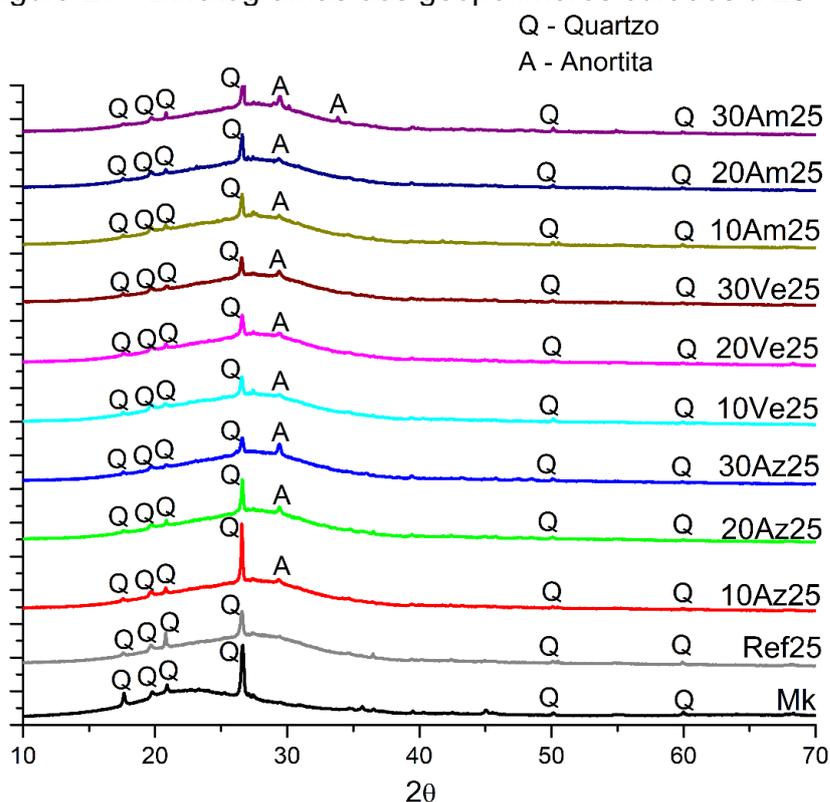
As amostras curadas à 40 °C e rompidas nas idades de 7 e 90 dias não tiveram influência significativa na resistência à compressão para nenhuma variável estudada, seja da variação do resíduo, da sua porcentagem aplicada ou da interação entre estes fatores. Esse comportamento pode ser verificado através dos valores-P das Tabelas 10 e 11, visto que todos eles foram superiores ao nível de significância de 1%. Além disso, todos os valores de F foram inferiores a cada $F_{\text{crítico}}$ calculado.

Através dessas evidências estatísticas, é possível concentrar as análises nas amostras curadas à temperatura ambiente (25 °C), visto que as variações entre os tipos de resíduo e os teores percentuais aplicados tiveram interferência nos resultados de resistência à compressão para as amostras geopoliméricas. Dessa forma, as análises microestruturais contribuirão para a compreensão das propriedades obtidas para cada tipo de geopolímero produzido.

4.3.3 Difração de Raios-X

Os padrões de DRX dos geopolímeros curados à temperatura ambiente (25±2°C) podem ser observados na Figura 27. Para a obtenção dos dados, foram utilizadas cartas cristalográficas indexadas no *The International Centre for Diffraction Data* (ICDD), com referência 00-046-1045 (SiO₂ – Quartzo). Os picos de difração 2θ localizados em 17,66°, 19,78°, 20,92°, 26,64°, 50,16° e 60,00° correspondem ao Quartzo, sendo identificados tanto nos geopolímeros quanto no metacaulim. Isso indica que o Quartzo permaneceu inerte, sem reagir durante a formação dos geopolímeros.

Figura 27 - Difratoogramas dos geopolímeros curados à 25 °C



Fonte: A Autora (2025)

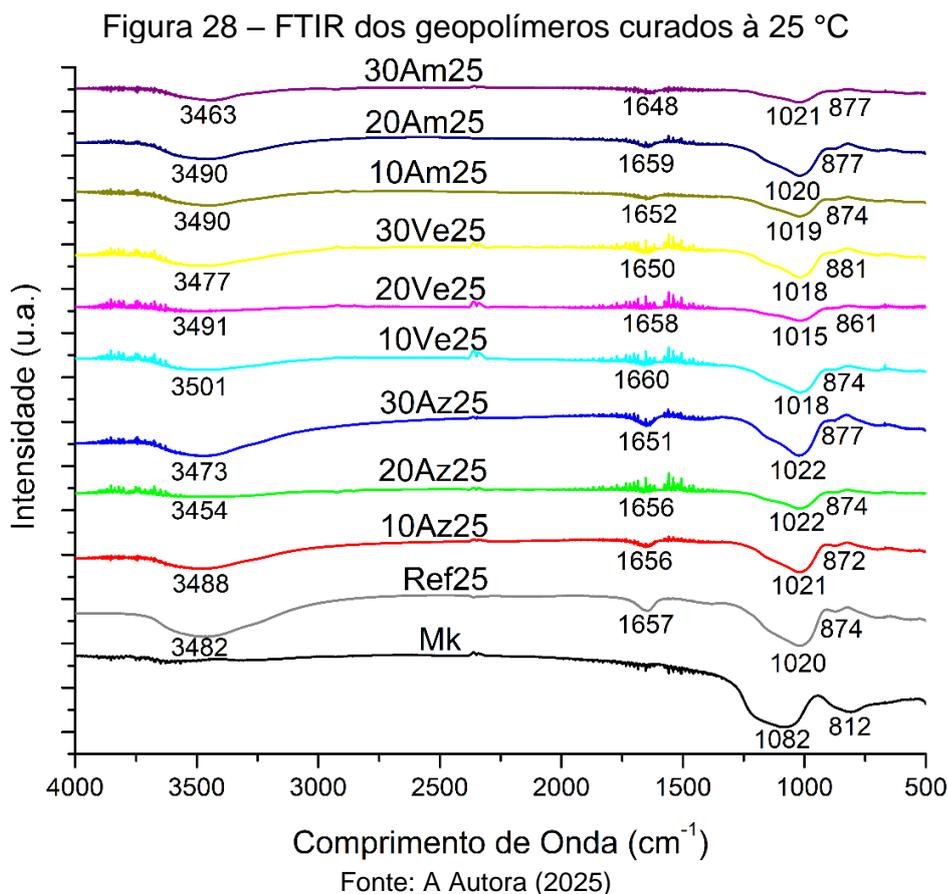
Todas as amostras geopoliméricas exibem um halo característico de uma fase amorfa, situado entre $2\theta = 20^\circ$ e 35° , deslocado em relação ao observado no metacaulim ($2\theta = 15^\circ$ a 30°). Conforme descrito por Provis *et al.* (2005), esse deslocamento está relacionado à formação de novas fases amorfas, evidenciando a ocorrência de reações geopoliméricas.

Foram identificados picos de Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ - *Crystallography Open Database* – COD 96-100-8758) em todas as amostras contendo resíduo de garrafas *long neck*. Esses picos estão associados à formação de um arranjo Ca-poly (dissialato), semelhante à estrutura da anortita, conforme descrito por Davidovits (2017), em seu estudo sobre geopolímeros. A presença de picos de Anortita nos geopolímeros pode ser explicada pelos elevados teores de cálcio detectados nos três tipos de resíduos, conforme apresentado na Tabela 5 e confirmado pela análise de FRX.

A presença de impurezas na composição química das matérias-primas, como os teores de Fe_2O_3 e Co_2O_3 , responsáveis por conferir cor aos resíduos de garrafas *long neck*, pode contribuir para a adição de novas vias de reação no processo de geopolimerização (Duxson *et al.*, 2007a). No entanto, não foram identificadas fases contendo ferro ou cobalto nos difratogramas apresentados na Figura 27. Esse comportamento pode ser explicado pelas baixas concentrações de Fe_2O_3 e Co_2O_3 observadas nos resíduos das garrafas *long neck* azul, verde e âmbar, conforme evidenciado na análise de FRX.

4.3.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As bandas de absorção no infravermelho obtidas para as amostras de geopolímero curados à 25°C podem ser observadas na Figura 28. A banda de absorção do metacaulim também foi inserida para auxiliar na comparação dos dados.



Os picos característicos observados na Figura 28 refletem as ligações químicas presentes dos materiais. O espectro Ref25 exibe um deslocamento do pico principal 1082 cm^{-1} do Mk para 1020 cm^{-1} , que é atribuído a vibrações do alongamento assimétrico Si-O-Si e Si-O-Al (Fernández-Jiménez *et al.*, 2008; Kamseu *et al.*, 2017; Martínez-Martínez *et al.*, 2024). Esse comportamento indica a formação de uma nova matriz de aluminossilicatos amorfos a semicristalinos (Fernández-Jiménez *et al.*, 2008). Nessas bandas, Tchakouté *et al.* (2016) identificaram a formação de um gel resultante do processo de geopolimerização, o que sugere ser a formação dos geopolímeros.

Bandas entre 1015 cm^{-1} e 1022 cm^{-1} foram identificadas nas amostras Az, Ve e Am, evidenciando o processo de geopolimerização, a formação do gel e, conseqüentemente, o desenvolvimento do geopolímero nessas amostras. As bandas Si-O-Si atribuídas aos resíduos de vidro, em torno de 1050 cm^{-1} também foram deslocadas, indicando sua participação na formação dos geopolímeros, assim como detectado por Bobirica *et al.* (2015) em análises semelhantes.

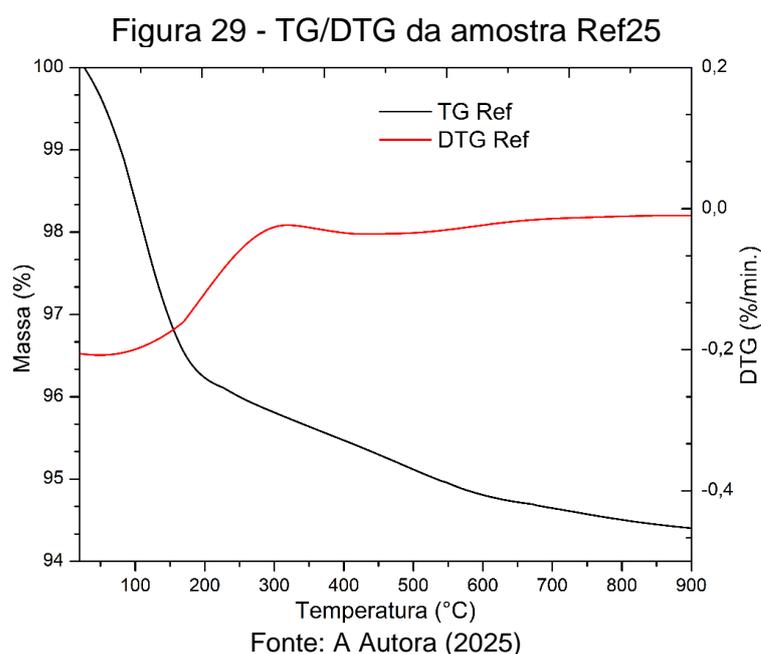
As bandas situadas entre 3450 cm^{-1} e 3500 cm^{-1} , assim como entre 1640 cm^{-1} e 1660 cm^{-1} , são atribuídas às vibrações de O-H, assim como identificadas por Kamseu *et al.* (2017), Liu *et al.* (2016) e Martínez-Martínez *et al.* (2024), em análises de FTIR em geopolímeros. De acordo com Belmokhtar *et al.* (2017), essas vibrações correspondem à água absorvida na superfície ou aprisionada em cavidades, indicando a presença de água na matriz geopolimérica em todas as amostras analisadas.

As bandas observadas entre 860 cm^{-1} e 880 cm^{-1} , nas amostras geopoliméricas, são associadas às vibrações Si-OH (Bakharev, 2005; Kamseu *et al.*, 2017). Segundo Bakharev (2005) e Zhang *et al.* (2016), essas bandas estão relacionadas à dissolução dos géis no processo de formação do geopolímero.

Diante do exposto, destaca-se que todas as amostras com resíduos de vidro realizaram o processo de geopolimerização, assim como as amostras de referência. As bandas de Si-O-Si atribuídas ao metacaulim e aos resíduos de vidro. Além disso, não foram identificadas diferenças nos espectros de FTIR produzidos nas amostras apenas com metacaulim e naquelas com a presença dos resíduos de vidro.

4.3.5 Termogravimetria (TG/DTG)

O resultado da análise de TG/DTG da amostra de referência, curada à temperatura ambiente (25 °C), Ref25, pode ser observada na Figura 29.

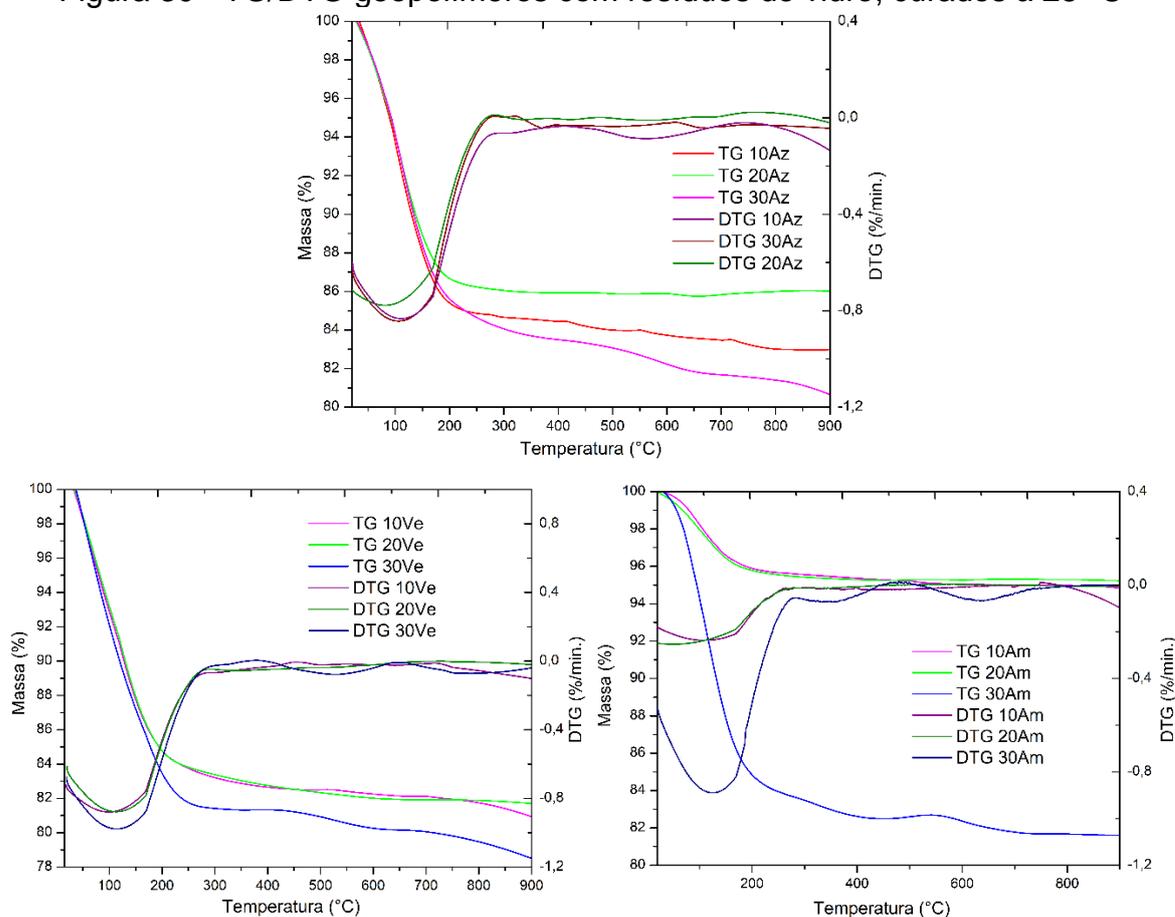


De acordo com a curva preta da Figura 29, ocorre uma perda de massa de 5,59 %, com o aumento da temperatura. Essa perda significativa ocorre até 200 °C e pode ser relacionada à eliminação de água adsorvida (Pulidori *et al.*, 2024). Após essa etapa inicial, a perda de massa é gradual até 900 °C, o que indica a presença de processos térmicos menos intensos.

Já a análise de DTG (curva vermelha) demonstra um pico entre 100 °C e 200 °C, ao qual confirma a eliminação de água adsorvida. Em temperaturas acima de 200 °C, existem flutuações muito pequenas, que indicam que não ocorrem reações significativas que levem a perdas de massa abruptas.

Esse comportamento reflete a estabilidade térmica característica do geopolímero, com uma maior perda de massa concentrada na faixa de temperatura mais baixa. A ausência de picos significativos em temperaturas altas sugere que o geopolímero está bem consolidado, sem resíduos orgânicos significativos ou processos de decomposição importantes em altas temperaturas.

Figura 30 - TG/DTG geopolímeros com resíduos de vidro, curados à 25 °C



Fonte: A Autora (2025)

As curvas de TGAz, TGVe e TGAm mostram uma maior perda de massa inicial até aproximadamente 200 °C, devido a perda de água adsorvida e estrutural da matriz geopolimérica (Pulidori *et al.*, 2024). A redução do teor de massa para as amostras 10Az, 20Az e 30Az foram de 17,19 %, 13,98 % e 19,37 %, respectivamente. Foram observadas perdas de 19,05 %, 18,25 % e 21,25 %, para as amostras 10Ve, 20Ve e 30Ve, respectivamente. E as amostras 10Am, 20Am e 30Am perderam, respectivamente, 5,39 %, 4,76 % e 18,37 %.

As maiores perdas de massa foram observadas para a amostra com 30 % do resíduo de vidro, o que pode ser atribuído ao teor de resíduo em excesso que pode não ter reagido completamente. Após os 200 °C, as curvas TG se tornam mais estáveis, o que indica que a maior parte da perda de massa se deve à eliminação de água (adsorvida e estrutural). As pequenas variações que ocorre acima dos 400 °C ocorrem devido à desidroxilação provenientes da condensação de grupos hidroxilas de frações de silicato e alumina na matriz geopolimérica, assim como detectado por Catauro *et al.* (2020) e por Nergis *et al.* (2020), em estudos anteriores para geopolímeros semelhantes.

Já as curvas de DTG, apresentam picos acentuados entre 100 °C e 200 °C, os quais representam a eliminação de água adsorvida dos geopolímeros. As curvas apresentam pequenas oscilações após os 200 °C, o que indicam possíveis processos de desidroxilação ou perda de componentes menores (Catauro *et al.*, 2020; Nergis *et al.*, 2020). Entretanto, as amostras apresentam estabilidade considerável, com flutuações mínimas na DTG, o que reflete a boa consolidação da matriz geopolimérica.

Em comparação à amostra de referência, Ref25, as amostras Az e Ve apresentam uma maior perda de massa, o que pode indicar que os resíduos de vidro azul e verde aumentam a capacidade de adsorção de água e influenciam na estrutura da matriz. Esse comportamento é atribuído ao fato de que, até os 200 °C, as amostras Az e Ve apresentam uma maior perda de massa e, após os 200 °C, a amostra Ref25 é ligeiramente mais estável, com menor variação de DTG, do que as amostras Az e Ve.

No caso das amostras 10Am e 20Am, as perdas de massa foram similares à amostra Ref25, com valores em torno de 5 %. Esse resultado indica que à consolidação térmica obtida no geopolímero de referência também foi obtida pelas amostras com resíduos de vidro âmbar provenientes de garrafas *long neck*. Esse comportamento observado nas análises de TG/DTG são condizentes com os

resultados obtidos na análise de resistência à compressão das amostras, visto que os melhores resultados alcançados foram para matrizes Am. Destaca-se, todavia, que a amostra 30Am resultou em uma perda de massa semelhantes as amostras Az e Ve, o que fortalece a ideia de que a matriz geopolimérica pode ser mais afetada com maiores proporções de resíduos de vidro *long neck*, inclusive o âmbar.

4.3.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS)

As análises morfológicas para a amostra de referência (Ref25) e para as amostras com resíduos de vidro (10Az, 20Az, 30Az, 10Ve, 20Ve, 30Ve, 10Am, 20Am, 30Am), curadas à 25 °C, podem ser observadas nas Figuras 31 e 32, com aproximações de 500x e 2.000x, respectivamente.

Figura 31 – Análises de MEV (500x) a) Ref25; b) 10Az; c) 20Az; d) 30Az; e) 10Ve; f) 20Ve; g) 30Ve; h) 10Am; i) 20Am; j) 30Am

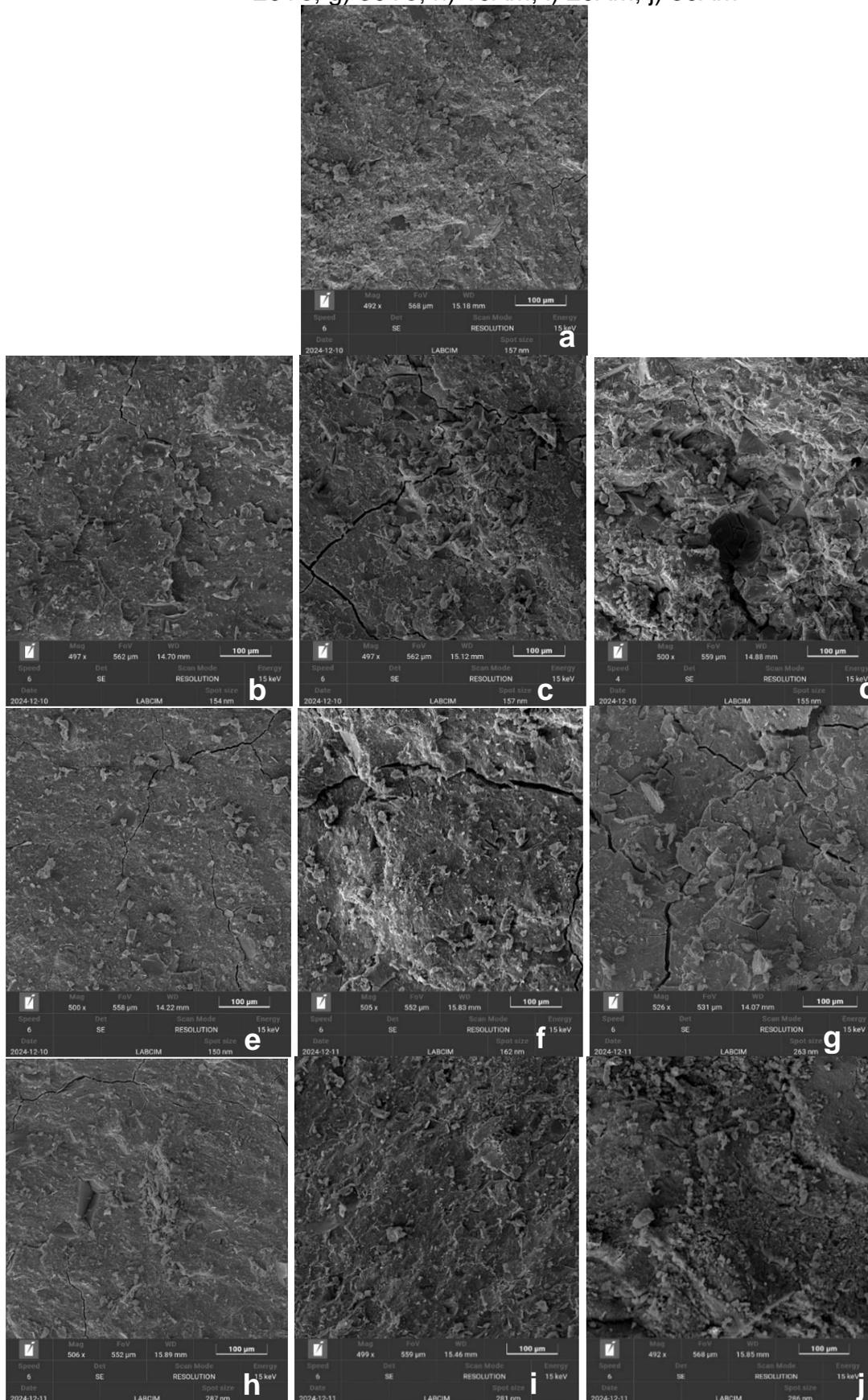
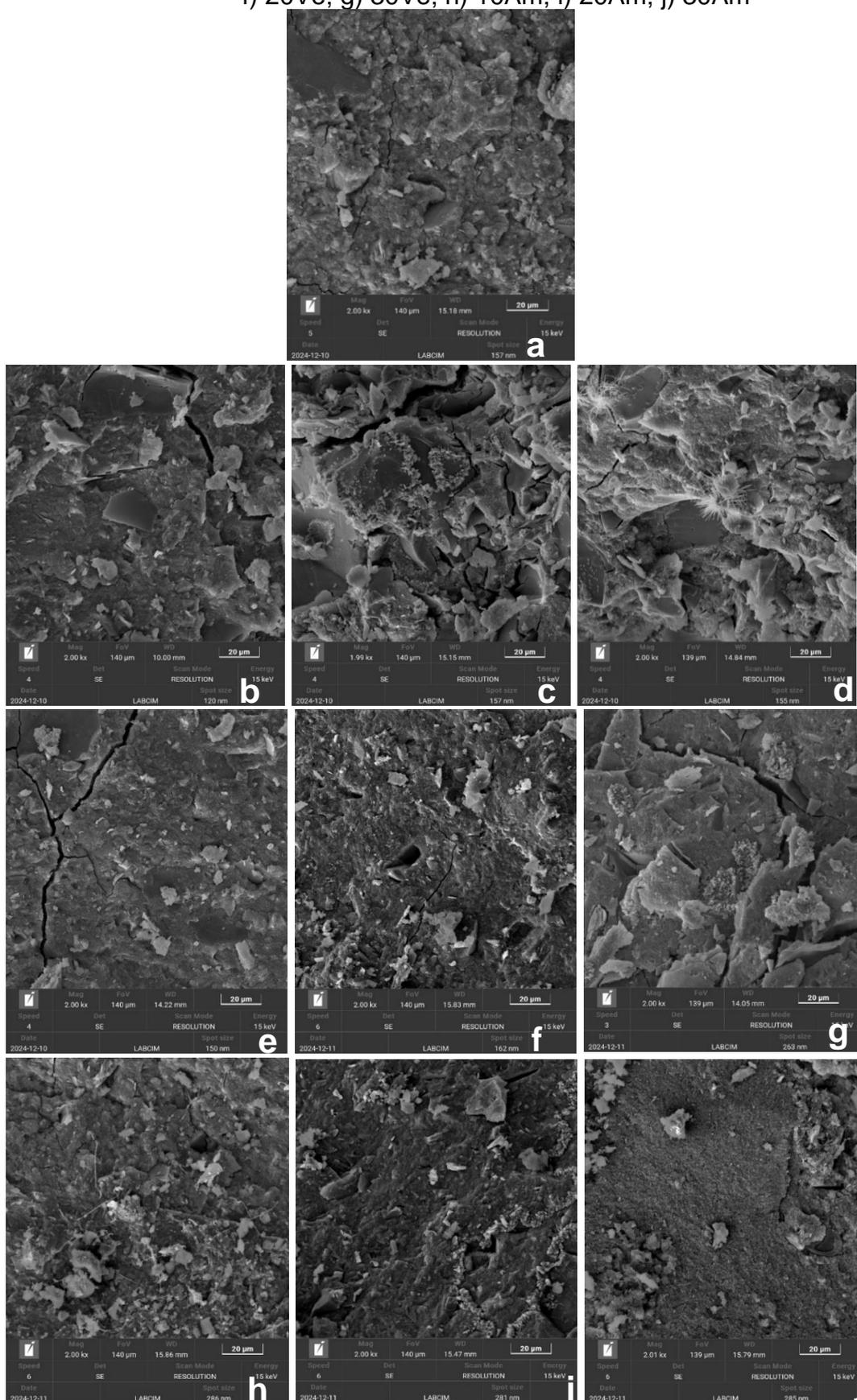
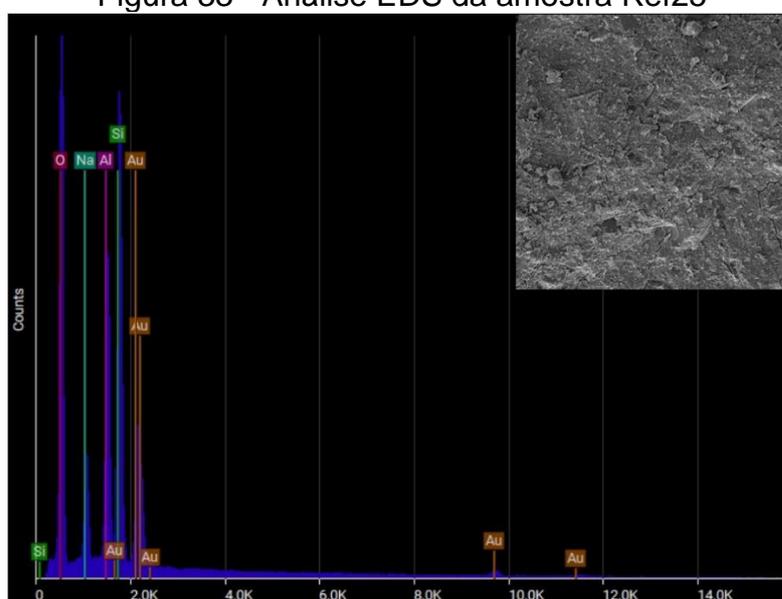


Figura 32 – Análises de MEV (2.000x) a) Ref25; b) 10Az; c) 20Az; d) 30Az; e) 10Ve; f) 20Ve; g) 30Ve; h) 10Am; i) 20Am; j) 30Am



O desenvolvimento das características microestruturais e do desempenho mecânico dos geopolímeros está diretamente relacionado à quantidade de silício solúvel presente na solução ativadora (Duxson *et al.*, 2005). Na Figura 31a, observa-se que a quantidade de silício solúvel no sistema de referência resultou em uma microestrutura predominantemente composta por um ligante uniforme, contendo algumas fissuras e poros de tamanhos micrométricos. Apesar da presença desses poros e fissuras, conforme evidenciado na Figura 32a, a matriz formada é densa e bem consolidada, o que justifica o valor de 14,8 MPa alcançado no ensaio de resistência à compressão.

Figura 33 - Análise EDS da amostra Ref25

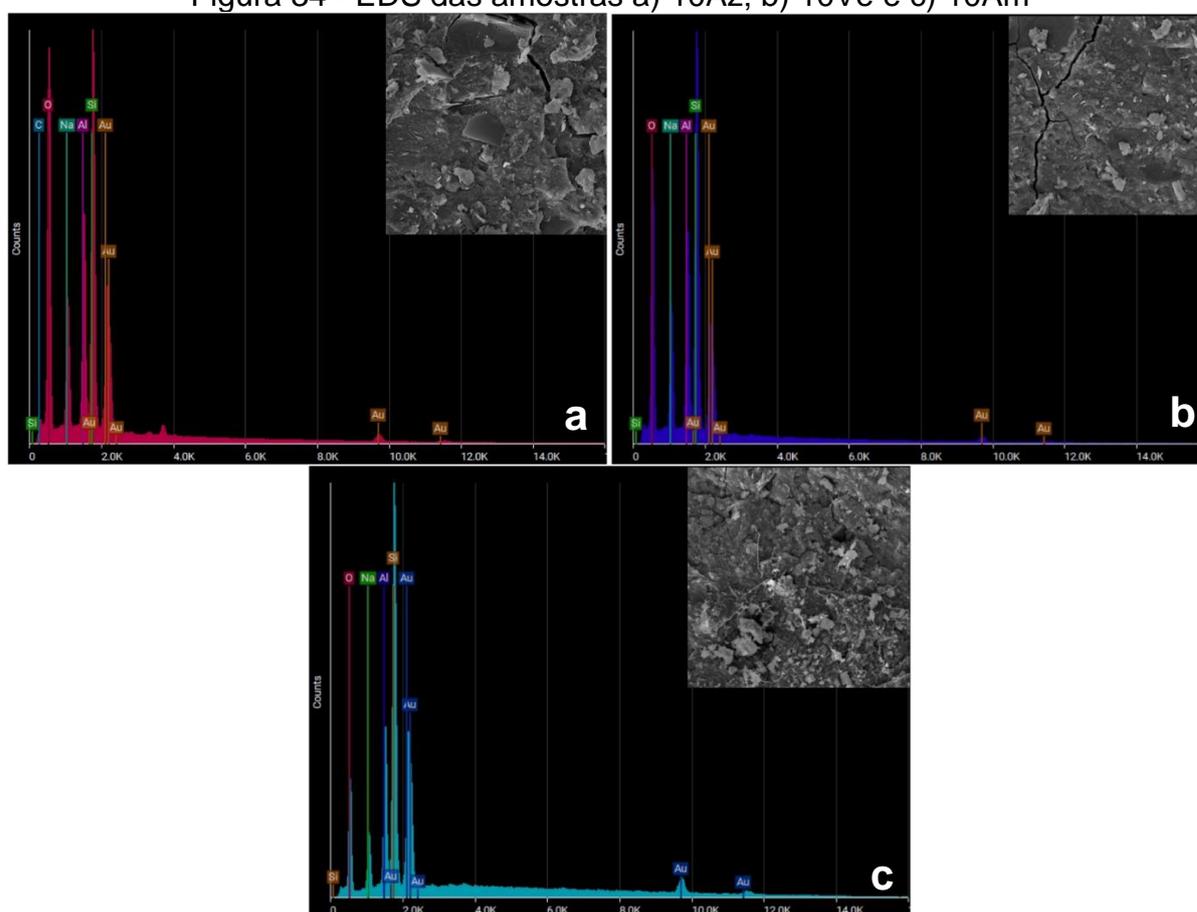


Fonte: A Autora (2025)

A análise de EDS da amostra de referência (Figura 33) confirma que os principais elementos detectados são Si, Al, O e Na, os quais correspondem aos constituintes fundamentais do geopolímero. Os elementos Si, Al e Na indicam a formação da estrutura básica do geopolímero, já que esses componentes são derivados do metacaulim e do silicato de sódio. Além disso, evidenciam que as principais espécies de géis formados consistem em NASH (estrutura tridimensional de sílica e alumina tetraédricas estabilizadas pelo cátion Na^+). Resultados semelhantes foram observados nos estudos de Costa *et al.* (2019) e Fan *et al.* (2023), que analisaram geopolímeros à base de metacaulim.

Nas amostras 10Az, 10Ve e 10Am é possível observar uma matriz semelhante a amostra Ref25, composta pela estrutura de géis de NASH, assim como pode ser observado nas Figuras 31b, 31e e 31h e confirmado pelos elementos observados no EDS da Figura 34. Com a ampliação de 2.000x ressaltada nas Figuras 32b, 32e e 32h, observa-se a presença de microfissuras e de partículas não reagidas de metacaulim e de resíduos de vidro, que se encontram bem conectadas com os componentes de reação final na matriz geopolimérica, o que cria uma microestrutura densa e compacta. Esse comportamento é refletido nos valores de resistência à compressão obtidos por estas amostras.

Figura 34 - EDS das amostras a) 10Az; b) 10Ve e c) 10Am



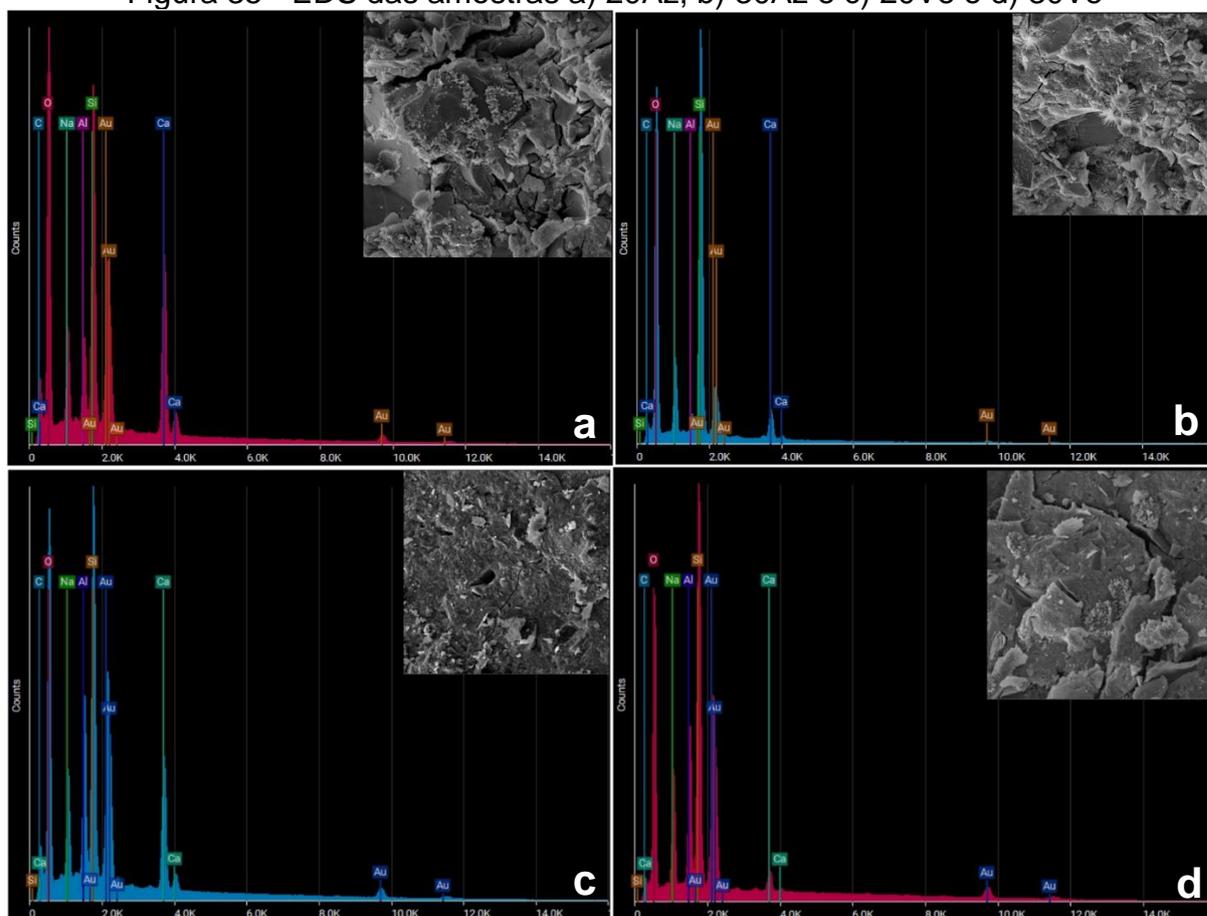
Fonte: A Autora (2025)

Nas Figuras 31c, 31d, 31f e 31g, a matriz geopolimérica composta por NASH e CASH (hidrato de aluminossilicato de cálcio) se mostra presente nas amostras 20Az, 30Az, 20Ve e 30Ve. Além disso, as Figuras 32c, 32d, 32f e 32g evidenciam uma quantidade maior de microfissuras e de partículas não reagidas de metacaulim e de resíduos de vidro, que não parecem bem aderidos a matriz do geopolímero, de forma

contrária ao que acontece nas amostras com 10% de substituição de resíduos de vidro. Essa incidência de partículas não dissolvidas/não reagidas de metacaulim e resíduos de vidro geram menos ligações mecânicas e afetam a densificação da matriz. Além disso, a abundância de partículas de vidro disponibilizada nestes sistemas restringiu o desenvolvimento de componentes de reação final e, conseqüentemente, resultou em microestruturas menos compactas. Essas observações estão de acordo com investigações microestruturais já realizadas anteriormente (Khan, Kuri, Sarker, 2021; Manikandan, Vasugi, 2022; Redden, Neithalath, 2014).

A resistência à compressão foi afetada negativamente nas amostras 20Az, 20Ve, 30Az e 30Ve. Esse fenômeno pode ser associado ao menor teor de alumínio do sistema, com o aumento do percentual de vidro inserido, uma vez que o teor de alumínio contribui para a formação de uma matriz geopolimérica consistente, assim como visto por Khan, Kuri, Sarker (2021), Liu *et al.* (2019) e Manikandan e Vasugi (2022), ao relatarem sobre a microestrutura de geopolímeros.

Figura 35 - EDS das amostras a) 20Az; b) 30Az e c) 20Ve e d) 30Ve

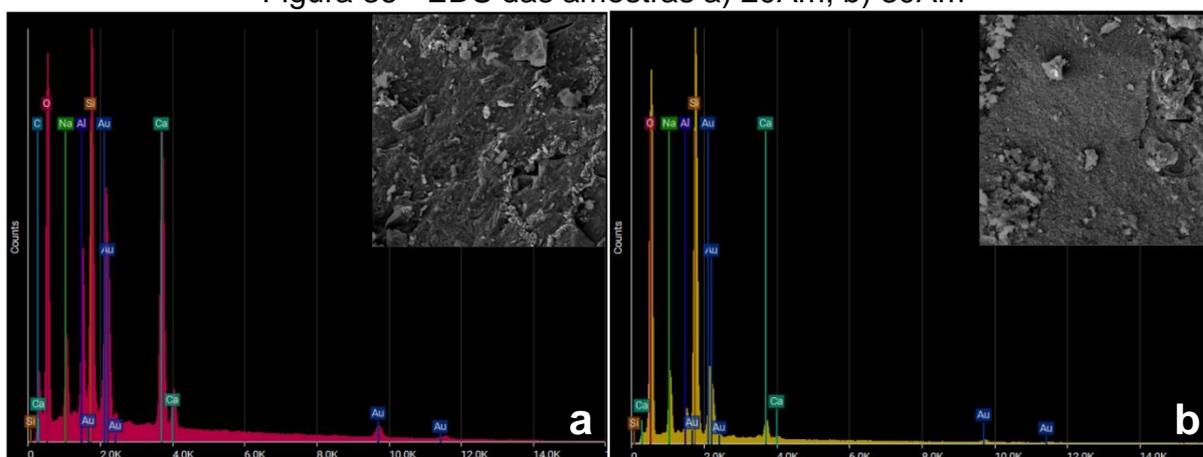


Fonte: A Autora (2025)

A análise de EDS (Figura 35) destaca a presença de sílica, alumínio, oxigênio, sódio e também cálcio, devido a quantidade representativa de Ca presente nos resíduos de vidro. A presença desses elementos nos geopolímeros resulta na formação de ligações Al-O-Si, hidrato de aluminossilicato de sódio (NASH) e géis de hidrato de aluminossilicato de cálcio (CASH), assim como identificado por Ganesh e Muthukannan (2021), Manikandan e Vasugi (2022) e Zhang *et al.* (2017), ao trabalharem com a microestrutura de geopolímeros.

De forma contrária ao que se observa nas amostras Az e Ve, com 20 e 30 % de resíduo, as amostras 20Am e 30Am (Figuras 31i e 31j) apresentam compacidade e densidade representativas. Através das Figuras 32i e 32j é possível observar que as matrizes quase não apresentam fissuras e poros, visto que é perceptível a unificação e regularidade das estruturas. Os elementos identificados na composição dessas matrizes podem ser observados na Figura 36.

Figura 36 - EDS das amostras a) 20Am; b) 30Am



Fonte: A Autora (2025)

A densificação da estrutura e a redução da porosidade e fissuras dos geopolímeros produzidos com resíduos de vidro âmbar pode ser justificada pela presença do íon magnésio neste resíduo e detectado na análise de FRX. Teores de MgO entre 0 e 1 % podem ter efeitos significativos nas propriedades de sistemas com Si, Al, O e Ca, assim como visto por Wang *et al.* (2011) e Qiang *et al.* (2021).

O íon magnésio pode contribuir na dispersão homogênea dos produtos hidratados, o que evita zonas de fraqueza na microestrutura do geopolímero. De acordo com Zhang *et al.* (2022), o Mg^{2+} atua como um modificador de rede, o que torna a matriz geopolimérica mais reativa e facilita as etapas de dissolução e de

formação dos produtos que densificam e diminuem a porosidade e fissuração dos geopolímeros. Para Davidovits (2011), cátions bivalentes, como Mg^{2+} , podem atuar como modificadores da estrutura geopolimérica, alterando a polimerização, a densidade e a reatividade da matriz, dado a sua contribuição à estabilização do estado de oxidação do alumínio. Esse comportamento contribui para uma resistência à compressão maior do que aquelas observadas nas amostras com resíduos de vidro azul e verde.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de ampliar as aplicações de materiais com propriedades plásticas e, simultaneamente, mitigar um problema ambiental criado pela geração de resíduos, este estudo avaliou o uso de três tipos de resíduos de garrafas *long neck* (azul, verde e âmbar), com substituição de 0, 10, 20 e 30%, em peso, de metacaulim para produzir geopolímeros ativados por hidróxido de sódio e silicato de sódio e curados em temperatura ambiente (25 °C) e temperatura térmica (40 °C).

A substituição do metacaulim por resíduos de garrafas *long neck* reduziu a viscosidade plástica do geopolímero, quando comparado à amostra de referência. Esse comportamento é atribuído a maior área específica do metacaulim do que nos resíduos e a polimerização mais representativa nos sistemas de referência do que naqueles com resíduos de vidro. Entre os três resíduos estudados, o resíduo âmbar resultou na maior viscosidade, enquanto os resíduos azul e verde tiveram viscosidades semelhantes entre si.

A substituição de 10% de metacaulim por resíduos *long neck* em geopolímeros curados à temperatura ambiente excedeu os valores de resistência à compressão da amostra de referência, aos 90 dias, em 4,1%, 29,1% e 21,0% para os resíduos *long neck* azul, verde e âmbar, respectivamente.

A cura aquecida afetou a resistência à compressão negativamente para todos os casos, exceto para a amostra de referência, que atingiu 18,8 MPa após 7 dias de cura, mas resultou em uma queda na resistência à compressão de 46,8% aos 90 dias.

Os geopolímeros contendo resíduo âmbar, curados à temperatura ambiente e com 90 dias de idade, apresentaram um aumento na resistência à compressão de 20,9%, 4,7% e 23,0% para as amostras com 10%, 20% e 30% de substituição, respectivamente, em relação à amostra de referência.

A variação do tipo de resíduo e da concentração utilizada não influenciou significativamente a resistência à compressão das amostras curadas a 40 °C, de acordo com a análise estatística realizada.

As amostras curadas à 25 °C indicaram a presença de reações geopoliméricas verificadas no difratograma de Raios-X pela presença do halo amorfo que foi deslocado de $2\theta = 20$ a 35° para $2\theta = 18$ a 30° , o que indica a formação de novas fases amorfas. Picos de Anortita foram identificados nas amostras, os quais se referem à formação de um Ca-poli(di-sialato) nos geopolímeros.

Por meio dos resultados de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), concluiu-se que a presença dos resíduos possibilita a formação da rede geopolimérica das amostras curadas à 25 °C. A formação de novas matrizes de aluminossilicatos amorfos a semicristalinos, que indicam a formação de um gel resultante do processo de geopolimerização, foram identificados devido ao deslocamento do pico principal 1082 cm^{-1} do metacaulim e dos picos em torno de 1050 cm^{-1} dos resíduos de vidro para picos entre 1015 cm^{-1} e 1022 cm^{-1} dos geopolímeros com e sem a presença dos resíduos.

De acordo com as análises termogravimétricas, as maiores perdas de massa foram atribuídas para as amostras com 30 % dos resíduos, o que pode ser atribuído ao teor de resíduo em excesso que pode não ter reagido completamente. Em comparação à amostra de referência, as amostras azul e verde apresentaram perdas de massa em torno de 2 vezes superior para 10, 20 e 30% de substituição. As perdas de massa das amostras 10Am e 20Am foram similares à amostra de referência, o que indica que a consolidação térmica obtida na amostra de referência, também foi alcançada pelos geopolímeros produzidos com o resíduo âmbar.

As análises morfológicas detectaram que, assim como a amostra de referência, as amostras com 10 % de substituição apresentaram matrizes compostas por NASH, com poros e fissuras de escalas micrométricas, de forma a refletir e condizer com a análise de resistência à compressão. As amostras mais afetadas foram àquelas produzidas com 20 e 30 % de resíduos de garrafas *long neck*, fenômeno atribuído ao menor teor de alumínio no sistema, visto que o aumento do percentual de vidro inserido, reduz o teor de alumínio derivado do metacaulim. A microestrutura das amostras com resíduo de vidro âmbar foi a que obteve a maior densificação e menor porosidade entre as matrizes, inclusive para 20 e 30 % de substituição. Esse comportamento é atribuído a presença do magnésio (Mg) presente no resíduo âmbar e detectado no FRX. O Mg^{2+} atua como um modificador de rede, o que torna a matriz geopolimérica mais reativa e facilita as etapas de dissolução e de formação dos produtos que densificam e diminuem a porosidade e fissuração dos geopolímeros.

Em conclusão, a incorporação de resíduos de garrafas *long neck* à matriz geopolimérica cria uma nova alternativa para redução das fontes de emissão de gases do efeito estufa trazidas pelo cimento Portland, reduz o impacto ambiental gerado pelo resíduo de garrafa não retornável, que gera intenso impacto ao meio ambiente e,

simultaneamente, produz um material compatível ou com propriedades até melhores do que os geopolímeros convencionais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. Centro Técnico de Elaboração do Vidro, CETEV, 2000.

AKERMAN, M. **Introdução ao Vidro Plano e sua Produção**. Escola do Vidro, 2013.

ALEEM, M.I.A.; ARUMAIRAJ, P.D..Geopolymer Concrete – A Review. **International Journal of Engineering Sciences e Emerging Technologies**, vol. 1, n 2, p. 118-122, 2012.

ALVARENGA, C.B.C.S; SALES, R.B.C.; CALDAS, R.B.; CELTLIN, P.R.; AGUILAR, M.T.P. Use of glass waste in the production of metakaolin-based geopolymer submitted to room temperature and thermal curing. **Ambiente Construído**, v 22, n 1, p. 147-160, 2022.

ALVES, Lorayne Cristina Da Silva. **Geopolímero à base de metacaulim com adição de fibras de sisal**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

ALVES, O.L.; GIMENEZ, I.F.; MAZALLI, I.O. Vidros. **Cadernos Temáticos – Química Nova na Escola**, v. 1, p. 8-20, 2001.

ANTÔNIO, Aline Pignaton. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo – cálcico na produção de concretos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo.

ANUÁRIO DA RECICLAGEM. Anuário da Reciclagem 2023, **Repositório digital de informações sobre catadores e catadoras**, 2024. Disponível em: <https://anuariodareciclagem.eco.br/>. Acesso em: 31 jul. 2024.

APOLONIO, Priscila Honorio. **Produção De Geopolímeros Usando Cinza De Casca De Arroz Como Fonte Complementar De Sílica**. 2017. Dissertação (Mestrado em Estrutura e Materiais) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

ARAÚJO, E.B. Vidro: Uma Breve História, Técnicas de Caracterização e Aplicações na Tecnologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v 19, p. 325-329, 1997.

ARUP. **Global Change Institute, Brisbane: Australia's first carbon neutral building**. 2015. Disponível em: <https://www.arup.com/projects/global-changeinstitute>. Acesso em: 04 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS (ABRAVIDRO). Panorama Abravidro: O mercado vidreiro em números., **Panorama Abravidro**, 2024. https://abravidro.org.br/wp-content/uploads/2024/05/panorama_abravidro_2024.pdf. Acesso em: 31 jul. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>. Acesso em: 13 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Porque o vidro é a melhor opção para reciclar!** São Paulo, 2021. Disponível em: https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2021/08/E-book_Porque-o-vidro-e-a-melhor-opcao-para-reciclar-1.pdf. Acesso em: 25 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA (CERVBRASIL). **Anuário 2015**. 2015. Disponível em: http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/anuarios/ANUARIO_CB_2015_WEB.pdf. Acesso em: 10 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CERVEJA (CERVBRASIL). **Dados do setor cervejeiro nacional**. 2018. Disponível em: http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/dados-do-setor/. Acesso em: 10 out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE VIDRAÇARIAS (ANAVIDRO). **Quanto tempo o vidro leva para se decompor?** 2020. Disponível em: <https://www.anavidro.com.br/quanto-tempo-o-vidro-leva-para-se-decompor/#:~:text=Vemos%20que%20a%20decomposi%C3%A7%C3%A3o%20total,fabricados%20com%20alum%C3%ADnio%20ou%20pl%C3%A1stico>. Acesso em: 07 out. 2022.

AZEVEDO, A. G. S.; STRECKER, K. Influência da Composição Química das Soluções Alcalinas Ativadoras na Produção de Geopolímeros a Base de Cinza Volante. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v 12, n 1, p. 39–46, 2017.

AZIMI, E.A.; ABDULLAH, M.M.A.B.; MING, L.Y.; YONG, H.C.; HUSSIN, K.; AZIZ, I.H.. Processing And Properties Of Geopolymers As Thermal Insulating Materials: A Review. **Rev. Adv. Mater. Sci.**, n 44, p. 273-285, 2016.

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

BARRETO, Igor Alexandre Rocha. Aplicação De Resíduos Da Mineração De Bauxita Na Síntese De Geopolímeros. 2022. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2022.

BARROS, Marcus Vinícius Cavalcanti. **Desenvolvimento de um sistema misto de pasta à base de geopolímero e cimento Portland para correção de pedra de circulação**. 2013. Dissertação (Mestrado Em Ciência E Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

BARROS, C. **Apostila de vidros**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <https://edificacoes.files.wordpress.com/2011/04/apo-vidros-completa-publicac3a7c3a3o.pdf>. Acesso em: 28 out. 2022.

BELMOKHTAR, N.; AMMARI, M.; BRIGUI, J.; ALLAL, L.B.. Comparison of the microstructure and the compressive strength of two geopolymers derived from Metakaolin and an industrial sludge. **Construction and Building Materials**, v 146, 1p. 621-629, 2017.

BIANCHINI, Mauricio. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

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

BING-HUI, M.; ZHU, H.; CUI, X.-M.; HE, Y.; GONG, S.-Y. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. **Appl. Clay Sci.** n 99, p. 144–148, 2014.

BOBIRICA, C.; SHIM, J.; PYEON, J.; PARK, J. Influence of waste glass on the microstructure and strength of inorganic polymers. **Ceramics International**, v 41, n 10, p. 13638–13649, 2015.

BOSCHI, A.O.; LOT, A. V.; MELCHIADES, F. G.. Efeito Das Características Das Matérias-Primas De Partida No Desempenho De Geopolímeros. Congresso Brasileiro de Cerâmica, 60., 2016, Águas de Lindóia. **Anais [...]**. São Paulo: Águas de Lindóia, 2016.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 1.574, de 11 de julho de 2007**. Proíbe a industrialização e a comercialização de cerveja em garrafa de vidro não retornável. Brasília: Câmara dos Deputados, 2007. Disponível em:

https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra?codteor=482314&filenome=Tramitacao-PL+1574/2007. Acesso em: 10 out. 2022.

BRASIL. Câmara Municipal. **Projeto de Lei nº 4, de 10 de fevereiro de 2012**. Torna obrigatória a coleta e destinação final pelos revendedores de bebidas em embalagens de vidro do tipo long neck. Foz do Iguaçu: Câmara Municipal, 2012. Disponível em: <http://www.cmfi.pr.gov.br/pdf/projetos/1526.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

BRASIL. Câmara Municipal. **Projeto de Lei nº 28, de 21 de fevereiro de 2017**. Dispõe sobre a proibição de os organizadores de eventos artísticos, culturais e desportivos, no âmbito do Município da Serra, efetuarem a venda de bebidas em garrafas de vidro descartáveis, "long neck". Serra: Câmara Municipal, 2017. Disponível em: <http://www3.camaraserra.es.gov.br/Arquivo/Documents/PL/PL282017/9708-12585821032017.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

BRITO, Bruno Rodrigues de. **Efeito da incorporação de vidro de garrafas não retornáveis em matriz cimentícia**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2021.

BURCIAGA-DÍAZ, O.; DURÓN-SIFUENTES, M.; DÍAZ-GUILLÉN, J.A.; ESCALANTE-GARCÍA, J.I. Effect of waste glass incorporation on the properties of geopolymers formulated with low purity Metakaolin. **Cement and Concrete Composites**, v 107, p. 103492, 2020.

CAKMAK, T.; USTABAS, I.; KURT, Z.; YILMAZ, E. Geopolymer mortars having glassy materials considering mechanical and microstructural features. **Journal of Building Engineering**, v 91, p. 109738, 2024.

CARRASCO, Manuel Torres. **Reutilización de residuos vítreos urbanos e industriales en la fabricación de cementos alcalinos. Activación, comportamiento y durabilidad**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Inovação) – Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 2015.

CATAURO, M.; POGGETTO, G.D.; SGARLATA, S.V.C.; PACIFICO, S.; LEONELLI, C. Thermal and microbiological performance of metakaolin-based geopolymers cement with waste glass. **Applied Clay Science**, v 197, p. 105763, 2020.

CHEN, X.; SUTRISNO, A.; ZHU, L.; STRUBLE, L.J. Setting and nanostructural evolution of metakaolin geopolymer. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n 5, 2017.

CIMENTO ITEMBÉ. Água, Cimento Portland e Concreto: por que não se vive sem eles? Curitiba, Paraná, 2019. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/agua-cimento-portland-e-concreto-por-que-nao-se-vive-sem-eles/>. Acesso em: 08 fev. 2023.

COMPANHIA BRASILEIRA DE CRISTAL. **A história do Vidro**. Jacareí, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.cebrace.com.br/area-tecnica/enciclopedia-do-vidro/a-historia-do-vidro/>. Acesso em: 24 out. 2022.

COSTA, K.M.; ALMEIDA, R.C.; MOREIRA, T.A.S. Análise do desempenho mecânico de concretos e argamassas mediante a substituição parcial da massa do agregado miúdo (areia) por vidro moído oriundo de garrafas de cerveja *long neck*. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v 6, 2020.

COSTA, L. M.; ALMEIDA, N. G. S.; SANTOS, F. M. A.; CETLIN, P. R.; AGUILAR, M. T. P. Análise da síntese do gel N-A-S-H em geopolímeros à base de metacaulim por meio de microscopia eletrônica de transmissão. Congresso Brasileiro de Cerâmica, 63., 2019, Bonito. **Anais [...]**. Centro de Convenções de Bonito, 2019.

CHOWDHURY, S.; MOHAPATRA, S.; GAUR, A.; DWIVEDI, G.; SONI, A. Study of various properties of geopolymer concrete – A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 5687–5695, 2021.

CYR, M.; IDIR, R.; POINOT, T. Properties of inorganic polymer (geopolymer) mortars made of glass cullet. **Journal of Materials Science**, v 47, p. 2782-2797, 2012.

DADSETAN, S.; SIAD, H.; LACHEMI, M.; SAHMARAN, M. Extensive evaluation on the effect of glass powder on the rheology, strength, and microstructure of metakaolin-based geopolymer binders. **Construction and Building Materials**, v 268, p. 121168, 2021.

DAMTOFT, J.S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E.M. Sustainable development and climate change initiatives. **Cement and Concrete Research**, v 38, p. 115–127, 2008.

DAVIDOVITS, J..Geopolymers: inorganic polymeric new materials. **Journal of Thermal Analysis**, v. 37, ed. 8, p. 1633-1656, 1991.

DAVIDOVITS, J..Properties of Geopolymer Cements. CONFERENCE ON ALKALINE CEMENTS AND CONCRETES, 1., 1994, Ucrânia. **Anais [...]**. Scientific Research Institute on Binders and Materials, 1994.

DAVIDOVITS, J. 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications – Market Trends and Potential Breakthroughs. GEOPOLYMER 2002 CONFERENCE, 3., 2002, Melbourne. **Anais [...]**. Melbourne: Hotel Sofitel, 2002.

DAVIDOVITS, J.. Conference geopolymer green chemistry and sustainable development solutions, 1., 2005, França. **Anais [...]**. França: Geopolymer Institute, 2005. 1 v.

DAVIDOVITS, J.. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 3^a. ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2011

DAVIDOVITS, J. Geopolymer Cement a review. **Geopolymer Science and Technics**, v 21, p. 2-11, 2013.

DAVIDOVITS, J., Geopolymers: Ceramic-Like Inorganic Polymers, **Journal of Ceramic Science and Technology**, v 8, n 3, p. 335–350, 2017.

DAVIDOVITS, J.. **GP Camp 2014**. Austrália: Geopolymer Institute, 2014. 1 video (1:09:35). Disponível em: <https://www.geopolymer.org/conference/gpcamp/gpcamp-2014/>. Acesso em: 04 out. 2022.

DAVIDOVITS, J. Environmental implications of Geopolymers. **Materials today**. 2015. Disponível em: <https://www.materialstoday.com/polymers-soft-materials/features/environmental-implications-of-geopolymers/>. Acesso em: 06 out. 2022.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 5^a. ed. Saint-Quentin: Geopolymer Institute, 2020.

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

DIFFO B.B.K.; ELIMBIA, A.; CYR, M.; MANGA, J. D.; KOUAMO, H. T.. Effect of the rate of calcination of kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymers. **Journal of Asian Ceramic Societies**, n 3, p. 130-138, 2015.

DIMAS, D.; GIANNOPOULOU, I.; PANIAS, D. Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. **Journal of Materials Science**, v 44, p. 3719–3730, 2009.

DING, Y.; ZHAO, J.; LIU, J-W.; ZHOU, J.; CHENG, L.; ZHAO, J.; SHAO, Z.; IRIS, Ç.; PAN, B.; LI, X.; HU, Z-T. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization. **Journal of Cleaner Production**, v 293, p. 126144, 2021.

DINH, H.L.; LIU, J.; DOH, J.; ONG, D.E.L. Influence of Si/Al molar ratio and ca content on the performance of fly ash-based geopolymer incorporating waste glass and GGBFS. **Construction and Building Materials**, v 411, p. 134741, 2024.

DUXSON, P.; MALLICOAT, S.W.; LUKEY, G.C.; KRIVEN, W.M.; DEVENTER, J.S.J. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of

metakaolin-based geopolymers. **Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp.**, v 292, p. 8–20, 2007c.

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

DUXSON, P.; FORNECE, J.L.; LUKEY, C. C.; MALLICOAT, S. W.; KRIVEN, W. M.; DEVENTER, J.S.J.V. Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. v 269, n 1–3, p. 47-58, 2005.

DUXSON, P.; PROVIS, J.L. Designing Precursors for Geopolymer Cements. **Journal of the American Ceramic Society**, v 91, p. 3864-3869, 2008.

DUXSON, P.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; DEVENTER, J.S.J.V. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. **Cement and Concrete Research**, n 37, p. 1590–1597, 2007b.

ECYCLE. **Sustentabilidade: conceitos, definições e exemplos**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/sustentabilidade/>. Acesso em: 10 fev. 2023.

EDUOK, Ekom Isaac. **Thermal properties of geopolymer materials**. 2016. Dissertação (Mestrado em Matemática e Física) – Universidade de Stavanger, Stavanger, 2016.

EL-NAGGAR, M.; EL-DESSOUKY, M. Re-use of waste glass in improving properties of metakaolin-based geopolymers: Mechanical and microstructure examinations. **Construction and Building Materials**, v 132, p 543-555, 2017.

FAN, J.; YAN, J.; ZHOU, M.; XU, Y.; LU, Y.; DUAN, P.; ZHU, Y.; ZHANG, Z.; LI, W.; WANG, A.; SUN, D. Heavy metals immobilization of ternary geopolymer based on nickel slag, lithium slag and metakaolin. **Journal of Hazardous Materials**, v 453, p.131380, 2023.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; MONZO, M.; VICENT, M.; BARBA, A.; PALOMO, A. Alkaline activation of metakaolin–fly ash mixtures: Obtain of Zeoceramics and Zeocements. **Microporous and Mesoporous Materials**, n 108, p. 41-49, 2008.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PALOMO, A.; CRIADO, M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. **Cement and Concrete Research**, n 35, p. 1204–1209, 2005.

FAN, F.; LIU, Z.; XU, G.; PENG, H.; CAI, C.S. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers, **Construction and Building Materials**, n 160, p. 66-81, 2018.

FERONE C.; LIGUORI B.; CAPASSO I.; COLANGELO F.; CIOFFI R.; CAPPELLETTO E.; DI MAGGIO, R. Thermally treated clay sediments as geopolymer source material. **Applied Clay Science**, n 107, p. 195-204, 2015.

FILHO, J. H.; GOAZI, A.; PEREIRA, E.; QUARCIONI, V.A.; MEDEIROS, M. H.F. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, n 22, v 3, 2017.

FROENER, Muriel Scopel. **Valorização de cinza de fundo por meio da síntese de ligantes geopoliméricos: otimização de traços em pasta e avaliação dos sistemas em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

FUTURARC. **Global Change Institute**. Austrália, 2013. Disponível em: https://blightanner.com.au/wp-content/uploads/2014/11/08.Proj_GCI_1012.pdf. Acesso em: 04 out. 2022.

FUNVERDE. **A poluição causada pelas embalagens long neck e a lei 333/09**. 2009. Disponível em: <https://www.funverde.org.br/blog/a-poluicao-causada-pelas-embalagens-long-neck-e-a-lei-33309/>. Acesso em: 10 out. 2022.

GANESH, A.C.; MUTHUKANNAN, M. Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. **Journal of Cleaner Production**, v 282 p. 124543, 2021.

GAO, K.; LIN, K.; WANG, D.; HWANG, C.; SHIU, H.; CHANG, Y.; CHENG, T. Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v 53, p. 503–510. 2014.

GAO, X.X.; AUTEF, A.; PRUD'HOMME, E.; MICHAUD, P.; JOUSSEIN, E.; ROSSIGNOL, S.. Synthesis of consolidated materials from alkaline solutions and metakaolin: existence of domains in the Al–Si–K/Oternary diagram. **J Sol-Gel Sci Technol**, n 65, p. 220-229, 2013.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaio dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2012. 378 p. ISBN 978-85-216-2067-9.

GARCÍA, M. C. C. I. V. **Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos minerales**. 2013. (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Centro de Investigación em Materiais, Chihuahua, 2013.

GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. **Cement and Concrete Research**, França, ed. 34, p. 1489-1498, 2004.

GARTNER, E.M.; MACPHEE, D.E. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v 41, n 7, J p. 736-749, 2011.

GERALDO, R. H.; FERNANDES, L. F. R.; CAMARINI, G. Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production. **Journal of Cleaner Production**, n 149, p. 146-155, 2017.

GEO-POL. **Geopolímero para principiantes**. São Paulo, 2015.

GEPOLYMER INSTITUTE. **Chemical Structure and Applications**. 5 abril 2006. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/science/chemical-structure-and-applications/>. Acesso em: 04 out. 2022.

GEPOLYMER INSTITUTE. **Chemical Structure and Applications**. 5 abril 2006. 1 Figura. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/science/chemical-structure-and-applications/>. Acesso em: 04 out. 2022.

GEPOLYMER INSTITUTE. **World's first public building with structural Geopolymer Concrete**. 18 out. 2013. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/news/worlds-first-public-building-with-structural-geopolymer-concrete/>. Acesso em: 04 out. 2022.

GEPOLYMER INSTITUTE. **70,000 tonnes Geopolymer Concrete for airport**. 1 out 2014. 1 Fotografia. Disponível em: <https://www.geopolymer.org/news/70000-tonnes-geopolymer-concrete-airport/>. Acesso em: 04 out. 2022.

GOLVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência e Saúde Coletiva**, v 17, n 6, p. 1503-1510, 2012.

GOMES, L.S.; FURTADO, A.C.; SOUZA, M.C. A Sílica e suas Particularidades. **Revista Virtual de Química**, n 4, v 10, p. 000.1-000.22, 2018.

GRANIZO, N.; PALOMO, A.; FERNANDEZ-JIMÉNEZ. Effect of temperature and alkaline concentration on metakaolin leaching kinetics. *Ceramics International*, v 40, p. 8975–8985, 2014.

HAN, D.; YOON, J. Y.; KIM, J. H. Control of Viscosity of Cementitious Materials Using Waste Limestone Powder. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v 13, n 28, 2019.

HE, Jian. **Synthesis and characterization of geopolymers for infrastructural applications**. 2012. Tese (Doutorado em Filosofia) - Universidade Estadual da Louisiana e do Colégio Agrícola e Mecânico, Luisiana, 2012.

HELMENSTINE, A.M. **Colored Glass Chemistry: How Does It Work?** ThoughtCo, 2018. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/the-chemistry-of-colored-glass-602252>. Acesso em: 03 nov. 2022.

HU, S.; ZHONG, L.; YANG, X.; BAI, H.; REN, B.; ZHAO, Y.; ZHANG, W.; JU, X.; WEN, H.; MAO, S.; TAO, R.; LI, C. Synthesis of rare earth tailing-based geopolymer for efficiently immobilizing heavy metals. **Construction and Building Materials**, n 119273, p.1-9 , 2020.

HUSEIEN, G. F.; MIRZA, J.; ISMAIL, M.; GHOSHAL, S.K.; ARIFFIN, M. A. M. Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. **Ain Shams Engineering Journal**, n 9, p. 1557-1566, 2018.

HUSUNG, R.D.; DOREMUS, R.H. The infrared transmission spectra of four silicate glasses before and after exposure to water. **Journal of Materials Research**, v 5, n 10, p. 2209-2217, 1990.

ILKENTAPAR, S.; OZSOY, A. Investigation of mechanical properties, high-temperature resistance and microstructural properties of diatomite-containing geopolymer mortars. **Arabian Journal of Geosciences**, v 15, n 502, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO (IBRACON). Concreto: Material construtivo mais consumido no mundo. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, jan.fev.mar. 2009, n. 53. Disponível em: http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf. Acesso em: 08 fev. 2009.

JAARVELD, J.G.S.V; DEVENTER, J.S.J.V; LORENZENI, L. Factors Affecting the Immobilization of Metals in Geopolymerized Flyash. **Metallurgical and Materials Transactions**, n 29, p. 283-291,1998.

JAARVELD, J.G.S.V; DEVENTER, J.S.J.V; LORENZENI, L. The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metals: part I. Theory and applications. **Minerals Engineering**, vol. 10, n. 7, p. 659-669, 1997.

JAARVELD, Johan G. S. Van. (2000). **The physical and chemical characterisation of fly ash based geopolymers**. 2000. Tese (Doutorado) – Universidade de Melbourne, Melbourne, 2000.

JORGE, N. **Embalagens para alimentos**. 1. ed. São Paulo, 2013. 194 p. ISBN 978-85-7983-394-6.

JUENGER, M.C.G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J.L.; IDEKER, J.H. Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v 41, p. 1232–1243, 2011.

JÚNIOR, Silvano Ferreira de Siqueira. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

KAMSEU, E.; MOUNGAM, L.M.B.; CANNIO, M.; BILLONG, N.; CHAYSUWAN, D.; MELO, U.C.; LEONELLI, C.. Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming. **Journal of Cleaner Production**, n. 142, p. 3050-3060, 2017.

KEN, P.W.; RAMLI, M.; BAN, C.C. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. **Construction and Building Materials**, n 77, p. 370-395, 2015.

KHALE, D.; CHAUDHARY, R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. **J Mater Sci**, n 42, p.729-746, 2007.

KHAN, M.N.N.; KURI, J.C.; SARKER, P.K. Effect of waste glass powder as a partial precursor in ambient cured alkali activated fly ash and fly ash-GGBFS mortars. **Journal of Building Engineering**, v 34, p. 101934, 2021.

KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, n 20, p. 1261-1277, 2007.

KONG, D.L.Y.; SANJAYAN, J.G.; SAGOE-CRENTSIL, K. Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. **J Mater Sci**, n 43, p.824–831, 2008.

LAHOTI, M.; TAN, K. H.; YANG, E. A critical review of geopolymer properties for structural fire-resistance applications. **Construction and Building Materials**, n 221, p. 514–526, 2019.

LEAY, L.; POTTS, A.; DONOCLIFT, T.. Geopolymers from fly ash and their gamma irradiation, **Materials Letters**, n 227, p. 240-242, 2018.

LEMOUGNA, N. P.; WANG, K-T.; TANG, Q.; MELO, U. C.; CUI, X-M. Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. **Ceramics International**, n 42, p. 15142-15159, 2016.

LIU, Y.; SHI, C.; ZHANG, Z.; LI, N. An overview on the reuse of waste glasses in alkali-activated materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v 144, p. 297-309, 2019.

LIU, Y.; YANA, C.; QIUA, X.; LI, D.; WANGA, H.; ALSHAMERI, A.. Preparation of faujasite block from fly ash-based geopolymer via in-situ hydrothermal method. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v 59, p. 433-439, 2016.

LONGHI, Márlon Augusto. **Eflorescência em geopolímeros à base de metacaulim: formação, efeitos e mitigação**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MAJIDI, B. Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. **Materials Technology**, v 24, n 2, p. 79-87, 2009.

MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; VIEIRA, C. M. F. Reaction mechanisms of alkali-activated materials. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v 14, n 3, e 14309, p 1-26, 2021.

MARTINS, Luane Ricarte. **Avaliação do uso de resíduo de borracha moída de pneu como agregado de concreto asfáltico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

MELO, José Roberto de Souza. **A reciclagem de resíduos de cerâmica para utilização no processo de argamassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

MAHMOODI, O; SIAD, H.; LACHEMI, M.; DADSETAN, S.; SAHMARAN. Extensive rheological evaluation of geopolymer mortars incorporating maximum amounts of recycled concrete as precursors and aggregates. **Construction and Building Materials**, v 390, p. 131801, 2023.

MANIKANDAN, P, VASUGI, V. Potential utilization of waste glass powder as a precursor material in synthesizing ecofriendly ternary blended geopolymer matrix. **Journal of Cleaner Production**, v 355, p. 131860, 2022.

MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; BOUGUERMOUH, K.; BOUZIDI, N.; MAHTOUT, L.; SÁNCHEZ-SOTO, P.J.; PÉREZ-VILLAREJO, L. Preparation of Geopolymeric Materials from Industrial Kaolins, with Variable Kaolinite Content and Alkali Silicates Precursors. **Materials**, v 17, e 8, p 1839, 2024.

MITSCHKA, P. Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. **Rheol. Acta**, n 21, p.207- 209, 1982.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL – MDR. **Panorama do Saneamento Básico no Brasil 2021**. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS, Brasília, 2021.

MOBASHER, N.; BERNAL, S.A.; PROVIS, J.L. Structural evolution of an alkali sulfate activated slag cement. **Journal of Nuclear Materials**, n 468, p. 97-104, 2016.

MOYA, D.; ALDÁS, C.; LÓPEZ, G.; KAPARAJU, P. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. **Energy Procedia**, n 134, p. 286–295, 2017.

MUÑOZ-VILLARREAL, M.S.; MANZANO-RAMÍREZ A.; SAMPIERI-BULBARELA, S.; GASCA-TIRADO, J.R.; REYES-ARAIZA J.L.; RUBIO-ÁVALOS J.C.; PÉREZ-BUENO, J.J.; APATIGA, L.M.; ZALDIVAR-CADENA, A.; AMIGÓ-BORRÁS, V. The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer. **Materials Letters**, n 65, p. 995-998, 2011.

NAVARRO, J.M.F. **El Vidro**. 3. ed. Madrid, 2003. 685 p. ISBN 84-00-08158-7.

NAZARI, A.; BAGHERI, A.; RIAHI, S. Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. **Materials Science and Engineering**, n 528, p. 7395-7401, 2011.

NERGIS, D.D.B.; ABDULLAH, M.A.B.; SANDU, A.V.; VIZUREANU, P. XRD and TG-DTA Study of New Alkali Activated Materials Based on Fly Ash with Sand and Glass Powder. **Materials**, v 13, e 2, p. 343, 2020.

NIMWINYA, E.; ARJHARN, W.; HORPIBULSUK, S.; PHOO-NGERNKHAM, T.; POOWANCUM, A. A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash Geopolymer. **Journal of Cleaner Production**, n 119, p. 128-134, 2016.

NOGUEIRA, A.G.; PAULA, J.A.; COELHO, J.A. Incorporação de vidro moído de garrafas long neck ao concreto para a fabricação de *pavers*. Encontro Nacional de

Tecnologia do Ambiente Construído, 9 a 11, 2022, Porto Alegre-Rio Grande do Sul. **Anais** [...]. ANTAC, 2022.

NOVAIS, R.M.; ASCENSÃO, G.; SEABRA, M.P.; LABHINCHA, J.A. Waste glass from end-of-life fluorescent lamps as raw material in geopolymers. **Waste Management**, v 52, p. 245–255, 2016.

OZER, I.; UZUN, S. S. Relations between the structural characteristic sand compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. **Ceramics International**, n 41, p. 10192-10198, 2015.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J.; JALALI, S. Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. **Construction and Building Materials**, v 22, e 7, p. 1305-1314.

PAIVA, Otávio Augusto. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M.W.; BLANCO, M.T. Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. **Cement and Concrete Research**, n 29, p. 1323–1329, 1999.

PALOMO, A.; RUIZ-SANTAQUITERIA, C.; FERNANDEZ-JIMENEZ, A. Cements de bajo impacto ambiental: activación alcalina de aluminosilicatos. Congreso Latino Americano De Patología Y Congreso De Calidad En La Construcción, 10 y 12, 2009, Valparaíso-Chile. **Anais** [...]. Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2009.

PANATO, V.D.; NIEVES, L.J.J.; GURKEWICZ, R.P.; PICCININI, A.C.; PIVA, J. H.; ANTUNES, E.G.P. Estudo de atividade pozolânica da cinza de casca de arroz residual moída em distintos tempos de moagem. **Cerâmica Industrial**, n 28, v 1, ed 122801, 2023.

PASCUAL, A.B.; TOGNONVI, M.T.; TAGNIT-HAMOU, A. Waste glass powder-based alkali-activated mortar. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v 03, n 25, p. 32-36, 2014.

PINTO, A. T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Vila Real, 2006.

PINTO-COELHO, R.M. **Reciclagem e desenvolvimento sustentável no Brasil**. 1. Ed. Belo Horizonte, 2009. 340p. ISBN: 978-85-61502-01-0.

POKORNY, A. **Aditivação por óxidos de agente espumante à base de calcário dolomítico sintético e seu efeito na formação da microestrutura de espumas vítreas a partir de resíduo de vidro sodocálcico**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

POUHET, R.; CYR, M. Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. **Construction and Building Materials**, n 120, p. 150-160, 2016.

PREZA, Carmen Raiza Aires Soares. **Síntese e caracterização de geopolímeros, a partir de argila, caulim ferruginoso e cinzas volantes - classe c**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

PROVIS, J.L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v 114, p. 40-48, 2018.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **The Annual Review of Materials Research**, v 44, p. 3.1-3.29, 2014.

PROVIS, J. L.; DUXSON, P.; DEVENTER, V. J. S. J. The role of particle technology in developing sustainable construction materials. **Advanced Powder Technology**, n 21, p. 2–7, 2010.

PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; DEVENTER, V.J.S.J. Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. **Chem Mater**, n 17, p. 3075–3085, 2005.

PUERTAS, F.; TORRES-CARRASCO, M. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation. *Cement and Concrete Research*, v 57, p. 95–104, 2014.

PULIDORI, E.; PELOSI, C.; FUGAZZOTTO, M.; PIZZIMENTI, S.; CAROSI, M.R.; BERNAZZANI, L.; STROSCIO, A.; TINÉ, M.R.; MAZZOLENI, P.; BARONE, G.; DUCE, C. Thermal behavior of Sicilian clay-based geopolymers. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2024.

QIANG, C.; SU, J.; NIE, J.; LI, H.; HU, Y.; CHEN, Y. LI, R.; DENG, Y. The occurrence of MgO and its influence on properties of clinker and cement: A review. **Construction and Building Materials**, v 293, p. 123494, 2021.

RAMÓN, G.T.J.; RUBIO-ÁVALOS J.C.; MUÑIZ-VILLARREAL, M.S.; MANZANO-RAMÍREZ, A.; REYES-ARAIZA, J.L.; SAMPIERI-BULBARELA, S.; VILLASEÑOR-MORA, C.; PÉREZ-BUENO, J.J.; APATIGA, L.M.; VICENTE, A.B. Effect of porosity on the absorbed, reemitted and transmitted light by a geopolymer metakaolin base. **Materials Letters**, n 65, p. 880-883, 2011.

RAMOS, G.A.; PELISSER, F.; GLEIZE, P.J.; BERNARDIN, A.M.; MICHEL, M.D.. Effect of porcelain tile polishing residue on geopolymer cement. **Journal of Cleaner Production**, n 191, p. 297-303, 2018.

RASHAD, A.M.; BAI, Y.; BASHEER, P.A.M.; COLLIER, N.C.; MILESTONE, N.B.. Chemical and mechanical stability of sodium sulfate activated slag after exposure to elevated temperature. **Cement and Concrete Research**, n 42, p. 333-343, 2012.

RASHAD, A.M.; BAI, Y.; BASHEER, P.A.M.; COLLIER, N.C.; MILESTONE, N.B.; COLLIER, N.C. Hydration and properties of sodium sulfate activated slag. **Cement & Concrete Composites**, n 37, p. 20-29, 2013.

RAVERDY, M.; BRIVOT, F.; PAILLERE, A.M.; DRON, R. Appreciation de l'activite pouzzolanique des constituants secondaires. 7 th International Congress Chemical Cement, v 3, p 36-41, Paris, 1980.

REDDEN. R.; NEITHALATH, N. Microstructure, strength, and moisture stability of alkali activated glass powder-based binders. **Cement and Concrete Composites**, v 45, p. 46-56, 2014.

REN, B.; ZHAO, Y.; BAI, H.; KANG S.; ZHANG, T.; SONG, S. Eco-friendly geopolimer prepared from solid wastes: A critical review. **Chemosphere**, v. 267, p. 1-21, 2021.

RIGHI, D.; KOHLER, L.; KIRCHHOF, L.; LIMA, R. Efeitos da Substituição de Areia por Vidro Moido no Comportamento de Concretos em Elevadas Temperaturas. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v 11, n 2, p. 28-35, 2011.

ROLLIM, Isabelle Vasconcelos. **Avaliação da influência do resíduo de vidro utilizado como agregado miúdo nas propriedades do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2019.

ROY, D. M. Alkali-activated cements opportunities and challenges. **Cement and Concrete Research**, n 29, p. 249-254, 1999.

SAIKIA, B. J.; PARTHASARATHY, G. Fourier Transform Infrared Spectroscopic Characterization of Kaolinite from Assam and Meghalaya, Northeastern India. **Journal of Modern Physics**, n 1, p. 206-210, 2010.

SALES, Fernando Augusto. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento portland**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SANTA, Rozineide Aparecida Antunes Boca. **Síntese de geopolímeros a partir de cinzas pesadas e metacaulim para avaliação das propriedades de**

solidificação/imobilização de resíduos tóxicos. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTANA, C.M.A.; AZEVEDO, C.; LIMA, J.B.O.; MACHADO, L.G.; MANSUR, L.F.; PIRES, E.F.C.; MOUZER, E.C.; SILVA, F. Avaliação da reatividade de rejeitos de caulim para uso como precursor geopolimérico. **Conjecturas**, v 21, n 5, 2021.

SANTOS, Cassiana Mendonça dos. **Estudo de geopolímeros coloridos com níquel, cobre e cobalto pelas técnicas de imersão e reação**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos. **Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição reciclados (RCD-R) em Estruturas de Solo Reforçado**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SARKAR, M.; DANA, K.; SUKHEN DAS. Microstructural and phase evolution in metakaolin geopolymers with different activators and added aluminosilicate fillers. **Journal of Molecular Structure**, n 1098, p. 110-118, 2015.

SCRIVENER, K.L.; JOHN, V.M.; GARTNER, E.M. **Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry United Nations Environment Programme**. Paris, 2017.

SCRIVENER, K.L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and Concrete Research**, v 41, p. 651–665, 2011.

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

SHAYAN, A.; XU, A. Value-added utilisation of waste glass in concrete. **Cement and Concrete**, v 34, p. 81-89, 2004.

SHELBY, J.E. **Introduction to Glass Science and Technology**. 2. ed. New York, USA, 2005. 312 p. ISBN 0-85404-639-9.

SHELBY, J.E.; LACOURSE, W.C.; CLARE, A.G. Engineering Properties of Oxide Glasses and Other Inorganic Glasses. **Engineering Materials Handbook**, v 4, p. 845-857, 1991.

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

SI, R.; DAI, Q.; GUO, S.; WANG, J. Mechanical property, nanopore structure and drying shrinkage of metakaolin-based geopolymer with waste glass powder. **Journal of Cleaner Production**, v 242, p. 118502, 2020.

SILVA, W. L. L.; OLIVEIRA, S. P.; VIANA, R. R. Síntese de zeólita A a partir de uma nova ocorrência de caulim da região de Bom Jardim de Goiás-Go. **Scientia Plena**, vol. 8, n. 11, p. 1-8, 2012.

SILVA, P.; SAGOE-CRENSSTIL, K.; SIRIVIVATNANON, V. Kinetics of geopolymerization: Role of Al_2O_3 and SiO_2 . **Cement and Concrete Research**, n. 37, p. 512-518, 2007.

SILVEIRA, Andressa Rodrigues da. **Desenvolvimento de materiais compósitos geopolímero-zeólita derivados de resíduos industriais para adsorção de CO_2** . 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SILVEIRA, Nathália Cristina Gomes. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro na produção de argamassa**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SKAF, Tatiana Borges. **Influência De Matérias-Primas Na Microestrutura E Resistência De Compósitos Geopoliméricos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008.

SONDH, S.; UPADHYAY, D. S.; PATEL, S.; PATEL, R. N. A strategic review on Municipal Solid Waste (living solid waste) management system focusing on policies, selection criteria and techniques for waste-to-value. **Journal of Cleaner Production**, V 356, p. 131908, 2022.

SUPINO, S.; MALANDRINO, O.; TESTA, M.; SICA, D. Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences. **Journal of Cleaner Production**, v 112, p. 430-442, 2016.

TAKEDA, H.; HASHIMOTO, S.; HONDA, S.; IWAMOTO, Y. The coloring of geopolymers by the addition of copper compounds. **Ceramics International**, Japão, ed. 40, p. 6303-6507, 2014.

TCHAKOUTE, H.K.; RÜSCHER, C.H.; DJOBO, J.N.Y.; KENNE, B.B.D.; NJOPWOUO, D. Influence of giAzsite and quartz in kaolin on the properties of metakaolin-based geopolymer cements. **Applied Clay Science**, n 107, p. 188-94, 2015.

TCHAKOUTÉ, H.K.; RÜSCHER, C.H.; KONG, S.; RANJBAR, N.. Synthesis of sodium waterglass from white rice husk ash as an activator to produce metakaolin based geopolymer cements. **Journal of Building Engineering**, v 6, p. 252-261, 2016.

TIRONI, A.; TREZZA, M. A.; IRASSAR, E. F.; SCIAN, A. N. Thermal of treatment of kaolin: effect on the pozzolanic activity. **Procedia Materials Science**, n 1, p. 343-350, 2012.

TOFFOLI, S. **Estrutura e formação dos vidros**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em:

[http://www.pmt.usp.br/pmt5783/AulaCer%C3%A2mica3\(Vidros\)-2014.pdf](http://www.pmt.usp.br/pmt5783/AulaCer%C3%A2mica3(Vidros)-2014.pdf). Acesso em: 28 out. 2022.

TONIOLO, N.; RINCÓN, A.; ROETHER, J.A.; ERCOLE, P.; BERNARDO, E.; BOCCACCINI, A.R. Extensive reuse of soda-lime waste glass in fly ash-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, n 188, p. 1077-1084, 2018.

TONIOLO, N.; TAVERI, G.; HURLE, K.; ROETHER, J.A.; ERCOLE, P.; DLOUHY, I.; BOCCACCINI, A.R. Fly-Ash-Based Geopolymers: How the Addition of Recycled Glass or Red Mud Waste Influences the Structural and Mechanical Properties. **Journal of Ceramic Science and Technology**, v 8, n 3, p. 411-419, p. 2017.

TORRES, Sara Martins. **Aplicação da Difração de Raios X na Análise do Potencial Pozolânico da Cinza do Bagaço da Cana-De-Açúcar para Adição ao Cimento Portland**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass as a precursor in alkaline activation: Chemical process and hydration products. **Construction and Building Materials**, v 139, p. 342–354, 2017.

TORRES-CARRASCO, M.; PUERTAS, F. Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterization. **Journal of Cleaner Production**, v 90, p. 397-408, 2015.

TORRES-CARRASCO, M.; TOGNONVI, M.T.; TAGNIT-HAMOU, A.; PUERTAS, F. Durability of Alkali-Activated Slag Concretes Prepared Using Waste Glass as Alternative Activator. **Materials Journal**, v 112, p. 791-800, 2015.

TRENTIN, P.O.; MANICA, J.; VANZETTO, S.C.; MARANGONI, B.; ZALESKI, A. Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa. **Revista Matéria**, v 25, n 1, 2020.

TURHAN, Y.; DOGAN, M.; ALKAN, M. Poly (vinyl chloride)/Kaolinite Nanocomposites: Characterization and Thermal and Optical Properties. **Ind. Eng. Chem. Res.**, n 49, p. 1503-1513, 2010.

UNITED NATIONS DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. New York, 2022.

UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries: Cement**. Estados Unidos, 2023.

VASSALO, E.A.S; AGUILAR, M.T.P; GUMIERI, A.G. Caracterização Microestrutural do Geopolímero Obtido de Metacaulim Rico em Ferro. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21., 2014, Cuiabá. **Anais** [...] Universidade Estadual Paulista, 2014.

VOGT, O.; UKRAINCZYK, N.; KOENDERS, E. Effect of Silica Fume on Metakaolin Geopolymers' Sulfuric Acid Resistance. **Materials**, v 14, 2021.

VOLLMANN, Ketlyn. **Obtenção de zeólita 4a a partir de caulim proveniente da região do juazeirinho (paraíba) e aplicação na remoção de arsênio de soluções aquosas**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

WANG, C.; WANG, H.; CHEN, B.; PENG, Y. Study on the engineering Properties and prediction models of na álcali-activad mortar material containing recycled waste glass. **Construction and Building Materials**, v 132, p. 130-141, 2017.

WANG, T.; YAN, L.; RAO, F.; JIANG, K.; BYRYNNAI, C. Effect of chitosan on the mechanical properties and acid resistance of metakaolin-blast furnance slag–based geopolymers. **Environmental Science and Pollution Research**, 2023.

WANG, X.; ZHANG, C.; ZHU, H.; WU, Q. Reaction kinetics and mechanical properties of a mineral-micropowder/metakaolin-based geopolymer. **Ceramics International**, v 48, n 10, p. 14173-14181, 2022.

WANG, C.; ZHOU, Z.; LIU, C.; CHENG, X. Formation Kinetics of Portland Cement Clinker Containing with Magnesium Oxide. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, v 39, n 4, p. 714-717, 2011.

WENG, L.; SAGOE-CRENTSIL, K.; BROWN, T.; SONG, S. Effects of aluminates on the formation of geopolymers. **Materials Science and Engineering: B**, v 117, ed 2, p. 163-168, 2005.

XU, H.; DEVENTER, J.S.J.V. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. **Int. J. Miner. Process**, n 59, p. 247–266, 2000.

XU, Hua. **Geopolimerisation of Aluminosilicate Minerals**. 2002. Tese (Doutorado em Filosofia) – Faculdade de Engenharia, Universidade de Melbourne, Melbourne, 2002.

XU, M.-x.; HE, Y.; WANG, C.-q.; HE, X.-f.; HE, X.-q.; LIU, J.; CUI, X.-m. Preparation and characterization of a self-supporting inorganic membrane based on metakaolinbased geopolymers. **Applied Clay Science**, n 115, p. 254-259, 2015.

YAO, X.; ZHANG, Z.; ZHUA, H.; CHENA, Y. Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. **Thermochimica Acta**, n 493, p. 49-54, 2009.

YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; AL BAKRI, M.M.; HUSSIN, K. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, n 83, p. 595–629, 2016.

ZACHARIASEN, W.H. The Atomic Arrangement in Glass. **Journal of the American Chemical Society**, v 54, p. 3841-3851, 1932.

ZHANG, M.; ZHAO, M.; ZHANG, G.; MANN, D.; LUMSDEN, K.; TAO, M. Durability of red mud-fly ash based geopolymer and leaching behavior of heavy metals in

sulfuric acid solutions and deionized water. **Construction and Building Materials**, n 124, p. 373-382, 2016.

ZHANG, S.; KEULEN, A.; ARBI, K.; YE, G. Waste glass as partial mineral precursor in alkali-activated slag/fly ash system. **Cement and Concrete Research**, v 102, p. 29-40, 2017.

ZHAN, Y.; LIANG, M.; GAN, Y.; ÇOPUROĞLU, O. Effect of MgO content on the quantitative role of hydrotalcite-like phase in a cement-slag system during carbonation. **Cement and Concrete Composites**, v 134 p. 104765, 2022.

ZANOTTO, E.D. Vidros: Arte, Ciência e Tecnologia. **Engenharia de Materiais**, n 1, p. 33-36, 1989.

ZANOTTO, E.D. A santa das vidraças – Mais um mito do vidro. **Revista Pesquisa FAPESP**, e 79, p. 1-5, 2002.

ZANOTTO, E.D.; MAURO, J.C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v 471, p. 490-495, 2017.

ZENG, S.; WANG, J. Characterization of mechanical and electric properties of geopolymers synthesized using four locally available fly ashes. **Construction and Building Materials**, n 121, p.386-399, 2016.

ZHAO, R.; SANJAYAN, J.G. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. **Magazine of Concrete Research**, v 63, n 3, p. 163-173, 2011.

APÊNDICE A – ARTIGO DERIVADO DA TESE

Este artigo foi derivado desta pesquisa e publicado na Revista Matéria, em 2025.

REVISTAMATÉRIA

ISSN 1517-7076 articles e20240628, 2025

V.30

Plastic viscosity, microstructural, and mechanical characteristics of sustainable geopolymers based on metakaolin with the incorporation of long-neck bottles waste glass

Cassiana Mendonça dos Santos¹ , Marcelo Tavares Gomes de Souza¹ ,
Nathalia Bezerra de Lima¹ , Ana Cecília Vieira da Nóbrega² , Érika Pinto Marinho³ 

¹Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-graduação em Ciências de Materiais. Av. Prof. Moraes Rego, 1235, 50670-901, Cidade Universitária, Recife, PE, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campus Universitário, 59078-970, Lagoa Nova, Natal, RN, Brasil.

³Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Av. Marielle Franco, Km 59, 55014-900, Nova Caruaru, Caruaru, PE, Brasil.

e-mail: cassiana.mendonca@ufpe.br, marcelo.gsouza@ufpe.br, nathalia.blima@ufpe.br, ana.cecilia.nobrega@ufrn.br, erika.pmarinho@ufpe.br

ABSTRACT

Long-neck glass bottles are not returned for reuse by the industry, which has generated a large quantity of waste with environmental impacts for current and future generations. The main raw material employed to synthesize geopolymeric materials is metakaolin, although the relationship between silica and alumina content is not ideal. Often, the silicates in the activating solution complement the required SiO₂ content. An eco-efficient option would be to use long-neck bottles as an additional source of silica. This work evaluates plastic viscosity, microstructural, and mechanical characteristics of non-conventional metakaolin geopolymers based on long-neck bottles waste incorporation from the replacement of 0, 10, 20, and 30% of metakaolin with waste from blue, green, and amber long-neck bottles. The best combinations of SiO₂/Al₂O₃, NaOH concentration, and curing temperature were selected to produce geopolymers, which were evaluated through rheology, x-ray diffractometry, and compressive strength. The results indicate a lower flow resistance of geopolymers with residue, in accordance with the increase in the residue content in the system. The occurrence of geopolymerization was observed with and without glass waste, with ambient and thermal curing. The compressive strength, at 90 days of the geopolymers with 10% replacement was higher than the value of the reference sample by 4.1%, 29.1% and 21.0% for the blue, green and amber long neck residues, respectively.

Para conferir o artigo na íntegra:

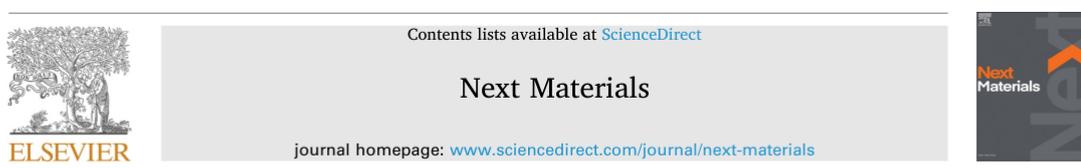
<https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0628>

APÊNDICE B – DEMAIS ARTIGOS PUBLICADOS

No decorrer de todo o doutorado, estudos focados em geopolímeros foram realizados com a finalidade de ampliar o conhecimento sobre a temática. Os resultados dessas pesquisas foram publicados em algumas revistas, como a seguir:

Este artigo tratou de propriedades ópticas, mecânicas e microestruturais de geopolímeros com Ni^{2+} , Cu^{2+} e Co^{2+} e foi publicado na revista Next Materials, em 2025.

Next Materials 6 (2025) 100502



Research article

Effects of Ni^{2+} , Cu^{2+} and Co^{2+} ions on optical, mechanical properties and microstructure of metakaolin based geopolymers

C.M. Santos^{a,*}, M.T.G. Souza^a, M.N.G. Santos^b, N.B. Lima^a, H.C.B. Nascimento^a, J.C.O. Freitas^c, A.C.V. Nóbrega^d, E.P. Marinho^b

^a Programa de Pós-Graduação em Ciências de Materiais, Laboratório de Engenharia Molecular e de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil

^b Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Núcleo de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brazil

^c Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

^d Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Transition metal salts
Pigmentation
Environmental impact
Efflorescence
Dealumination

ABSTRACT

Green and blue geopolymers have been produced in the literature through immersion techniques in metal solutions and reaction in the geopolymer synthesis process. However, there is a lack of information on the behavior of the geopolymer with other transition metals, the understanding of the stabilization phenomena of these metals and the factors that can interfere in the development of optical and mechanical properties and in their microstructure. In this work, metakaolin-based geopolymers were produced by incorporating transition metal salts (Ni^{2+} , Cu^{2+} and Co^{2+}), using reaction and immersion techniques. The immersed samples exhibited vivid pigmentation, but suffered from porous and cracked layers, with poor adhesion, impacting the compressive strength. However, the geopolymer with Cu^{2+} presented a compressive strength 28.65 % higher than the reference sample and a retention of 100 % in the geopolymer matrix. The formation of geopolymers was not affected by the presence of metals and the pigmentation by reaction is safe, however, the metal content should not exceed 0.5 % to maintain the integrity of the microstructure. Ionic immobilization during the reaction prevents adverse environmental impacts, efflorescence and dealumination.

Para conferir o artigo na íntegra:

<https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100502>

Este artigo tratou da estabilização de espumas geopoliméricas com o metassilicato atuando com fonte suplementar de sílica e agente estabilizador. Sua publicação foi na revista *Construction and Building Materials*, em 2023.

Construction and Building Materials 391 (2023) 131907



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat



Use of sodium metasilicate as silica source and stabilizing agent in two-part metakaolin–H₂O₂ geopolymer foams

Maria Natali Gomes dos Santos^a, Cassiana Mendonça dos Santos^a,
Marcelo Tavares Gomes de Souza^a, Elder Alpes de Vasconcelos^b, Ana Cecília Vieira da
Nóbrega^{c,*}, Érika Pinto Marinho^a

^a Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, PPGECAM, Campus do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brazil

^b Laboratório de Física, Núcleo de Tecnologia, Campus do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, Pernambuco, Brazil

^c Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, PPCivAm, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:
Geopolymer
Foams
SiO₂/Al₂O₃
H₂O₂
Pores
3D computed tomography

ABSTRACT

The synergistic effects of the SiO₂/Al₂O₃ ratio (2.0, 2.5, and 3.0) and H₂O₂ content (1.5%, 3.0%, and 6.0%) were evaluated in metakaolin-based geopolymer foams using sodium metasilicate pentahydrate as a complementary silica source. Sodium metasilicate helped to stabilize the pores in foams with SiO₂/Al₂O₃ molar ratios of up to 2.5 cured at 50 °C without stabilizing additives. The optimum porous system for insulation cores was obtained using a SiO₂/Al₂O₃ ratio of 2.5 and H₂O₂ content of 6%. Furthermore, a SiO₂/Al₂O₃ molar ratio of 3.0 reduced pore formation as the increased geopolymerization and viscosity served as a barrier to bubble diffusion.

Para conferir o artigo na íntegra:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131907>