

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO**  
**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU***  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS - PPGCEM**

**JULIANA DA COSTA AGUIAR**

**DESENVOLVIMENTO DE ISOLANTES TÉRMICOS EM FACHADAS VENTILADAS**  
**UTILIZANDO PLACAS CERÂMICAS PRODUZIDAS A PARTIR DE RESÍDUOS**  
**INDUSTRIAIS NA REGIÃO SUL DE SANTA CATARINA**

**CRICIÚMA**

**2026**

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO, INOVAÇÃO E EXTENSÃO  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS - PPGCEM**

**JULIANA DA COSTA AGUIAR**

**DESENVOLVIMENTO DE ISOLANTES TÉRMICOS EM FACHADAS VENTILADAS  
UTILIZANDO PLACAS CERÂMICAS PRODUZIDAS A PARTIR DE RESÍDUOS  
INDUSTRIAIS NA REGIÃO SUL DE SANTA CATARINA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Sabrina Arcaro

Coorientador: Prof. Dr. Oscar R. K. Montedo

**CRICIÚMA**

**2026**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

A282d Aguiar, Juliana da Costa.

Desenvolvimento de isolantes térmicos em fachadas ventiladas utilizando placas cerâmicas produzidas a partir de resíduos industriais na região sul de Santa Catarina / Juliana da Costa Aguiar. - 2026.

133 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2026.

Orientação: Sabrina Arcaro.

Coorientação: Oscar R. K. Montedo.

1. Placa cerâmica - Propriedades mecânicas. 2. Placa cerâmica - Propriedades térmicas. 3. Espuma vítrea. 4. Resíduos industriais. 5. Fachada ventilada.

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Juliana da Costa Aguiar

Desenvolvimento de isolantes térmicos em fachadas ventiladas utilizando placas cerâmicas produzidas a partir de resíduos industriais na região sul de Santa Catarina

Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 19 de fevereiro de 2026.

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Eduardo Junca**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

**Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira**

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

**Prof. Dr. Antônio Pedro Novaes de Oliveira**

Universidade de Federal de Santa Catarina - UFSC

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais  
e ao meu noivo.

## **Agradecimentos**

A Deus, por me conceder saúde, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada, por guiar meus passos, mostrar caminhos que me proporcionaram momentos felizes e ajudar-me a superar os desafios que surgiram.

Agradeço aos meus pais, Moacir e Rosilea, e à minha irmã Susana, por todo apoio, compreensão e pelo incentivo à continuação da minha trajetória acadêmica. Ao meu noivo, Pedro Henrique, pelo companheirismo, carinho e compreensão e por caminhar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço a FAPESC (N.º 3003/2021) a qual foi fundamental para a viabilização deste trabalho.

Expresso minha profunda gratidão à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dra. Sabrina Arcaro, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo, pelo exemplo de dedicação, pela paciência, sabedoria e pelas valiosas orientações ao longo deste percurso.

Agradeço ao PPGCEM e à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), pela infraestrutura, apoio institucional e condições oferecidas para a realização deste estudo. Ao grupo e Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec), agradeço pelo ambiente de aprendizado compartilhado e pelas trocas de conhecimento.

Agradeço também aos laboratórios que colaboraram com a pesquisa: Laboratório de Materiais Vitrocerâmicos (VITROCER) da UFSC, Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Senai e Laboratório de Valorização de Resíduos e Economia Circular (LabV@lor-EC), pelos ensaios realizados.

Aos membros da banca examinadora, pela atenção dedicada à leitura desta dissertação.

À minha amiga Andielle, pela amizade sincera e apoio, por estar presente mesmo à distância e por me ouvir nos momentos de dificuldade.

A todos os professores e funcionários que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta dissertação, meu sincero agradecimento.

**“O tempo linear é uma invenção, o tempo não é linear, é um maravilhoso emaranhado onde, a qualquer instante, podem ser escolhidos pontos e inventadas soluções, sem começo nem fim.”**

**Lina Bo Bardi**

## RESUMO

A incorporação de resíduos sólidos provenientes da construção civil como materiais alternativos pode ser uma estratégia para a redução de impactos ambientais e a agregação de valor a subprodutos industriais. Entre esses resíduos, o vidro apresenta elevado potencial de reaproveitamento, enquanto o resíduo de mármore destaca-se pela capacidade de atuar como agente espumante em matrizes vítreas. Assim, a produção de espumas vítreas representa uma alternativa sustentável para obtenção de materiais leves e porosos com potencial aplicação em sistemas construtivos de melhor desempenho térmico. Embora existam estudos sobre resíduos industriais em placas cerâmicas, ainda são limitadas as pesquisas sobre placas porosas à base de espuma vítrea com foco no desempenho térmico em fachadas ventiladas. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho mecânico e térmico de placas cerâmicas porosas obtidas a partir de espumas vítreas produzidas com resíduos industriais, visando sua aplicação em sistemas de fachada ventilada. Inicialmente, os resíduos de vidro e de mármore foram caracterizados individualmente quanto às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e térmicas. Em seguida, foram desenvolvidas composições contendo diferentes teores de mármore (1 a 15% em massa) incorporados à matriz vítrea. Os materiais foram inicialmente moídos e, posteriormente, adicionou-se 7% em massa de água para a homogeneização da mistura. Após essa etapa, o material foi conformado por prensagem uniaxial a 10 MPa, e os corpos de prova foram queimados a 950 °C por 30 minutos. As espumas vítreas obtidas foram caracterizadas quanto à variação dimensional pós-queima, densidade aparente e real, porosidade total, absorção de água, resistência mecânica à compressão e distribuição do tamanho de poros. Foi selecionada uma composição com base na relação entre porosidade e resistência mecânica, sendo posteriormente destinada à produção de placas cerâmicas porosas para avaliações térmicas. Os resultados apresentaram elevada porosidade, com valores entre 81,50 e 88,96%, densidades aparentes entre 0,26 e 0,45 g/cm<sup>3</sup> e densidades reais entre 2,20 e 2,45 g/cm<sup>3</sup>. A absorção de água variou de ~52 a 72% para corpos inteiros e de 57 a 126% para amostras com corte. Observou-se que o aumento da porosidade pode ser associado à redução da resistência à compressão, com valores variando de 0,21 (1% de resíduo de mármore) a 0,90 MPa (15% de resíduo de mármore), evidenciando a influência da microestrutura porosa no desempenho mecânico das espumas vítreas. Dentre as composições avaliadas, a com 4,5% de resíduo de mármore apresentou a condição experimental mais adequada, por combinar porosidade elevada (88,27%), baixa densidade aparente (0,28 g/cm<sup>3</sup>) e resistência à compressão de 0,42 MPa, valores compatíveis com as faixas reportadas para espumas vítreas comerciais, além de apresentar uma distribuição de poros mais homogênea. Quanto ao comportamento térmico, a placa cerâmica porosa selecionada apresentou condutividade térmica média de 0,054 ± 0,001 W/m·K, valor característico de materiais isolantes e inferior ao obtido para o porcelanato com o resultado médio de 0,201 ± 0,011 W/mK avaliado. Os resultados demonstram que o uso combinado de resíduos de vidro e mármore é viável para a produção de espumas vítreas com propriedades adequadas à fabricação de placas cerâmicas porosas. A composição selecionada apresenta potencial para aplicação como elemento isolante em sistemas de fachada ventilada, contribuindo para a valorização de resíduos e para o desenvolvimento de soluções construtivas mais sustentáveis.

**Palavras-chave:** Fachada ventilada. Espuma de vidro. Cerâmica porosa. Resíduos industriais.

## Abstract

The incorporation of solid waste from civil construction as alternative materials can be a strategy for reducing environmental impacts and adding value to industrial byproducts. Among these wastes, glass presents high potential for reuse, while marble waste stands out for its ability to act as a foaming agent in vitreous matrices. Thus, the production of vitreous foams represents a sustainable alternative for obtaining lightweight and porous materials with potential application in construction systems with better thermal performance. Although there are studies on industrial waste in ceramic tiles, research on porous tiles based on vitreous foam focusing on thermal performance in ventilated facades is still limited. This work aimed to evaluate the mechanical and thermal performance of porous ceramic tiles obtained from vitreous foams produced with industrial waste, aiming at their application in ventilated facade systems. Initially, glass and marble waste were individually characterized in terms of physical, chemical, mineralogical, and thermal properties. Next, compositions containing different marble contents (1 to 15% by mass) incorporated into the vitreous matrix were developed. The materials were initially ground, and then 7% by mass of water was added to homogenize the mixture. After this step, the material was shaped by uniaxial pressing at 10 MPa, and the specimens were fired at 950 °C for 30 minutes. The resulting vitreous foams were characterized in terms of post-firing dimensional variation, apparent and real density, total porosity, water absorption, compressive strength, and pore size distribution. A composition was selected based on the relationship between porosity and mechanical strength, and was subsequently used to produce porous ceramic tiles for thermal evaluations. The results showed high porosity, with values between 81.50 and 88.96%, apparent densities between 0.26 and 0.45 g/cm<sup>3</sup>, and real densities between 2.20 and 2.45 g/cm<sup>3</sup>. Water absorption ranged from ~52 to 72% for whole bodies and from 57 to 126% for cut samples. It was observed that the increase in porosity can be associated with a reduction in compressive strength, with values ranging from 0.21 (1% marble residue) to 0.90 MPa (15% marble residue), highlighting the influence of the porous microstructure on the mechanical performance of the vitreous foams. Among the compositions evaluated, the one with 4.5% marble residue presented the most suitable experimental condition, combining high porosity (88.27%), low apparent density (0.28 g/cm<sup>3</sup>) and compressive strength of 0.42 MPa, values compatible with the ranges reported for commercial vitreous foams, in addition to presenting a more homogeneous pore distribution. Regarding thermal behavior, the selected porous ceramic tile presented an average thermal conductivity of 0.054 ± 0.001 W/m·K, a value characteristic of insulating materials and lower than that obtained for porcelain, with an average result of 0.201 ± 0.011 W/m·K. The results demonstrate that the combined use of glass and marble residues is viable for the production of vitreous foams with properties suitable for the manufacture of porous ceramic tiles. The selected composition shows potential for application as an insulating element in ventilated facade systems, contributing to the valorization of waste and the development of more sustainable construction solutions.

**Keywords:** Ventilated facade. Glass foam. Porous ceramics. Industrial waste.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Distribuição dos materiais recuperados em 2024 pelo sistema de logística reversa de embalagens.....	29
Figura 2: As estratégias de circuito aberto e circuito fechado nas práticas convencionais de reciclagem de vidro.....	33
Figura 3: Bloco de espuma vítrea comercial. ....	35
Figura 4: Influência das composições na formação das espumas vítreas.....	37
Figura 5: Representação esquemática das etapas inicial, intermediária e final da formação de poros. ....	40
Figura 6: Modelo celular de células esféricas de volume constante com pequena sobreposição entre elas. Linhas pontilhadas representam as linhas de simetria. ....	41
Figura 7: Esquema ilustrativo das etapas envolvidas na técnica da réplica para obtenção de espumas cerâmicas.....	43
Figura 8: Sequência de etapas envolvidas no método de <i>gelcasting</i> .....	44
Figura 9: Sistema de Fachada Ventilada.....	57
Figura 10: Componentes da fachada ventilada. ....	58
Figura 11: Fluxograma referente ao procedimento experimental. ....	60
Figura 12: Fotografias mostrando o aspecto morfológico do resíduo de vidro (cacos) como matéria-prima (a) antes e após a moagem (b).....	61
Figura 13: Fotografias mostrando o aspecto morfológico do resíduo de mármore como matéria-prima antes (a) e após a moagem (b). ....	61
Figura 14: Fluxograma das etapas de caracterização das matérias-primas. ....	62
Figura 15: Fluxograma da etapa de caracterização das placas de espumas vítreas. ....	66
Figura 16: Fotografias mostrando as amostras cerâmicas utilizadas nos ensaios de condutividade térmica: (a) placa cerâmica porosa; (b) porcelanato. ....	72
Figura 17: Fotografia mostrando o equipamento Protherm adaptado: câmara quente (a) e câmara fria (b).....	73
Figura 18: Seção para colocação do corpo de prova. ....	74
Figura 19: Difratoograma de raios X (DRX) do resíduo de vidro. ....	79
Figura 20: Difratoograma de raios X (DRX) do resíduo de mármore. ....	80
Figura 21: Distribuição granulométrica do resíduo de vidro. ....	81
Figura 22: Distribuição granulométrica do resíduo de mármore.....	82

Figura 23: DTA diferença de fluxo de calor e TG por variação da massa da amostra do resíduo de vidro.....	84
Figura 24: DTA diferença de fluxo de calor e TG por variação da massa da amostra do resíduo de mármore. ....	85
Figura 25: Curvas de variação dimensional de vidro–mármore (1–15%) por dilatometria óptica. ....	86
Figura 26: Corpos de prova cerâmicos obtidos por prensagem uniaxial. ....	87
Figura 27: Espumas vítreas após queima a 950 °C por 30 min. ....	88
Figura 28: Variação dimensional média dos corpos de prova após o processo de queima.....	90
Figura 29: Influência do teor de mármore na porosidade média das espumas vítreas. ....	93
Figura 30: Amostras de espuma vítrea, inteiras (sem corte) e em seção transversal (com corte), para os diferentes teores: A (1%), B (3%), C (4,5%), D (6%), E (9%), F (12%) e G (15%). ....	94
Figura 31: Resultado da absorção de água das amostras de espuma vítrea em função do teor de mármore.....	95
Figura 32: Imagens das espumas vítreas produzidas com diferentes teores de resíduo de mármore (1–15%).....	97
Figura 33: Histograma da distribuição do tamanho de poros das espumas vítreas com teores de mármore entre 1 e 15%.....	99
Figura 34: Difrátogramas de raios X (DRX) das composições com diferentes teores de resíduo de mármore. ....	100
Figura 35: Resistência à compressão das espumas vítreas em função do teor de mármore.....	101
Figura 36: Comparação de porosidade, densidade aparente e tamanho médio de poros em função do teor de mármore. ....	103
Figura 37: Relação de porosidade em função da resistência à compressão. ....	104
Figura 38: Espumas vítreas produzidos com a composição selecionada (4,5%): (a) a seco; (b) Sinterizado.....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação dos principais tipos de vidro. ....	25
Tabela 2: Espécies químicas (agentes de coloração) utilizados para dar cor aos vidros. ....	26
Tabela 3: Tipos de resíduos de vidro, aplicação original e descrição de cada composição. ....	31
Tabela 4: Características dos sólidos celulares obtidos de técnicas para a produção de espumas vítreas. ....	42
Tabela 5: Propriedades típicas das espumas vítreas comerciais. ....	45
Tabela 6: Comparação entre propriedades de agentes espumantes para produção da espuma vítrea de trabalhos anteriores e atuais. ....	48
Tabela 7: Composição química do resíduo de Mármore Calcinado (% em peso). ....	52
Tabela 8: Propriedades e área de aplicação da espuma vítrea. ....	54
Tabela 9: Composições formuladas com resíduo de vidro plano e mármore. ....	64
Tabela 10: Dimensões iniciais dos corpos de prova. ....	67
Tabela 11: Composição química do resíduo de vidro obtida por fluorescência de raios X (FRX). ....	78
Tabela 12: Densidade real do resíduo de vidro e mármore determinada por picnometria. ....	83
Tabela 13: Valores médios de comprimento, largura e espessura das amostras (1; 3; 4,5; 6; 9; 12 e 15%). ....	89
Tabela 14: Resultados de densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) e de porosidade (%) para teor de mármore. ....	92
Tabela 15: Tamanho médio dos poros em função do teor de mármore. ....	97
Tabela 16: Comparação da condutividade térmica entre porcelanato e cerâmica porosa. ....	106
Tabela 17: Comparação da condutividade térmica de materiais cerâmicos e cimentícios para fachadas. ....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos
- Abs – Absorção de água
- AD – Vidro alumino silicato alcalino-terroso
- a.C. – Antes de Cristo
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- BET – Método Brunauer–Emmett–Teller
- BCC– Bloco cerâmico Celular
- BCS– Bloco cerâmico Celular
- CNQ – Confederação Nacional do Ramo Químico
- CRT – *Cathode Ray Tube* (Tubo de Raios Catódicos)
- D.P. – Desvio padrão
- DRX – Difração de Raios X
- DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura
- DTA – Análise Térmica Diferencial
- $\Delta L$  – Variação linear/dimensional
- EPS – Poliestireno expandido
- FRX – Fluorescência de Raios X
- ISWA – *International Solid Waste Association*
- LCD – *Liquid Crystal Display* (Tela de Cristal Líquido)
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- MEC – Ministério da Educação
- NBR – Norma Brasileira
- NEOPORM® – Marca comercial de espuma vítrea
- P.F. – Perda ao fogo
- PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos
- RCD – Resíduos de Construção e Demolição
- RCC – Resíduos da Construção Civil

RM – Resíduo de mármore

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RV – Resíduo de vidro

SCW – *Silicon Cutting Waste* (Resíduo de corte de silício)

SW – *Stone Waste* (Resíduo de rochas ornamentais)

UV – Radiação ultravioleta

3d – Metais de transição

4f – Metais das terras raras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>22</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	22
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
3.1	VIDROS: DEFINIÇÃO E ASPECTOS GERAIS.....	24
3.1.1	Classificação dos vidros.....	25
3.1.2	Coloração e propriedades ópticas do vidro .....	26
3.1.3	Impactos energéticos e reciclagem do vidro .....	27
3.2	ECONOMIA CIRCULAR DO VIDRO.....	28
3.2.1	Cenário atual da reciclagem no Brasil.....	28
3.2.2	Construção civil e gerenciamento dos resíduos sólidos.....	29
3.2.3	Composição do resíduo de vidro.....	31
3.2.4	Produção e descarte global de vidro .....	32
3.2.5	Estratégias de reciclagem de vidro .....	32
3.2.6	Inovações e políticas para reaproveitamento de resíduos de vidro .....	33
3.3	ESPUMAS VÍTREAS .....	34
3.3.1	Introdução ao uso de espumas vítreas .....	34
3.3.2	Propriedades e aplicações das espumas vítreas .....	35
3.3.3	Influência das composições na formação das espumas vítreas .....	36
3.3.4	Sustentabilidade e competitividade das espumas vítreas .....	37
3.4	PROCESSAMENTO DAS ESPUMAS VÍTREAS .....	39
3.4.1	Histórico e evolução dos métodos de fabricação .....	39
3.4.2	Etapas do processo de produção e formação de poros.....	39
3.4.3	Técnicas de fabricação .....	42
3.4.3.1	Réplica polimérica .....	42
3.4.3.2	<i>Gelcasting</i> .....	43
3.5	PROPRIEDADES DAS ESPUMAS VÍTREAS.....	44
3.5.1	Influência do processamento nas propriedades da espuma vítrea. ....	44
3.5.2	Influência da estrutura porosa nas propriedades da espuma vítrea.....	45
3.5.3	Fatores que influenciam na formação e nas propriedades .....	46
3.5.4	Temperatura no processo de produção de espuma vítrea.....	47
3.5.5	Densidade da espuma vítrea .....	47

3.6	AGENTES ESPUMANTES .....	48
3.6.1	Agentes espumantes utilizados na produção de espumas vítreas.....	48
3.6.2	Tipos de agentes espumantes: REDOX e Neutralização.....	50
3.6.3	Desvantagens e considerações ambientais .....	51
3.6.4	Resíduo de mármore .....	51
3.7	APLICAÇÕES DAS ESPUMAS VÍTREAS .....	53
3.7.1	Vantagens em relação aos materiais tradicionais .....	54
3.7.2	Espumas vítreas na construção civil .....	55
3.7.3	Uso de espumas vítreas no setor cerâmico .....	56
3.8	SISTEMA FACHADA VENTILADA .....	57
3.8.1	Introdução ao Sistema de Fachada Ventilada .....	57
3.8.2	Cerâmicas porosas em sistemas de fachadas ventiladas.....	58
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>60</b>
4.1	MATERIAIS.....	60
4.2	MÉTODOS.....	60
4.2.1	Preparação inicial das matérias-primas .....	61
4.2.2	Caracterização das matérias primas.....	62
4.2.2.1	Caracterização química.....	62
4.2.2.2	Caracterização mineralógica .....	63
4.2.2.3	Distribuição do tamanho de partículas e propriedades físicas dos pós .....	63
4.2.2.4	Comportamento térmico .....	63
4.2.3	Definição e caracterização das composições .....	64
4.2.4	Comportamento térmico das composições .....	64
4.2.5	Conformação e queima.....	65
4.2.6	Caracterização das espumas vítreas .....	66
4.2.6.1	Variação dimensional pós-queima.....	66
4.2.6.2	Ensaio de densidade e porosidade .....	68
4.2.6.3	Ensaio de absorção de água.....	69
4.2.6.4	Tamanho e distribuição de poros .....	69
4.2.6.5	Caracterização mineralógica .....	70
4.2.6.6	Comportamento mecânico das placas de espumas vítreas .....	70
4.2.7	Definição da melhor condição experimental.....	71
4.2.7.1	Comportamento térmico .....	72
4.2.7.1.1	Ensaio de condutividade térmica.....	72

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>77</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	77
5.1.1	Caracterização química .....	77
5.1.2	Caracterização mineralógica.....	79
5.1.3	Distribuição do tamanho de partículas e propriedades físicas dos pós.....	80
5.1.4	Comportamento térmico dos resíduos .....	83
5.1.5	Comportamento térmico das composições .....	85
5.2	ANÁLISE VISUAL .....	87
5.3	CARACTERIZAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS .....	89
5.3.1	Variação dimensional pós-queima .....	89
5.3.2	Porosidade.....	91
5.3.3	Absorção de água.....	94
5.3.4	Tamanho e distribuição dos poros .....	96
5.3.5	Caracterização mineralógica das espumas vítreas.....	100
5.3.6	Comportamento mecânico das espumas vítreas .....	101
5.4	DEFINIÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL .....	102
5.4.1	Ensaio condutividade térmica .....	105
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil está passando por uma transformação significativa, impulsionada pela adoção de tecnologias inovadoras no desenvolvimento de sistemas construtivos mais sustentáveis. Com o crescimento do setor industrial, a geração de resíduos aumentou substancialmente, exigindo soluções que não apenas otimizem os processos produtivos, mas também enfrentem os desafios ambientais (Guedes *et al.*, 2024). A reciclagem, nesse contexto, tem se tornado uma questão ambiental prioritária, estimulada pela crescente escassez de recursos naturais e pelo aumento expressivo de resíduos sólidos industriais. A economia circular apresenta-se como uma alternativa ao modelo linear de produção, baseado na lógica extrair–produzir–descartar, ao promover a reintegração de materiais no ciclo produtivo e a redução do desperdício. Assim, a reutilização e o aproveitamento de resíduos ganham destaque, trazendo benefícios econômicos e ambientais (Cramer, 2022; Silva; Sauka, 2024).

A região Sul do Brasil gerou mais de 6,5 milhões de toneladas de resíduos da construção civil em 2024, e Santa Catarina ainda enfrenta desafios na gestão de resíduos sólidos industriais, com grande parte destinada a aterros sanitários (Carraro; Hotza, 2025; ABREMA, 2025). Nesse cenário, resíduos como vidro e mármore, presentes em obras e marmorarias do estado, apresentam elevado potencial de reaproveitamento. A indústria de rochas ornamentais, em especial, produz quantidades significativas de pó de mármore durante o beneficiamento e a laminação de blocos, material que ainda é majoritariamente descartado (Barreto *et al.*, 2020).

O vidro destaca-se entre os resíduos sólidos como um material de grande potencial para a reciclagem, embora ainda no Brasil seja pouco explorado. Uma das principais formas de reciclá-lo é utilizá-lo como matéria-prima na fabricação de novos produtos. Essa prática oferece vantagens significativas, especialmente em termos de economia de energia e de matéria-prima para os produtores e fabricantes. A fabricação de vidro a partir de matérias-primas virgens requer temperaturas muito elevadas, o que resulta em elevado consumo de energia. A adição de apenas 10 % em peso de caco de vidro à mistura pode reduzir a demanda energética do processo de fusão em aproximadamente 2,5–3 % (Jost *et al.*, 2025). Por outro lado, o uso de vidro reciclado permite economizar energia e recursos naturais, além de contribuir para a diminuição das emissões de carbono (Melo *et al.*, 2023). O uso de vidro

reciclado também contribui para a redução de impactos ambientais, diminuindo as emissões de poluentes no ar em 20% e na água em cerca de 50% (Assis, 2006).

Um produto que pode agregar valor ao resíduo de vidro são as espumas vítreas, que são valorizadas por algumas de suas propriedades, como a baixa densidade, principalmente por ser um eficiente isolante térmico. As espumas vítreas são majoritariamente utilizadas como isolantes térmicos, devido às suas baixas densidades, baixa condutividade térmica, resistência ao congelamento, atóxicos, não inflamabilidade e inércia química. A fabricação de espumas vítreas por diferentes métodos, proporcionam flexibilidade na obtenção com diferentes propriedades no produto final, como porosidade, tamanho de poros e resistência mecânica, permitindo sua aplicação em diversos setores industriais. Entre as diferentes rotas de produção de vidro, os métodos baseados em sinterização são predominantes. Essa abordagem normalmente envolve a mistura de pós de vidro com um agente expensor que se decompõe termicamente para liberar gás, formando bolhas dentro da matriz vítrea amolecida. Durante o resfriamento, essas bolhas originam uma rede de células poliédricas, que podem ser interconectadas (porosidade aberta) ou separadas por paredes vítreas (porosidade fechada). Estruturas com poros abertos são adequadas apenas para aplicações acústicas na construção civil, enquanto a espuma vítrea de porosidade fechada é utilizada como isolante térmico (Pokorny; Vicenzi; Pérez Bergmann, 2011).

No setor cerâmico, a utilização de matérias-primas alternativas vem ganhando aceitação no mercado, devido principalmente à preocupação com a energia e meio ambiente por este setor (Zeschky *et al.*, 2003). Na literatura, existem diversos estudos com materiais alternativos para aplicação neste tipo de sistema (Pizzatto *et al.*, 2021). A inserção de materiais porosos em sua estrutura é uma alternativa viável para resolver essa relação de super peso resultando na redução direta de matérias primas, diminuindo o custo do sistema, além de ampliar o isolamento térmico e acústico (Gonzenbach *et al.*, 2007).

Nesse contexto, as fachadas ventiladas surgem como uma solução construtiva que se beneficia diretamente do uso de materiais porosos como placas cerâmicas porosas. A fachada ventilada é um sistema de revestimento externo que consiste em camadas sobrepostas na fachada de um edifício, criando um espaço de ventilação entre o revestimento e a parede estrutural. Esse espaço permite a circulação do ar, proporcionando uma série de vantagens em termos de isolamento

térmico, acústico e estética. O sistema se destaca na melhoria de vários critérios de desempenho da edificação, como principais destaca-se a durabilidade, a estanqueidade, a estética e a valorização (Silva *et al.*, 2018).

Atualmente, o porcelanato esmaltado é o revestimento cerâmico utilizado em fachadas ventiladas por apresentar baixa porosidade, baixa absorção de água, alto desempenho mecânico e resistência ao gelo (Guzmán *et al.*, 2016). No entanto, sua elevada densidade e a condutividade térmica relativamente alta impõem limitações à aplicabilidade em sistemas de fachadas ventiladas, especialmente em estruturas que exigem redução de carga ou bom desempenho como isolante térmico. A introdução de porosidade controlada nos materiais cerâmicos emerge como uma solução promissora para mitigar esse desafio. Essa abordagem não apenas reduz significativamente o peso das placas cerâmicas, aliviando a carga sobre os suportes estruturais, mas também promove melhorias no desempenho térmico e acústico das fachadas ventiladas, devido à redução da condutividade térmica e ao aumento da dissipação sonora (Pizzatto *et al.*, 2021). Essas vantagens tornam o desenvolvimento de cerâmicas porosas uma alternativa estratégica para otimizar o desempenho e a sustentabilidade dos sistemas construtivos baseados em fachadas ventiladas.

As cerâmicas porosas, incluindo as vítreas, são materiais relativamente frágeis e de elevada porosidade, que apresentam poros fechados, abertos ou interconectados (Zeschky *et al.*, 2003). Entre os materiais utilizados para a fabricação de materiais porosos, podem ser citados a alumina, mulita, carbetos de silício, zircônia e há também a possibilidade de obtenção de materiais porosos a partir de materiais vítreos (Liu, 1997).

A introdução de placas cerâmicas porosas em sistemas de fachada ventilada surge, portanto, como uma alternativa tecnicamente atrativa, ao possibilitar a redução do peso próprio do revestimento e a melhoria do desempenho térmico do sistema. A utilização de espumas vítreas, pode proporcionar um isolamento térmico de alta eficiência, reduzindo significativamente a transferência de calor entre o interior e o exterior de um edifício. Isso resultaria em ambientes mais confortáveis e diminuiria o consumo de energia para aquecimento e refrigeração (Zhu *et al.*, 2016).

Apesar do avanço no desenvolvimento de espumas vítreas a partir de resíduos industriais, observa-se que a maioria dos estudos concentra-se na produção de blocos ou agregados para isolamento térmico geral, havendo escassez de investigações sistemáticas que correlacionem microestrutura porosa, desempenho

mecânico e condutividade térmica em placas cerâmicas porosas especificamente destinadas à aplicação em sistemas de fachada ventilada. Além disso, são limitados os trabalhos que exploram o uso de resíduo de mármore como agente espumante natural em matrizes vítreas recicladas, considerando simultaneamente requisitos mecânicos, térmicos e de aplicabilidade construtiva.

Neste contexto, este trabalho inova ao propor o desenvolvimento e avaliação de placas porosas obtidas a partir de espumas vítreas fabricadas com resíduos da construção civil, como vidro plano, incorporando mármore como agente espumante. Essa abordagem promove o reaproveitamento de materiais normalmente descartados e também integra os princípios da economia circular ao transformar resíduos em componentes funcionais de alto valor agregado. A escolha do resíduo de mármore como agente gerador de poros se mostra uma alternativa eficiente, devido à sua capacidade de liberar gases durante a queima, promovendo a formação de poros homogêneos na matriz vítrea e reduzindo a dependência de agentes espumantes sintéticos (Almeida *et al.*, 2020) . Além disso, a aplicação das espumas vítreas em fachadas ventiladas explora suas propriedades únicas de isolamento térmico e acústico, configurando uma alternativa sustentável e eficiente aos materiais convencionais. Este estudo busca, portanto, contribuir com soluções tecnológicas para a construção civil, aliando inovação, sustentabilidade e desempenho superior em sistemas de fachadas ventiladas.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho mecânico e térmico de placas cerâmicas porosas obtidas a partir de espuma vítrea produzida com resíduos de vidro e resíduo de mármore como agente porogênico, visando sua aplicação em sistemas de fachada ventilada.

### 2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral da proposta, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar química, mineralógica, granulométrica e termicamente os resíduos de vidro e de mármore utilizados como matérias-primas para a produção das espumas vítreas;
- Desenvolver e processar espumas vítreas com diferentes teores de resíduo de mármore, avaliando sua influência na formação da microestrutura porosa, buscando compreender seu efeito no processo de queima.
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas das espumas vítreas, correlacionando porosidade, densidade e resistência à compressão a fim de compreender o impacto da microestrutura no desempenho estrutural das placas.
- Selecionar a composição mais adequada com base em critérios combinados de desempenho mecânico e estrutural, priorizando equilíbrio entre resistência e porosidade do material.

- Avaliar a condutividade térmica das placas cerâmicas porosas selecionadas e compará-las com materiais cerâmicos convencionais utilizados em sistemas de fachada ventilada, para verificar seu potencial como material isolante térmico.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 VIDROS: DEFINIÇÃO E ASPECTOS GERAIS

O vidro surgiu na Mesopotâmia por volta de 2500 a.C. e se difundiu para o Egito por volta de 1400 a.C., durante o reinado de Akhenaten. No Egito, a técnica se desenvolveu a partir da fabricação de amuletos e utensílios, que foi aprimorado pelos romanos por volta de 100 a.C. A técnica de sopro de vidro que foi desenvolvida no Oriente Próximo após 300 a.C., e posteriormente aprimorada pelos romanos por volta de 100 a.C., permitiu a produção em massa e o surgimento do vidro plano para janelas (Silva; Filgueiras, 2023). Inicialmente considerado frágil e de aplicações limitadas, o vidro evoluiu com os avanços técnicos e tecnológicos, passando a apresentar propriedades como transmissão de luz natural, eficiência energética e contribuição ao conforto térmico (Granqvist *et al.*, 2018). Atualmente, é empregado na fabricação de vidro plano, embalagens, utensílios domésticos e diversos outros produtos. Suas características, como facilidade de moldagem, brilho, resistência à abrasão, segurança e durabilidade, tornaram-no um material muito utilizado (Topçu; Canbaz, 2004).

Ao longo dos anos, diversas definições foram propostas para o vidro, acompanhando a evolução do conhecimento científico. Em 1932, Zachariassen estabeleceu a base estrutural dos vidros, propondo o modelo da rede contínua aleatória (random network), caracterizada pela ausência de simetria e periodicidade de longo alcance, diferentemente dos materiais cristalinos, embora mantendo forças interatômicas comparáveis às do cristal correspondente (Zachariassen, 1932). Em 1933, Tammann descreveu o vidro como "fundidos solidificados e sub-resfriados" (Menzel, 1934).

Posteriormente, Doremus definiu-o como um material que, ao resfriar a partir do estado líquido, torna-se progressivamente rígido com o aumento da viscosidade, sem apresentar uma transição abrupta típica dos cristais (Shackelford; Doremus, 2008). Nesse contexto, destaca-se a importância da temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), que corresponde à faixa de temperatura na qual o material passa do comportamento viscoso para o estado rígido, sem ocorrência de cristalização.

Mari (1982) definiu o vidro como um sólido amorfo obtido pelo resfriamento de uma massa fundida de modo a evitar a cristalização, ressaltando o papel do

resfriamento na estabilização da estrutura desordenada (Mari, 1982). Segundo K. J. Rao (2002), o vidro é um "sólido obtido pelo super-resfriamento de um líquido e que é amorfo aos raios X". Finalmente, em 2013, Ivan S. Gutzow e Juern W. Schmelzer propuseram uma definição mais abrangente: "Vidros são sólidos amorfos termodinamicamente não equilibrados e cineticamente estabilizados, nos quais a desordem molecular e as propriedades termodinâmicas do fundido sub-resfriado são congeladas"(Gutzow; Schmelzer, 2013) . Arun K. Varshneya resumiu com a definição: "Vidro é um sólido com estrutura não cristalina, que se transforma continuamente em líquido quando aquecido" (Varshneya; Mauro, 2019).

### 3.1.1 Classificação dos vidros

Atualmente, existem vários tipos de vidros disponíveis, cada um com uma função específica, o que resulta em composições químicas levemente diferentes. O componente básico do vidro de soda-cal (sódico-cálcico) é a sílica, mas há também vidros baseados em outros compostos, como sulfetos, fluoretos e até ligas metálicas. Entre os diversos tipos, o vidro cálcio se destaca como o mais predominante, representando cerca de 85% da produção global de vidro, devido à sua versatilidade em aplicações como janelas e garrafas. O vidro é classificado em várias categorias, diferenciadas pela sua composição química. A maioria dos vidros disponíveis no mercado se encaixa em uma das categorias listadas na Tabela 1 (Mohajerani *et al.*, 2017; Schmitz *et al.*, 2011).

Tabela 1: Classificação dos principais tipos de vidro.

<b>Tipo de vidro</b>	<b>Características</b>
Soda – Cal	Tipo mais comum de vidro produzido. Utilizado na fabricação de produtos como embalagens, janelas e itens que não necessitam de grande resistência química e/ou ao calor.
Chumbo	Dotados de elevado índice de refração, brilho e densidade. São comumente utilizados como proteção para radiação e invólucros de lâmpadas fluorescentes.
Boro-Silicatos	Tem baixa expansão térmica, boa resistência ao choque térmico e grande estabilidade química, sendo empregado em situações que requerem alta durabilidade do material vítreo.
Ópticos	Possuem alta densidade e grande índice de refração. Majoritariamente usados na fabricação de lentes e afins.

Alumino-Silicatos	Tem resistência a altas temperaturas e baixos coeficientes de expansão.
-------------------	---

Fonte: Scheuermann Filho (2019).

### 3.1.2 Coloração e propriedades ópticas do vidro

Uma das características mais importantes dos vidros é a variedade de cores, que podem apresentar tonalidades com leve transparência ou opacidade. A coloração do vidro é alcançada por meio da incorporação de agentes cromóforos, como óxidos metálicos, especialmente compostos de metais de transição (3<sup>d</sup>) ou terras raras (4<sup>f</sup>). A cor resultante varia em função da composição química dos óxidos, do estado de oxidação dos metais, de sua concentração e do tratamento térmico a que o vidro é submetido (Alves; Gimenez; Mazali, 2001). Alguns dos óxidos normalmente utilizados para dar cor aos vidros são apresentados na Tabela 2. A intensidade e a saturação da cor são influenciadas não apenas pela massa atômica dos metais, mas também por fatores como a presença de oxigênio ou um ambiente redutor, que podem alterar o estado de oxidação dos íons metálicos. Adicionalmente, a composição do lote de vidro e a interação com outros materiais modificam suas propriedades ópticas. O cronograma de aquecimento, incluindo temperatura e tempo de fusão, afeta a homogeneidade e a distribuição dos íons metálicos, enquanto inclusões de gás podem interferir na passagem da luz, impactando a percepção da cor (Calas; Galois; Cormier, 2021).

Tabela 2: Espécies químicas (agentes de coloração) utilizados para dar cor aos vidros.

Agente de Cromóforo	Estado oxidação	Coloração
<b>Cobre</b>	Cu <sup>2+</sup>	Azul claro
<b>Crômio</b>	Cr <sup>3+</sup>	Verde
	Cr <sup>6+</sup>	Amarelo
<b>Manganês</b>	Mn <sup>3+</sup>	Violeta
	Mn <sup>4+</sup>	Preto
<b>Ferro</b>	Fe <sup>3+</sup>	Marrom-amarelado
	Fe <sup>2+</sup>	Verde-azulado
<b>Cobalto</b>	Co <sup>2+</sup>	Azul intenso ou rosa
	Co <sup>3+</sup>	Verde
<b>Níquel</b>	Ni <sup>2+</sup>	Marrom, amarelo, verde, azul a violeta, dependendo da matriz vítrea
<b>Vanádio</b>	V <sup>3+</sup>	Verde, em vidros silicatos e Marrom, em vidros boratos

<b>Titânio</b>	Ti <sup>3+</sup>	Violeta
<b>Neodímio</b>	Nd <sup>3+</sup>	Violeta-avermelhado
<b>Praseodímio</b>	Pr <sup>3+</sup>	Verde claro
<b>Ouro</b>	Au	Rubi (partículas coloidais dispersas na matriz vítrea)
<b>Cádmio</b>	CdS, CdSe	Laranja

Fonte: Alves; Gimenez; Mazali (2001).

Após a fabricação, o grau de cor dos vidros pode ser medido com um colorímetro, e as cores são comparadas com gráficos. Se as cores coincidirem com o esperado, o processo continua; caso contrário, são adicionados corantes até se alcançar a tonalidade desejada. As cores são identificadas pela absorção de luz, resultante da presença de agentes cromóforos. Além disso, partículas coloidais precipitadas, que inicialmente são incolores devido ao tratamento térmico, podem desenvolver cor após o reaquecimento do vidro (Akerman, 2000).

### 3.1.3 Impactos energéticos e reciclagem do vidro

A preocupação com os impactos ambientais decorrentes do alto consumo de energia e da extração de matérias-primas para a fabricação de materiais de construção tem sido discutida pela comunidade científica. Reciclar apenas uma tonelada de vidro economiza aproximadamente 700 kg de emissões de dióxido de carbono e conserva cerca de 1,2 t de matérias-primas (Atzori *et al.*, 2023; Purba *et al.*, 2021; Zier *et al.*, 2021). Nesse contexto, a reciclagem do vidro se mostra essencial ao reduzir tanto o consumo de energia quanto a extração de recursos naturais, contribuindo para a melhoria da limpeza urbana e a diminuição do volume de resíduos destinados a aterros e lixões. Ainda, a produção a partir do próprio vidro emite-se menos resíduos e CO<sub>2</sub>, o que acaba por contribuir significativamente para a conservação do meio ambiente (Vettorato *et al.*, 2021). A fabricação de vidro é um processo intensivo em energia, uma vez que a fusão da sílica ocorre na presença de outros óxidos, ainda exigindo temperaturas elevadas e aquecimento contínuo para garantir a homogeneização do material (Olofinnade *et al.*, 2017).

Do ponto de vista econômico, a substituição de matérias-primas virgens por secundárias, como o caco de vidro, destaca-se como um fator estratégico na redução de custos, considerando que a fabricação do vidro é altamente intensiva em energia (Santana; Lange; Magalhães, 2022). As indústrias de vidro no Brasil destacam o

grande potencial de aumento no uso de caco de vidro como matéria-prima em seus processos, podendo substituir até 60% dos insumos, em termos de massa. A substituição de 60% por cacos de vidro pode resultar em uma redução de até 25% no consumo de energia. De acordo com a Confederação Nacional do Ramo Químico (CNQ), para cada 10% de caco de vidro adicionado à mistura, há uma economia de 3 a 4% de energia necessária para a fusão nos fornos industriais, além de uma redução de 10% no uso de água (Santana; Lange; Magalhães, 2022).

A reciclagem do vidro oferece benefícios ambientais, econômicos e sociais. Esse material é 100% recuperável e pode ser reciclado infinitamente sem perder suas propriedades ou funcionalidade. No entanto, a reciclabilidade do vidro depende de fatores cruciais, como a cor e a contaminação por poluentes (Aguilar-Jurado *et al.*, 2019).

## 3.2 ECONOMIA CIRCULAR DO VIDRO

### 3.2.1 Cenário atual da reciclagem no Brasil

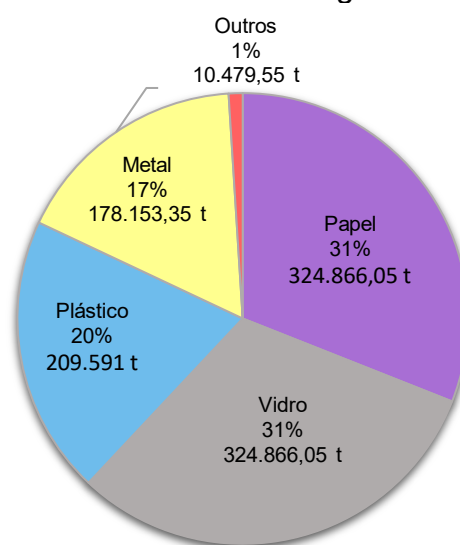
O aumento populacional e as mudanças nos padrões de consumo intensificam a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU), e a reciclagem surge como estratégia importante para mitigar os impactos ambientais, reduzir a extração de matérias-primas e minimizar o envio de resíduos aos aterros sanitários (Oliveira *et al.*, 2022). No Brasil, a geração anual de RSU ultrapassa 81,6 milhões de toneladas, com uma taxa de reciclagem de apenas 8,7%, valor ainda inferior ao de países desenvolvidos. Em 2023, cerca de 93% dos resíduos gerados foram coletados, mas apenas uma fração foi recuperada por meio da logística reversa (ABREMA, 2025).

Em 2024, cada brasileiro gerou em média 1,051 kg de resíduos sólidos urbanos (RSU) por dia, totalizando 81,6 milhões de toneladas ao ano ( $\approx$  223 mil t/dia), o equivalente a 384 kg por habitante. Do total gerado, aproximadamente 94,6% foram coletados (considerando que apenas 5,4% foram queimados na propriedade ou não coletados), resultando em cerca de 77,2 milhões de toneladas coletadas anualmente. Quanto à logística reversa em 2024, o sistema de embalagens de vidro recuperou 597 mil toneladas (aumento de 14,2%), enquanto o de latas de alumínio atingiu um índice de reciclagem de 97,3%, com 418 mil toneladas recuperadas. As latas de aço

somaram 81,9 mil toneladas recuperadas, superando a meta estabelecida para o ano (ABREMA, 2025).

A Figura 1 apresenta a distribuição dos materiais recuperados em 2024 pelo sistema de logística reversa de embalagens, evidenciando a predominância de papel e vidro.

Figura 1: Distribuição dos materiais recuperados em 2024 pelo sistema de logística reversa de embalagens.



Fonte: (ABREMA,2025)

A reciclagem de vidro no Brasil é limitada por fatores econômicos e logísticos. O baixo valor de mercado, os altos custos de transporte e a concentração das indústrias vidreiras em poucas regiões reduzem o interesse de catadores e cooperativas. Além disso, o beneficiamento do vidro reciclado é complexo e oneroso, o que compromete sua competitividade em relação a outras cadeias de reciclagem (Melo *et al.*, 2023).

### 3.2.2 Construção civil e gerenciamento dos resíduos sólidos

O setor da construção civil contribui significativamente para o crescimento econômico do Brasil, gerando emprego, renda e comercialização de insumos, equipamentos e serviços em seu processo produtivo. Por outro lado, o setor da construção civil é responsável por gerar uma grande quantidade de resíduos que causam um impacto significativo no meio ambiente e na sociedade quando são

descartados de forma inadequada (Oliveira *et al.*, 2020). Estima-se que aproximadamente 46 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) tenham sido geradas no Brasil em 2024 (ABREMA,2025).

Os resíduos da construção e demolição (RCD) também denominados de resíduos da construção civil (RCC) são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, tintas, madeiras e entre outros (Quaglio; Arana, 2020) .

No Brasil, os resíduos sólidos são classificados de acordo com a NBR 10004 – Classificação de Resíduos Sólidos, que utiliza como critério os riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Essa classificação é dividida em três categorias principais: Resíduos Classe I (Perigosos), Resíduos Classe II (Não Perigosos), subdivididos em Classe II-A (Não Inertes) e Classe II-B (Inertes).

Resíduos Classe I: Resíduos que apresentam características de periculosidade, como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Exemplos incluem resíduos industriais com substâncias tóxicas, como solventes e metais pesados, produtos químicos perigosos descartados e resíduos hospitalares infecciosos.

Resíduos Classe II A (Não Inertes) :Resíduos que não se enquadram como perigosos, mas podem degradar-se no meio ambiente, liberando substâncias que afetam solo, água ou ar. Exemplos incluem resíduos orgânicos, papel, papelão, madeira e embalagens plásticas.

Resíduos Classe II B (Inertes): Resíduos que não sofrem transformações físicas, químicas ou biológicas significativas ao longo do tempo, não causando impactos significativos ao meio ambiente. Exemplos incluem vidro, entulho de construção civil (sem contaminantes perigosos) e cerâmicas.

O vidro, quando não contaminado por substâncias perigosas, como metais pesados ou resíduos tóxicos, é classificado como Classe II-B (Inerte), pois não sofre alterações químicas ou biológicas significativas ao longo do tempo. Entretanto, se o vidro estiver contaminado com substâncias perigosas, como resíduos químicos ou materiais biológicos, ele pode ser classificado como Classe I — Perigoso, dependendo da avaliação específica (ABNT NBR 10004, 2004).

### 3.2.3 Composição do resíduo de vidro

O vidro é um material variado, com composições químicas distintas que afetam suas possíveis aplicações. A Tabela 3 mostra os principais tipos de resíduos de vidro, organizados conforme sua aplicação original, e fornece uma breve descrição de cada composição.

Tabela 3: Tipos de resíduos de vidro, aplicação original e descrição de cada composição.

<b>Aplicação original</b>	<b>Tipo de vidro predominante</b>	<b>Descrição</b>
<b>Recipientes pós-consumo</b>	Silicato soda-cal (sódico-cálcico)	Fabricado pela fusão de calcário ( $\text{CaCO}_3$ ), areia ( $\text{SiO}_2$ ), carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), entre outros constituintes menores. Obtido de potes, garrafas, recipientes, produtos de iluminação e utensílios domésticos triturados.
<b>Vidro plano</b>	Silicato soda-cal (sódico-cálcico)	Existem dois tipos de vidro plano: o pós-consumo, proveniente de janelas e portas descartadas, e o pré-consumo, oriundo de sobras e rejeitos da fabricação, geralmente não contaminado e totalmente reciclável.
<b>Tubos de raios catódicos (CRT)</b>	Silicato de álcali-bário e vidro de chumbo	O vidro CRT, contendo $\text{CaO}$ , $\text{SiO}_2$ , $\text{Na}_2\text{O}$ e aditivos como $\text{BaO}$ e $\text{PbO}$ para proteção contra raios X, é usado em monitores de computador e TVs.
<b>Tela de cristal líquido (LCD)</b>	Borossilicato de sódio (substrato de vidro LCD)	Normalmente composto de sílica, trióxido de boro, alumina e alguns óxidos alcalino-terrosos. Encontrado em painéis LCD em fim de vida útil (por exemplo, calculadoras, televisores, monitores, câmeras).
<b>Artigos de vidro de chumbo</b>	Vidro de chumbo	Conhecido como "cristal", contém alto teor de $\text{PbO}$ , conferindo brilho. É usado em artigos decorativos, vidros ópticos, esmaltes, selantes, soldas de vidro e blindagem contra radiação.
<b>Pirex</b>	Borossilicato de sódio	Contém quantidades relativamente altas de trióxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), apresenta baixa expansão térmica e alta resistência ao calor. Encontrado em utensílios de cozinha e vidraria de laboratório.
<b>Fibras de vidro</b>	Alumino-borossilicato	Normalmente encontrado em isolamento, cabos de fibra óptica e componentes reforçados.

Fonte: Silva *et al.* (2017).

A maior parte desses resíduos é composta por vidro de silicato soda-cal (SLS), proveniente de recipientes (garrafas) e de vidro plano. Embora suas composições químicas sejam semelhantes, a coleta e o processamento dos dois tipos diferem devido a variações em cor, tamanho, formato e grau de contaminação (como restos de alimentos). Essa diversidade torna a reciclagem do vidro de recipientes mais desafiadora do que a do vidro plano (Silva *et al.*, 2017).

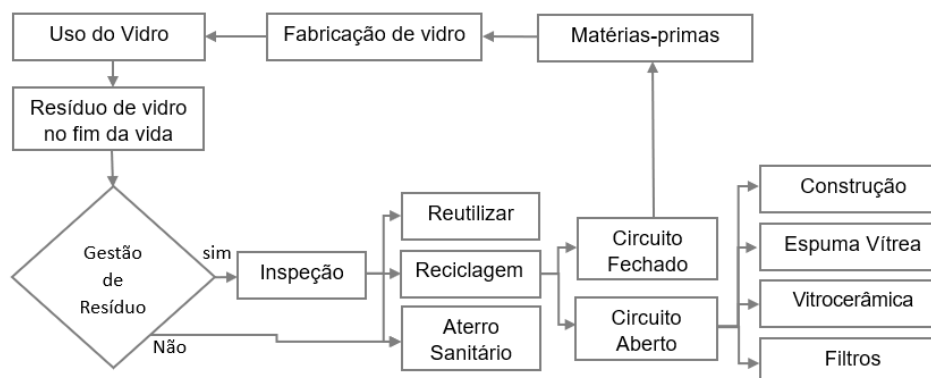
#### 3.2.4 Produção e descarte global de vidro

A produção global de vidro é de aproximadamente 130 milhões de toneladas anualmente. Destes, apenas 21% são reciclados e os 79% restantes se tornam resíduos de vidro (Guo *et al.*, 2020). Quando o vidro atinge o fim de sua utilidade, três opções principais de descarte estão disponíveis: reutilização, envio para aterro ou reciclagem. Como os resíduos de vidro demoram 4 mil anos para se decompor e não podem ser incinerados, eles geralmente são depositados em aterros sanitários, configurando um problema ambiental, já que o vidro, com seu alto potencial para reciclagem e reutilização, acaba sendo descartado após o consumo. No gerenciamento de resíduos de vidro, grandes desafios surgem para garantir a sustentabilidade dessa cadeia produtiva. Entre eles, o principal é o transporte aos pontos de descarte e os locais de produção de vidro (Kumari; Agarwal; Khan, 2022).

#### 3.2.5 Estratégias de reciclagem de vidro

A reciclagem de vidro é fundamental para a gestão eficiente de resíduos, pois permite a recuperação e reutilização de materiais, preservando recursos naturais e reduzindo a necessidade de extrair e processar matérias-primas virgens (Salzmann; Ackerman; Cicek, 2022). Basicamente, existem dois tipos de reciclagem de vidro: estratégias de circuito aberto e circuito fechado, e são mostradas na Figura 2. Resíduos de vidro de baixa qualidade que não podem ser usados na fabricação de produtos de vidro são normalmente reciclados por meio da reciclagem de circuito aberto. A reciclagem de circuito fechado envolve o processamento de resíduos de vidro para remover impurezas e convertê-los em novos produtos de vidro (Delbari; Hof, 2024).

Figura 2: As estratégias de circuito aberto e circuito fechado nas práticas convencionais de reciclagem de vidro.



Fonte: Adaptado de Delbari e Hof (2024).

Uma vez que o vidro se torna um resíduo, no processo de reciclagem, o vidro passa por várias etapas consecutivas. Este processo começa com a coleta adequada do vidro, seguida pela triagem manual ou mecânica, onde são identificados o tipo e a cor do material. Em seguida, contaminantes são removidos, o vidro é triturado, peneirado e classificado. Finalmente, o material reciclado é reintegrado ao ciclo econômico, promovendo a sustentabilidade e gerando retorno financeiro. Esse ciclo só é eficaz quando sustentado por um sistema de coleta organizado e políticas de incentivo apropriadas (ABRAVIDRO, 2024).

### 3.2.6 Inovações e políticas para reaproveitamento de resíduos de vidro

Estudos recentes têm explorado soluções inovadoras para o reaproveitamento de resíduos de vidro, com destaque para abordagens sustentáveis e de alto impacto ambiental. A reciclagem desponta como uma das principais estratégias, viabilizando a transformação do vidro em novos produtos com maior eficiência energética (Hassan *et al.*, 2025).

O vidro moído tem sido utilizado em diferentes aplicações na construção civil. Ele pode atuar como substituto de cimento, areia e agregados grossos no concreto sendo identificado como uma estratégia potencial para mitigar emissões associadas à produção de concreto (Chen *et al.*, 2021). Além disso, o vidro moído pode ser utilizado como substituto parcial do cimento *Portland* (Santos *et al.*, 2024), como agregado em misturas asfálticas (Kusumawardani *et al.*, 2023) na fabricação de tijolos (Flores Nicolás *et al.*, 2024) e como agregado fino em aplicações de

geopolímeros (Chen *et al.*, 2025). Resíduos de vidro triturado ou em pós também têm aplicação na produção de produtos cerâmicos, substituindo recursos naturais de alto custo e promovendo maior sustentabilidade no setor (Hassan *et al.*, 2025; Silva *et al.*, 2017).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/10, enfrenta desafios para implementar um gerenciamento eficaz da reciclagem de vidro no Brasil. O Decreto Federal nº 11.300, de 21 de dezembro de 2022, que regula a PNRS, estabelece o sistema de logística reversa para embalagens de vidro, com o intuito de tornar mais claros e eficientes os processos de reciclagem desse material. Além disso, o decreto visa corrigir algumas lacunas da PNRS, que não abordavam as especificidades do processo de logística reversa do vidro (Melo *et al.*, 2023).

### 3.3 ESPUMAS VÍTREAS

#### 3.3.1 Introdução ao uso de espumas vítreas

Na década de 1930, iniciou-se um esforço global para o desenvolvimento da espuma vítrea, com patentes sendo concedidas em diversos países, como França, Checoslováquia, Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha, mas não é possível determinar com precisão quem foram os primeiros inventores da espuma vítrea. Os processos patenteados podem ser classificados em duas categorias principais: a produção de espumas vítreas por sinterização (pó de vidro são misturados com agentes porogênicos) e a introdução direta de fluidos (ar, CO<sub>2</sub>, vapor de água) no vidro fundido (Bessonov *et al.*, 2020).

Os relatórios de Kern e Kitaigorodski podem ser considerados os primeiros exemplos de espumas vítreas obtida a partir do processo de sinterização (Scarinci; Brusatin; Bernardo, 2005). No entanto, durante a Segunda Guerra Mundial, as pesquisas e o desenvolvimento tecnológico sofreram uma interrupção global, com exceção dos Estados Unidos. Esse cenário permitiu que os Estados Unidos se destacassem na produção em larga escala de espuma vítrea, atendendo principalmente às necessidades da Marinha. Como resultado, os Estados Unidos se tornaram, por muitos anos, líderes na produção e pesquisa dessa tecnologia. Mais recentemente, na Rússia, começou a produção industrial de alta tecnologia de

produtos de espuma vítrea com o objetivo do isolamento térmico com destaque para a marca NEOPORM® (Bessonov *et al.*, 2020).

Desde os anos 70, todos os países industrializados seguem uma política de poupança de energia, provocando um desenvolvimento considerável da indústria do isolamento térmico. Uma das formas de reaproveitar o vidro é utilizá-lo como matéria-prima na fabricação de espumas vítreas., que têm atraído grande interesse da indústria da construção civil por suas características como leveza, rigidez e boa resistência à compressão, além de serem quimicamente inertes e atóxicas (da Silva Fernandes *et al.*, 2019).

Esses fatores favorecem, por exemplo, seu uso em isolamento térmico como ilustrado na Figura 3. O desenvolvimento da espuma vítrea a partir de resíduos de vidro é especialmente atrativo, já que grandes quantidades de vidro descartado podem ser reutilizadas como matéria-prima, diminuindo assim os impactos ambientais associados a esse tipo de resíduo (Lucio King *et al.*, 2018). Em muitos casos, a substituição do vidro virgem por vidro reciclado é quase total, o que torna a produção de espuma vítrea uma solução eficiente para a reciclagem de diversos tipos de vidro, incluindo garrafas, as embalagens de alimentos e frascos, os painéis automotivos e residenciais, os monitores de computador e televisores, as lâmpadas, entre outros (Rangel *et al.*, 2018).

Figura 3: Bloco de espuma vítrea comercial.



Fonte: ISAR. Foamglas: Isolamento Térmico (2024).

### 3.3.2 Propriedades e aplicações das espumas vítreas

O resíduo de vidro pode ser reciclado para fabricar espumas vítreas, que são usadas para isolamento e acústico de edifícios devido às suas excelentes

propriedades de isolamento térmico e alta durabilidade (Chen *et al.*, 2024; D'Amore *et al.*, 2017). Em comparação com materiais isolantes convencionais, como espumas orgânicas e fibras minerais, a espuma vítrea oferece inúmeras vantagens, incluindo resistência à água e ao vapor, durabilidade excelente estabilidade química e térmica, além de propriedades mecânicas superiores (König; Petersen; Yue, 2015). Além disso, as espumas vítreas facilitam a construção rápida e tem baixos custos de transporte, é fácil de manusear, cortar e perfurar, e é facilmente combinada com concretos (Teixeira *et al.*, 2017).

As propriedades versáteis da espuma vítrea contribuíram para seu uso em diversas aplicações. Na forma de agregados com poros fechados e granulação grossa, o material é empregado para redução de peso e vibração em aterros ferroviários (Lenart; Kaynia, 2019). Já na forma granulada pode substituir parcialmente agregados naturais em concretos leves (Limbachiya *et al.* 2012) e atuar como agregado leve em geopolímeros, contribuindo para a redução da densidade do material (Mohammed Al-Saudi; Géber, 2024). Além disso, destaca-se seu uso como isolante térmico em pavimentos sujeitos à ação do gelo, graças à sua estrutura leve, poros fechados e estabilidade, que garantem eficiência térmica e durabilidade (Adam *et al.*, 2024).

### 3.3.3 Influência das composições na formação das espumas vítreas

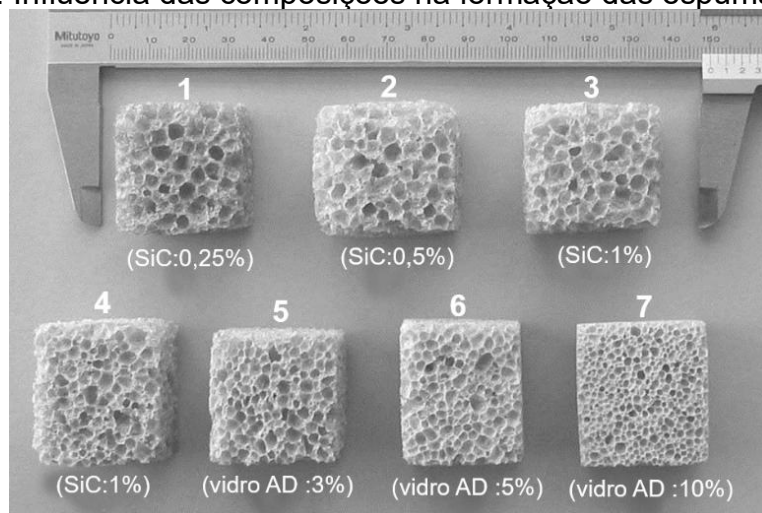
A variação nos tamanhos de poros pode ser controlada ao ajustar tanto a quantidade quanto o tipo de agente espumante utilizado na fabricação de materiais porosos. O volume dos poros pode ser distribuído de duas formas: em um número restrito de poros grandes ou em uma quantidade significativa de poros pequenos. Essas diferentes distribuições influenciam diretamente o desempenho e as propriedades do material (Scheffler; Colombo, 2005).

A distribuição de tamanho de partículas e a quantidade do agente espumante também têm um papel importante no tamanho final dos poros, sendo necessário selecionar o tipo, o tamanho e a concentração ideal do agente espumante sempre que se necessita modificar o tamanho e distribuição de poros. A temperatura e a taxa de aquecimento durante a fabricação são outros fatores que influenciam o comportamento dos agentes porogênicos, afetando tanto o tamanho quanto a distribuição dos poros. Um aquecimento controlado permite uma seleção gradual,

resultando em uma distribuição mais uniforme. Outro fator importante é a aplicação de pressão, que pode regular o crescimento dos poros e contribuir para a modulação do seu tamanho (Steiner; Schaaf; Beerkens, 2002) .

A Figura 4 apresenta informações sobre a influência das composições na formação das espumas vítreas.

Figura 4: Influência das composições na formação das espumas vítreas.



Fonte: Adaptado de Tulyaganov *et al.* (2006).

Neste estudo Tulyaganov *et al.* (2006), cacos de vidro reciclados foram combinados com carvão de silício (SiC) como agente espumante e pó de vidro aluminossilicato alcalino-terroso (AD) como aditivo modificador. Observou-se que menores teores de SiC (0,25 e 0,5%) resultaram em poros maiores e menos uniformes, enquanto o aumento para 1% promoveu uma estrutura celular mais homogênea, com poros menores e bem distribuídos. A incorporação de vidro AD em diferentes proporções (3, 5 e 10%) intensificou esse efeito, reduzindo ainda mais o tamanho e aumentando a regularidade dos poros. Esse comportamento é atribuído ao papel do SiC na liberação controlada de gases durante a sinterização e ao efeito fundente do vidro AD, que ajusta a viscosidade da fase vítrea e estabiliza as bolhas formadas, aprimorando a estrutura porosa do material.

#### 3.3.4 Sustentabilidade e competitividade das espumas vítreas

O principal desafio no uso de espumas vítreas é seu alto custo, o que frequentemente leva os consumidores a optar por materiais isolantes alternativos. A produção de espuma de vidro é relativamente cara, pois requer processamento em alta temperatura e resulta em emissões de gases de efeito estufa (Saparuddin *et al.*, 2020; Siddika; Hajimohammadi; Sahajwalla, 2022). Entre os principais gases liberados durante a fabricação, destacam-se o CO<sub>2</sub> e o SO<sub>2</sub> (König *et al.*, 2020). Assim, torna-se necessário desenvolver mecanismos sustentáveis para a produção de espumas vítreas, com foco no reaproveitamento de resíduos de vidro como matéria-prima.

Atualmente, o mercado global de isolamento térmico na construção civil é dominado por polímeros e fibras inorgânicas, que juntos representam uma participação de até 95% do setor. Materiais como lã de vidro, lã de rocha, lã de escória e produtos cerâmicos, espumas de polímeros (poliestireno, polietileno), compósitos espumados (cimentícios, geopoliméricos), espumas pulverizadas e concreto aerado autoclavado são utilizados em aplicações de construção (Panov *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2022).

No entanto, todos os materiais tem propriedades específicas que podem limitar seu uso dependendo das condições ambientais, do tipo de construção ou dos requisitos técnicos (durabilidade, manutenção e impacto ambiental). A lã mineral, embora eficaz em isolamento térmico, tem durabilidade limitada e é difícil de reciclar. Espumas poliméricas, como poliuretano e poliestireno, apresentam risco de combustibilidade e desafios para reciclagem (Chen *et al.*, 2019; Papadopoulos; Giama, 2007; Pargana *et al.*, 2014). Além disso, espumas cimentícias, devido à alta concentração de cimento, possuem uma pegada de carbono significativa (Pargana *et al.*, 2014).

A crescente disponibilidade de resíduos de vidro e o conhecimento sobre seus componentes permitem produzir espumas vítreas a menor custo. Como a espuma é composta principalmente por pó de vidro e agente espumante, o uso de resíduos reduz o consumo de recursos, favorece a economia circular e melhora a gestão de resíduos (Wang *et al.*, 2023). A produção de novos produtos a partir de resíduos, conhecida como *upcycling*, torna a fabricação de espumas vítreas uma oportunidade para reciclar vidro descartado. No entanto, a sustentabilidade e a viabilidade econômica dessa prática dependem de todo o processo de fabricação, desde a coleta do vidro até a eficiência energética da produção (Ramteke *et al.*, 2021).

## 3.4 PROCESSAMENTO DAS ESPUMAS VÍTREAS

### 3.4.1 Histórico e evolução dos métodos de fabricação

As primeiras espumas de vidro surgiram na década de 1930, utilizando uma técnica conhecida como insuflação, que consiste na introdução direta de gases no vidro fundido (Scheffler; Colombo, 2005). No entanto, devido aos altos custos envolvidos, essa técnica tornou-se obsoleta e foi substituída por abordagens mais eficientes, como a sinterização, o método da réplica e o *gelcasting* (Chen *et al.*, 2014; Ghomi; Fathi; Edris, 2012; König *et al.*, 2017; Petersen; König; Yue, 2015).

As principais matérias-primas para a fabricação de espumas vítreas incluem vidro, resíduos de vidro e aditivos derivados de resíduos. O processo de formação de espuma varia de acordo com os métodos adotados e suas aplicações. Entre os métodos mais comuns estão as técnicas de espumação no estado fundido e a sinterização de pós 58, 66. Ambos os métodos são projetados com agentes espumantes e fundentes que se decompõem e liberam gases em altas temperaturas (Saparuddin *et al.*, 2020).

A abordagem de sinterização, em particular, baseia-se no uso de pós de vidro finos que, ao serem aquecidos, formam uma massa piropiástica. Essa massa é espumada pelo desenvolvimento de gases liberados durante a decomposição ou oxidação de aditivos específicos, conhecidos como agentes espumantes. Esse avanço técnico possibilitou a substituição do vidro puro por vidro reciclado, promovendo uma alternativa mais sustentável e economicamente viável para a fabricação de espumas vítreas (Bernardo *et al.*, 2007).

### 3.4.2 Etapas do processo de produção e formação de poros

O caco de vidro reciclado é primeiramente moído em um pó fino usando moagem de bolas convencional e, posteriormente, misturado com agentes espumantes e outros aditivos. A mistura resultante é compactada (prensada) e submetida a um ciclo térmico controlado, durante o qual os agentes espumantes interagem com a matriz vítrea em estado viscoso (piropiástico), promovendo a formação da estrutura porosa. Essa etapa, geralmente realizada entre 800 e 1200 °C,

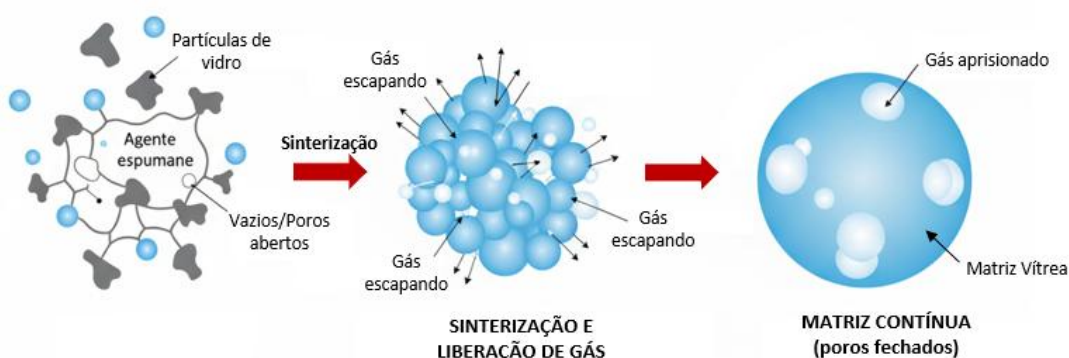
desencadeia a interação entre os gases em evolução e a matriz vítrea amolecida, formando uma rede porosa (Pokorny; Vicenzi; Bergmann, 2008).

Durante o aquecimento, as partículas de vidro primeiro se sinterizam e, à medida que a temperatura aumenta, o agente espumante se decompõe, liberando gases que expandem a matriz amolecida e formam a estrutura porosa. Após o resfriamento, o vidro espumado pode ser cortado em painéis ou triturado em grânulos, dependendo da aplicação desejada (Guo *et al.*, 2020).

Neste caso, as temperaturas necessárias são inferiores às requeridas na fusão convencional do vidro, tornando essa tecnologia uma alternativa mais sustentável (Bernardo, 2007; Colombo *et al.*, 2003; Manevich; Subbotin, 2008). A metodologia de preparação de espumas vítreas a partir de pós de vidro reciclado proporciona uma economia energética de 25 % em comparação com a rota de produção que utiliza o sopro de gases em vidros fundidos (Ayadi *et al.*, 2011).

A sinterização ocorre quando o vidro atinge uma viscosidade próxima de  $10^6$ ,<sup>6</sup> Pa·s, unindo as partículas e formando uma matriz que permite, em seguida, a criação controlada de poros pelo agente espumante (Varshneya; Mauro, 2019; Wattanasiriwech *et al.*, 2019). De acordo com Fernandes *et al.* (2009), durante a sinterização, as partículas do agente espumante ficam encapsuladas na matriz vítrea. A partir de um determinado nível de temperatura, o agente espumante inicia a liberação de gases, provocando a expansão do material. Com a contínua emissão de gases, surgem poros em várias áreas do corpo sinterizado, onde as partículas do agente espumante foram imobilizadas. conforme ilustrado na Figura 5 (Fernandes; Tulyaganov; Ferreira, 2009).

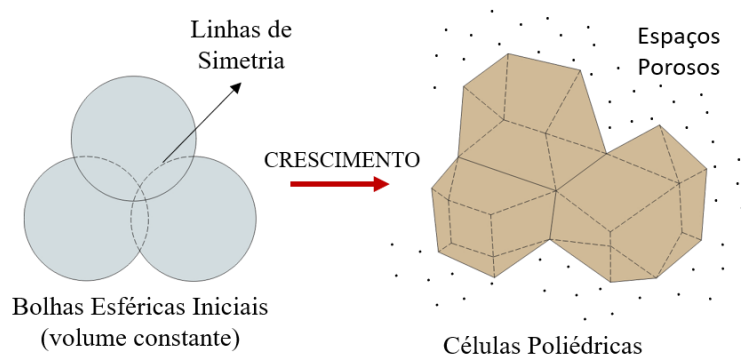
Figura 5: Representação esquemática das etapas inicial, intermediária e final da formação de poros.



Fonte: Da autora (2026).

O crescimento dos poros gerados durante a sinterização do vidro ocorre quando a pressão interna do gás aumenta e supera a pressão exercida pelas forças externas sobre o poro, neste caso, a tensão superficial. A estrutura celular das espumas vítreas pode ser compreendida em diferentes fases. A primeira fase é caracterizada por pequenas células esféricas, conforme ilustrado na Figura 5. À medida que o processo de expansão avança, as células não apenas aumentam de tamanho, mas também alteram sua forma, adquirindo uma conformação poliédrica (Attila; Güden; Taşdemirci, 2013). A Figura 6 apresenta um modelo que ilustra o crescimento das células, levando em conta a coexistência de bolhas em um volume de vidro fundido.

Figura 6: Modelo celular de células esféricas de volume constante com pequena sobreposição entre elas. Linhas pontilhadas representam as linhas de simetria.



Fonte: Da autora (2026).

Após o crescimento das células, um aumento na temperatura de queima da espuma vítrea provoca um aumento na pressão do gás dentro dessas células, ao mesmo tempo em que diminui a viscosidade da fase vítrea. Como resultado, a espessura das paredes dos poros se reduz, facilitando sua ruptura. Esse fenômeno é conhecido como coalescência, que permite a expansão do volume de poros por meio da interconexão com poros adjacentes. A coalescência resulta na conexão das células vizinhas, promovendo o surgimento de porosidade aberta no material (Attila; Güden; Taşdemirci, 2013; Méar; Yot; Ribes, 2006).

Os agentes espumantes podem ser de origem sintética, como polímeros, ou natural, como resíduos vegetais e minerais. O tamanho, a forma e a quantidade dos poros resultantes dependem da granulometria e da proporção do agente espumante reutilizado (Studart *et al.*, 2006).

### 3.4.3 Técnicas de fabricação

Existem também técnicas de processamento via-úmida utilizadas para a obtenção de espumas vítreas: incorporação de agentes porogênicos, *gelcasting*, ou método da réplica são alguns exemplos. Em todos os casos, basicamente ocorrem em três etapas: preparação de uma suspensão de um pó cerâmico, conformação e tratamento térmico (queima) (Scheffler; Colombo, 2005). As diversas técnicas de processamento promovem diferentes estruturas porosas e porosidades, sendo que estes fatores determinam suas propriedades e estas, por sua vez, condicionam a aplicação do sólido celular obtido (Colombo, 2006). A Tabela 4 apresenta as características usualmente apresentadas pelos sólidos celulares obtidos pelas três metodologias descritas.

Tabela 4: Características dos sólidos celulares obtidos de técnicas para a produção de espumas vítreas.

<b>Técnica</b>	<b>Porosidade (%)</b>	<b>Conectividade dos poros</b>	<b>Diâmetro dos poros</b>
Réplica polimérica	40-95	aberta	300 $\mu\text{m}$ – 3 mm
<i>Gelcasting</i>	40-97	aberta	100 $\mu\text{m}$ – 2 mm
Incorporação de agentes espumantes	20-90	Aberta, fechada ou mista	1 $\mu\text{m}$ – 700 $\mu\text{m}$

Fonte: Studart *et al.* (2006), Romano e Pandolfelli (2006).

#### 3.4.3.1 Réplica polimérica

A técnica da réplica polimérica, que consiste na utilização de uma esponja polimérica altamente porosa, geralmente de poliuretano, impregnada com uma suspensão cerâmica até que os poros internos estejam completamente preenchidos. Após a secagem, um tratamento térmico é realizado para queimar e eliminar o material orgânico (esponja), além de promover a sinterização do material cerâmico. O resultado é um material com porosidade aberta e uma microestrutura semelhante à da esponja original (Donadel *et al.*, 2009). A Figura 7 ilustra, de forma esquemática, as principais etapas do método.

As cerâmicas porosas obtidas por esse método podem atingir níveis de porosidade aberta total na faixa de 40 a 95%, sendo caracterizadas por uma estrutura reticulada de poros altamente interconectados, com tamanhos variando entre 200  $\mu\text{m}$

e 3 mm. Entretanto, o método da réplica em espumas apresenta algumas limitações. Os gases liberados durante a etapa de pirólise são tóxicos, e o processo deve ser cuidadosamente controlado para evitar a formação de fissuras e quebras na estrutura porosa, consideradas as principais desvantagens dessa técnica (Studart *et al.*, 2006). Além disso, o método é afetado pela baixa reprodutibilidade e pelo controle insuficiente da arquitetura porosa, especialmente em amostras de maior dimensão ou complexidade geométrica e em produções em múltiplos lotes. Problemas como a formação de gradientes de lama, associados à oclusão seletiva de poros, a variação de porosidade entre amostras e a forte dependência do operador dificultam a padronização do processo e limitam sua escalabilidade industrial (Fiume *et al.*, 2021).

Figura 7: Esquema ilustrativo das etapas envolvidas na técnica da réplica para obtenção de espumas cerâmicas.



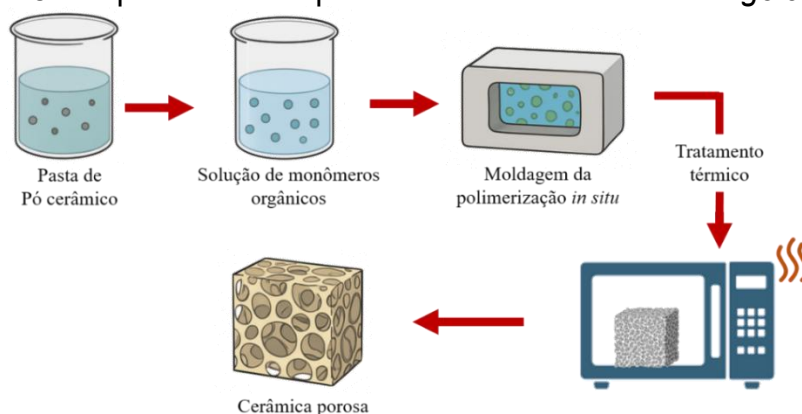
Fonte: Da autora (2026).

### 3.4.3.2 Gelcasting

No *gelcasting* uma pasta concentrada de pó cerâmico é misturada com uma solução de monômeros orgânicos e, em seguida, é despejada em um molde. A polimerização *in situ* resulta na formação de um corpo verde que replica a cavidade do molde, unindo a química dos polímeros ao processamento cerâmico convencional. Esse processo é utilizado para produzir peças cerâmicas de alta qualidade com geometria complexa (Bednarek *et al.*, 2010; Bengisu; Yilmaz, 2002; Kokabi; Babaluo;

Barati, 2006; Tallon *et al.*, 2009), mas pode ser usado para produção de espumas vítreas com excelentes propriedades. Durante o *gelcasting*, a polimerização dos monômeros cria uma rede macromolecular que mantém as partículas de vidro unidas, conferindo ao gel resistência suficiente para suportar seu próprio peso e permitindo o manuseio sem deformações (Kokabi; Babaluo; Barati, 2006). A rede de gel resultante da polimerização dos monômeros orgânicos adicionados às suspensões assegura a união das partículas, resultando em um gel resistente que pode ser manipulado sem distorções (Kokabi; Babaluo; Barati, 2006). As espumas geradas por esse método apresentam elevada porosidade (de até 90%), células com geometria tendendo à esfericidade, variando de 10 a 2000  $\mu\text{m}$ , e paredes celulares densas, o que proporciona um aumento significativo na resistência mecânica específica desses materiais (Sepulveda; Binner, 1999). Para melhor compreensão do processo, a Figura 8 apresenta um esquema ilustrativo das etapas do método *gelcasting*.

Figura 8: Sequência de etapas envolvidas no método de *gelcasting*.



Fonte: Da autora (2026).

### 3.5 PROPRIEDADES DAS ESPUMAS VÍTREAS

#### 3.5.1 Influência do processamento nas propriedades da espuma vítrea.

A espuma vítrea é um material leve e poroso que combina diversas propriedades vantajosas, incluindo baixa condutividade térmica, baixa densidade, resistência a ciclos de congelamento e degelo, não inflamabilidade, inércia química e resistência mecânica superior em comparação a outros isolantes. A otimização das

propriedades da espuma vítrea depende do equilíbrio entre as características do vidro e as propriedades do agente espumante (König *et al.*, 2020). A composição do vidro, o tamanho das partículas e a temperatura de transição vítrea determinam seu comportamento durante o amolecimento e a sinterização, enquanto a formação da espuma é controlada pelo agente espumante, incluindo sua temperatura de decomposição e sua interação com a matriz vítrea. A interação entre a temperatura de transição vítrea da matriz e a cinética de decomposição do agente espumante define a morfologia dos poros e, conseqüentemente, o desempenho do material final (Siddika *et al.*, 2022). Apesar de tais interdependências serem bem conhecidas, estratégias sistemáticas que integrem a seleção de materiais com um processamento energeticamente eficiente ainda são pouco exploradas.

### 3.5.2 Influência da estrutura porosa nas propriedades da espuma vítrea

A estrutura porosa da espuma vítrea determina suas propriedades mecânicas e térmicas, mas seu desempenho continua equiparável ao de produtos comerciais de composição e características similares, sem comprometer a eficiência funcional (Teixeira *et al.*, 2017). As espumas vítreas são caracterizadas por um baixo coeficiente de expansão térmica ( $8,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ), baixa massa específica ( $0,1\text{-}0,3 \text{ g/cm}^3$ ) e alta resistência ao fogo e à corrosão. Algumas espumas vítreas comerciais apresentam uma porosidade total que varia entre 85 e 97% (Boccaccini *et al.*, 2009), além de uma resistência à compressão que varia de 0,4 a 6,0 MPa (Fernandes; Tulyaganov; Ferreira, 2009; Spiridonov; Orlova, 2003). Essas características fazem com que esses materiais tenham potencial para serem utilizados em ambientes internos e externos de residências (Rangel *et al.*, 2018; Sassi *et al.*, 2024). A Tabela 5 apresenta as principais propriedades das espumas vítreas comerciais.

Tabela 5: Propriedades típicas das espumas vítreas comerciais.

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
Densidade	0,1 – 0,3 g/cm <sup>3</sup>
Porosidade	85 – 95%
Resistência a Compressão	0,4 – 6 MPa
Resistência a flexão	0,3 – 1 MPa
Módulo de elasticidade à flexão	0,6 – 1,5 GPa
Coefficiente de expansão térmica	$8,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Condutividade Térmica	0,04 – 0,08 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Difusividade Térmica a °C	$3,5 – 4,9 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$

Perda de transmissão de som a frequência normal	28 dB/100 mm
---	--------------

Fonte: Sheffler e Colombo (2005).

A composição do vidro afeta diretamente as propriedades finais da espuma vítrea. O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), por exemplo, possui a característica de aumentar a resistência química do vidro e também eleva a viscosidade em baixas temperaturas. Já o óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ) proporciona tenacidade para mudanças bruscas de temperatura e aumenta a resistência mecânica. Além disso, o vidro quando na produção das espumas vítreas, deve possuir uma viscosidade suficiente para impedir que as bolhas de gás escapem do corpo durante o ciclo térmico (Akerman, 2000; Pokorny *et al.*, 2011; Rangel *et al.*, 2021).

### 3.5.3 Fatores que influenciam na formação e nas propriedades

De acordo Scheffler e Colombo (2005), os principais parâmetros de processamento que influenciam a formação e nas propriedades de espumas vítreas incluem:

**Tamanho das partículas:** A granulometria dos pós de vidro e do agente espumante deve ser inferior a 4 mm para facilitar a formação de espumas homogêneas;

**Agente espumante:** O tamanho, a forma e a quantidade dos poros resultantes dependem da proporção do agente espumante utilizado. O tipo do agente porogêncio utilizado também influencia;

**Taxa de aquecimento:** Taxas de 5 a 10 °C/min evitam defeitos, enquanto taxas superiores a 40 °C/min podem causar trincas devido à eliminação brusca do agente espumante;

**Temperatura de formação:** A faixa ideal de viscosidade para a formação de espumas ocorre entre 800 e 1000 °C. Temperaturas muito altas ou baixas comprometem a porosidade;

**Tempo de permanência:** Exceder o tempo adequado de permanência a uma determinada temperatura diminui a porosidade devido ao coalescimento dos poros;

Taxa de resfriamento: A têmpera rápida pode aprisionar gases e fixar a estrutura dos poros, mas também gera tensões residuais que exigem recozimento para evitar microtrincas.

Esses fatores devem ser cuidadosamente balanceados para garantir a qualidade da espuma vítreia.

#### 3.5.4 Temperatura no processo de produ o de espuma vítreia

No processo de produ o da espuma vítreia, a temperatura é um dos fatores mais críticos, desempenhando um papel fundamental em diversas etapas. Ela influencia diretamente a viscosidade do material vítreo, afetando sua fluidez e, conseqentemente, a qualidade da espuma resultante. Em temperaturas elevadas, a fluidez do vidro aumenta, facilitando a forma o e a expansão das bolhas de gás. Por outro lado, temperaturas baixas podem resultar em uma viscosidade excessiva, dificultando a expansão das bolhas e comprometendo a qualidade da espuma (Petersen; K nig; Yue, 2017; Souza *et al.*, 2008).

Durante o aquecimento, as bolhas de gás dentro do material se expandem devido ao aumento da pressão interna. Desta forma, um controle adequado da temperatura é essencial para garantir que as células formadas não sejam excessivamente grandes, o que poderia levar a fragilidade (menor resistência mecânica) e a uma diminui o na integridade do material. Um controle preciso permite a obten o de uma estrutura celular homogênea, aumentando a resistência   compressão e a durabilidade do material. Uma temperatura inadequada pode resultar em uma espuma mais frágil e menos confiável. Após a forma o da espuma, a taxa de resfriamento é igualmente importante (Saparuddin *et al.*, 2020; Scheffler; Colombo, 2005).

Resfriamentos rápidos podem induzir tensões internas e provocar fissuras, enquanto um resfriamento controlado promove a estabilidade estrutural. O equilíbrio entre aquecimento e resfriamento é, portanto, importante para o desempenho do material final. Assim, a temperatura constitui um parâmetro crítico na fabrica o de espuma vítreia, sendo necessário o controle rigoroso em todas as etapas do processo para garantir as propriedades e a qualidade desejadas (Zhang *et al.*, 2023).

#### 3.5.5 Densidade da espuma vítreia

A densidade da espuma vítrea depende claramente da duração do tratamento térmico. Durante o período de libertação de gás, a densidade diminui continuamente até um valor mínimo. Quando esta fase termina, inicia-se um processo gradual de destruição e colapso da espuma por coalescência dos poros. Assim, a energia de superfície do sistema é diminuída pela redução da área de superfície específica das paredes das células. Este processo conduz a um novo aumento da densidade. Assim, é necessário calcular com precisão o tempo de tratamento térmico e remover a espumas vítreas da zona quente antes do início do processo de coalescência (Petersen; König; Yue, 2017).

### 3.6 AGENTES ESPUMANTES

#### 3.6.1 Agentes espumantes utilizados na produção de espumas vítreas

Os agentes porogênicos mais utilizados na produção industrial de espumas vítreas são o carbonato de sódio, ureia, o glicerol, o carbeta de silício e o carbonato de cálcio. Muitos outros materiais inorgânicos ou orgânicos, bem como subprodutos e resíduos, podem ser adequados como agentes espumantes (Scheffler; Colombo, 2005). O agente espumante influencia diretamente as propriedades mecânicas e térmicas da espuma vítrea. A variação na quantidade usada, porosidade, tamanho dos poros, resistência mecânica e condutividade térmica mostra a necessidade de um equilíbrio entre as características desejadas e a aplicação específica (Teixeira, *et al.*, 2017). A Tabela 6 apresenta uma comparação abrangente das propriedades de diversos agentes porogênicos usados na produção de espuma vítrea disponíveis na literatura.

Tabela 6: Comparação entre propriedades de agentes espumantes para produção da espuma vítrea de trabalhos anteriores e atuais.

Agente Espumante	Quantidade (%)	Porosidade (%)	Tamanho de Poro ( $\mu\text{m}$ )	Resistência Mecânica (MPa)	Condutividade Térmica (W/m·K)	Referência
Escória de alumínio	10	92,33	~400	92,33	0,038-0,05	(Sassi <i>et al.</i> , 2024)
Fuligem de fábrica de cimento	3	71,4-79,6	200	1,2 – 6,7	0,087 – 0,124	(Osfouri; Ibrahim; Simon, 2024)
Carboneto de silício (SiC)	2-3	86,5	600	< 2,85	~0,25-0,63	(Osfouri <i>et al.</i> , 2025)
Silicato de Sódio	3-15	81,6- 88,9	130- 12000	0,9- 2,7	0,024- 0,251	(Owoeye <i>et al.</i> , 2020)
Casca de ovo	3 e 5	-	220-2390	-	-	(Mariosi <i>et al.</i> , 2019)

Alumino-Silicato	7	88-93	500	1,7-4,8	-	(Rangel <i>et al.</i> , 2018)
Carboneto de silício	2	92,33	20-50	11	0,04	(Sassi <i>et al.</i> , 2024)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4,7	81-86	50-600	~2	<0,10	(Siddika; Hajimohammedi; Sahajwalla, 2023)
Corte de silício (SCW) de serragem de pasta abrasiva solta	1	78	-	4,1	0,16	(Wang <i>et al.</i> , 2023)
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /carbono	6,856	92-93	-	-	0,056-0,066	(Smiljanić; Spreitzer; König, 2023)
Pó de carbono	6	65,17	50-1000	2,9 - 5,2	0,276-0,380	(Qu <i>et al.</i> , 2023)
Pilha alcalina esgotada	-	55-64	-	-	-	(Cruz <i>et al.</i> , 2022)
Carbono e CaCO <sub>3</sub>	1-carbono 4,1- CaCO <sub>3</sub>	86,28- Carbono 91,21-CaCO <sub>3</sub>	500	7,02-Carbono 0,84-CaCO <sub>3</sub>	-	(Zhai <i>et al.</i> , 2022)
Cal de fábrica de beterraba-CaCO <sub>3</sub>	2,5	91,9	1300	0,63	0,043	(Savić <i>et al.</i> , 2023)
Pó de Carbono	1	84,03	500	2,45 e 3,28	-	(Zhai <i>et al.</i> , 2022)
CaCO <sub>3</sub> e resíduos de processamento de pedras ornamentais (SW)	CaCO <sub>3</sub> : 1-3% SW: 5-10%	75-90%	0-15 e 25- 100- CaCO <sub>3</sub> 0-100-(SW)	1,0 e 4,3	0,04 e 0,07	(Tramontin Souza <i>et al.</i> , 2022)
SiC e Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2,33	81,9	600 µm- 1.000 µm	3,9	0,089	(Ioana <i>et al.</i> , 2022)
Escória de alumínio	2,5-7,5	86	528 ± 200	~4 MPa	0,17	(El-Amir <i>et al.</i> , 2021)
Nano nitreto de alumínio -AlN	2,5-7,5	92,5 - 94,5	> 577	0,65-2,48	0,09 e 0,106	(Ewais <i>et al.</i> , 2018)
Sucata de bateria alcalina e carbonato de sódio	0,25-2,5	-	100-200	18,7	0,22-0,55	(Assefi <i>et al.</i> , 2021)
Casca de Arroz	3 a 25	80 e 84	71	1,1 e 1,8	0,068 e 0,082	(Teixeira <i>et al.</i> , 2017)
Resíduo de tabaco	45	36,7% - 83,5	160-250	2,1	0,087	(Santos <i>et al.</i> , 2018)
Conchas de ostras	9	81 a 91	500- 990	1,1±0,6 a 2,3±1,0	0,057±0,003 e 0,077±0,002	(Teixeira. <i>et al.</i> , 2017)

Fonte: Da autora (2024).

A Tabela 6 destaca uma variedade de agentes porogênicos e seus impactos nas propriedades finais das espumas vítreas. A porosidade das espumas vítreas na tabela varia significativamente, de 36,7 e 94,5%. Embora a maioria das espumas vítreas apresente porosidade acima de 65%, alguns materiais, como os produzidos com resíduo de tabaco, podem apresentar valores inferiores, refletindo características específicas do agente espumante e do processo de fabricação. Agentes como escória de alumínio, silicato de sódio e casca de ovo promovem porosidades elevadas, acima de 80%, resultando em materiais mais leves e porosos.

Espumas com porosidades superiores a 90% são indicadas para aplicações em isolamento térmico e acústico, onde a resistência mecânica não é o principal requisito.

Os tamanhos de poro apresentados na Tabela 6 variam de 20  $\mu\text{m}$  até mais de 12.000  $\mu\text{m}$ . Por exemplo, agentes como carbonato de cálcio e casca de arroz tendem a gerar poros maiores ( $>1000 \mu\text{m}$ ), enquanto agentes como carboneto de silício (em algumas composições) e fuligem de fábrica produzem poros menores, na faixa de 20 a 600  $\mu\text{m}$ .

A resistência mecânica das espumas vítreas varia consideravelmente, com valores que podem ir de menos de 0,2 MPa a até 11 MPa. enquanto espumas com agentes como silicato de sódio ou fuligem mostram valores mais baixos, entre 0,9 e 6,7 MPa, dependendo da porosidade e microestrutura. Espumas fabricadas com agentes como silicato de sódio e resíduos de tabaco apresentam as menores condutividades térmicas, indicativas de bom isolamento térmico. Já espumas com carboneto de silício tendem a ter condutividades térmicas um pouco maiores, em torno de 0,25 a 0,63 W/m·K.

### 3.6.2 Tipos de agentes espumantes: REDOX e Neutralização

A predominância de porosidade aberta ou fechada nas espumas vítreas é consequência do tipo de agente espumante empregado. Eles podem ser divididos em dois grupos: os agentes de redução-oxidação (REDOX) e os de neutralização. Os agentes do tipo REDOX são materiais que contém carbono em sua composição (coque, grafite, carvão de silício, antracito). A emissão de gás nestes materiais ocorre por meio da reação de oxidação do agente espumante com gases dissolvidos no vidro fundido, resultando em espumas com porosidade fechada (Spiridonov; Orlova, 2003). Estruturas de células fechadas proporcionam maior resistência mecânica e menor absorção de água, além de oferecerem excelente desempenho térmico. Por outro lado, sistemas de células abertas não são adequados para aplicações em construção civil devido à sua elevada permeabilidade e baixa durabilidade (König *et al.*, 2020) .

Já os agentes porogênicos de neutralização são geralmente carbonatos que se decompõem sob aquecimento, liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A intensa liberação de gás durante a decomposição do agente promove o rompimento das paredes de poros individuais e cria um sistema de labirinto de cavidades no vidro

fundido (Fernandes *et al.*, 2009) dando origem a espumas com porosidade predominantemente aberta (Spiridonov; Orlova, 2003).

### 3.6.3 Desvantagens e considerações ambientais

Uma das desvantagens dos agentes espumantes mais comuns utilizados na indústria é a emissão de  $\text{SO}_3$ , CO e  $\text{CO}_2$  durante o processo de sinterização. Esses gases contribuem para o efeito estufa e para a acidificação do ambiente, o que contrasta com os benefícios associados à produção de espumas vítreas a partir de resíduos. Para mitigar esses problemas, pesquisadores têm se concentrado no desenvolvimento de novos agentes porogênicos que não liberem gases de efeito estufa (Hesky *et al.*, 2015; Marangoni *et al.*, 2014). A etapa de sinterização permite o controle tanto da morfologia quanto do tamanho dos poros, por meio do ajuste da concentração dos reagentes iniciais e da temperatura e tempo de permanência nesta etapa (Duong-Viet *et al.*, 2016).

Pesquisadores têm explorado a utilização de diversos materiais de resíduos sólidos e agentes espumantes na preparação de espuma vítrea. Entre os agentes espumantes convencionais, destacam-se carbonatos (como  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) (Petersen *et al.*, 2014), carbono puro (Guo *et al.*, 2016), carboneto de silício (D'Amore *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2016) e assim por diante. Com o fato da liberação de gases de efeito estufa, alternativas como casca de ovo uma combinação de vidro de tubo de raios catódicos (CRT) com escória de alumínio e vidro de recipientes (Fernandes *et al.*, 2013), carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) ou compostos orgânicos, glicerol (Petersen; König; Yue, 2017) casca de arroz (Teixeira *et al.*, 2017), casca de ostra (Teixeira *et al.*, 2017) glicerol bruto (Sooksanen *et al.*, 2023) e carboneto de silício (SARI *et al.*, 2022).

### 3.6.4 Resíduo de mármore

As rochas ornamentais, como mármore e granitos, são utilizadas na construção civil, mas apresentam grande perda durante o beneficiamento. Em 2023, a produção dessas rochas no Brasil atingiu aproximadamente 10 milhões de toneladas, representando 7% da produção mundial (ABIROCHAS, 2024). O país se

destaca pela intensa atividade industrial voltada para a extração e o beneficiamento de materiais como granito, mármore, gnaiss e ardósia (Silveira *et al.*, 2017). No entanto, o processo de beneficiamento dessas rochas gera uma quantidade considerável de resíduos, que, quando descartados de forma inadequada, podem causar sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e da água (Lopes *et al.*, 2024).

Os blocos de rochas extraídos nas operações de mineração passam por cortes em folhas finas, realizados em equipamentos denominados teares, caracterizando o beneficiamento primário. Durante essa etapa, cerca de 20 a 30% do bloco, em volume, é convertido em rejeito. Considerando a produção de 2023, que foi de 10 milhões de toneladas como produto final, os 20 a 30% de rejeito correspondem a um volume inicial de extração estimado entre 12,5 e 14,3 milhões de toneladas, gerando aproximadamente 2,5 a 4 milhões de toneladas de resíduos (Almada, Santos e Souza, 2022).

As rochas ornamentais carbonáticas, ricas em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), geram um subproduto significativo durante os processos de extração e beneficiamento: o pó de mármore, que representa cerca de 25% de todos os resíduos do setor (Barbosa *et al.*, 2022; Bezerra, 2017). Este resíduo fino é frequentemente descartado em pátios de marmorarias ou aterros, ocasionando impactos como alteração das paisagens naturais, poluição visual e assoreamento de cursos d'água (Barbosa *et al.*, 2022). A calcinação do resíduo de mármore gera o mármore calcinado, cuja composição química, conforme a Tabela 7, evidencia que o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) é o componente predominante, com valores variando entre 42,13% e 75,7%, dependendo da origem da amostra. Além disso, o  $\text{CO}_2$  liberado durante o processo de calcinação pode ser aproveitado na fabricação de novos materiais, como as espumas vítreas, contribuindo para a sustentabilidade do processo. A perda ao fogo (P.F.), que varia de 3,5% a 46,04%, corresponde à fração de material volátil liberada durante a calcinação, principalmente  $\text{CO}_2$  proveniente da decomposição do carbonato de cálcio.

Tabela 7: Composição química do resíduo de Mármore Calcinado (% em peso).

<b>Óxido</b>	<b>Ref.1 (%)</b>	<b>Ref. 2 (%)</b>	<b>Ref.3 (%)</b>	<b>Ref.4 (%)</b>	<b>Ref.5 (%)</b>	<b>Ref.6 (%)</b>
<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	0,67	8.1	1,00	0,18	44,10	0,93
<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	0,12	0,70	0,36	0,67	2.20	0,36
<b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	0,08	0,70	-	0,44	2,98	0,16

<b>CaO</b>	54,43	44,30	75,70	51,70	42,13	55,3
<b>MgO</b>	0,59	5,60	0,26	0,40	3,72	1,25
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,14	0,01	-	-	0,08	0,07
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,02	0,03	-	0,21	0,09	-
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,01	0,04	0,06	0,08	-	-
<b>Outros</b>	0,54	0,02	0,02	-	-	7,05
<b>P. F. (%)</b>	43,40	40,50	22,60	46,04	3,50	42,0

Fonte: (1) Aruntaş *et al.*, (2010), (2)Aydin; Arel. (2019), (3)Montero *et al.* (2009), (4)Ergün, (2011), (5)Rodrigues *et al.* (2015), (6)Eliche-Quesada *et al.* (2012).

Estudos têm investigado o uso de resíduos de mármore em diferentes contextos industriais. Em porcelanas, essa adição influencia a formação de poros e pode alterar a resistência mecânica do produto final, conforme demonstrado por Chinelatto *et al.* (2015). De forma semelhante, foi avaliada a substituição parcial da argila por pó de mármore em tijolos cerâmicos, cujos resultados indicaram que o aumento do conteúdo de pó de mármore promoveu redução da densidade, além do aumento da absorção de água e da porosidade (Sufian *et al.*, 2021) .

### 3.7 APLICAÇÕES DAS ESPUMAS VÍTREAS

As espumas vítreas estão se destacando em diversos segmentos, especialmente na construção civil, devido às suas características inovadoras. Com baixo peso, alta resistência, baixa condutividade térmica, incombustibilidade e resistência à corrosão, a espuma vítrea é utilizada como material de isolamento térmico e acústico. As aplicações da espuma vítrea são diversas, incluindo o uso como blocos de construção para isolar telhados, paredes internas, pisos e tetos em condições de alta ou baixa temperatura, além de sua aplicação em materiais de infraestrutura e isolamento térmico e acústico de edificações. O método de fabricação da espuma vítrea varia de acordo com a aplicação específica, resultando em um composto leve e poroso (Souza *et al.*, 2017).

As propriedades versáteis da espuma vítrea contribuíram para seu uso em diversas aplicações na construção civil, incluindo oleodutos e gasodutos, fundações ferroviárias, barragens, bases de estradas e rodovias, entre outros (Lenart; Kaynia, 2019; Marquez; Singh; Maharaj, 2021; Osfouri; Simon, 2023; Owoeye *et al.*, 2020). A espuma vítrea é um material de adaptação, o que significa que podem produzi-lo como material poroso de poros abertos ou fechados de acordo com a aplicação desejada (Wang, Chi e Niu, 2023).

Para aplicações na construção civil, as propriedades fundamentais dos materiais de isolamento são a densidade e a condutividade térmica, que geralmente devem ser inferiores a  $300 \text{ kg/m}^3$  e  $0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , respectivamente (Fernandes; Tulyaganov; Ferreira, 2009; König *et al.*, 2020) . A Tabela 8 apresenta uma relação de possíveis aplicações de espumas vítreas, considerando suas propriedades tecnológicas de interesse.

Tabela 8:Propriedades e área de aplicação da espuma vítrea.

<b>Propriedades</b>	<b>Possíveis Aplicações</b>
Baixa condutividade térmica	-Isolamento térmico em construções civis e industriais espuma vítrea reduz o consumo de materiais de construção; -Isolamento térmico em tubulações e encanamentos de gás.
Baixa densidade combinada com alta resistência mecânica	-Carga baixa na base da construção (para construções realizadas em solos frágeis); -Telhados termicamente isolantes que não precisam ser substituídos com o uso; -Materiais de construção para pontes ou outros materiais flutuantes.
Incombustibilidade	-Isolante térmico em construções de edifícios; -Construções utilizadas como barreiras contra fogo; -Isolamento de tubulações e de vários equipamentos que trabalham em temperaturas acima de $600^\circ\text{C}$ .
Trabalhabilidade	-Ao contrário dos materiais isolantes térmicos convencionais (concreto celular, espuma polimérica), a espuma vítrea combina bem com argamassa de sílica-alumina (concreto com cimento branco); -É facilmente cortada, podendo ser perfurada, pregada, colada.
Material altamente resistente à corrosão e quimicamente inerte	-Fabricação de isolantes térmicos/acústicos reutilizáveis; -Não sofre contração (estabilidade dimensional); -Utilizada em construções de tubulações e tanques para ácidos e petróleo.
Baixa condutividade térmica	-Isolamento térmico em construções civis e industriais espuma vítrea reduz o consumo de materiais de construção; -Isolamento térmico em tubulações e encanamentos de gás.
Compatibilidade ambiental	-Indicado para construções de tanques e tubulações nas indústrias farmacêutica e alimentícia.

Fonte: Ketov (2001).

### 3.7.1 Vantagens em relação aos materiais tradicionais

O mercado de isolantes térmicos é predominantemente composto por espumas poliméricas (como EPS e PU) e materiais fibrosos. Apesar de apresentarem

baixa condutividade térmica, esses materiais são derivados de fontes não renováveis e apresentam limitações de desempenho, como elevada inflamabilidade, instabilidade em ambientes úmidos e significativa carga ambiental associada ao ciclo de vida (Densley Tingley; Hathway; Davison, 2015; Schiavoni *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a espuma vítrea representa uma alternativa sustentável, uma vez que é produzida majoritariamente a partir de resíduos vítreos, sendo totalmente incombustível, resistente à umidade, agentes biológicos e degradação química. Além disso, apresenta elevada estabilidade térmica e longa vida útil, sem liberação de subprodutos tóxicos ou perda significativa de desempenho ao longo do tempo (Horonko; Tihomirovs; Korjakins, 2025).

A espuma vítrea tem propriedades que o tornam versátil, podendo atuar como isolante térmico ou acústico, além de apresentar rigidez suficiente para ser utilizada como elemento estrutural em determinadas aplicações (Horonko; Tihomirovs; Korjakins, 2025).

### 3.7.2 Espumas vítreas na construção civil

O isolamento térmico é aplicado em paredes, coberturas e sistemas de piso com o objetivo de reduzir a transferência de calor, estabilizando a temperatura interna dos ambientes e diminuindo o consumo energético associado à climatização. A crescente demanda por eficiência energética em edificações e processos industriais tem intensificado a busca por materiais isolantes com menor impacto ambiental ao longo de seu ciclo de vida, o que favorece o desenvolvimento de alternativas sustentáveis. Nesse contexto, as espumas vítreas têm se destacado como materiais isolantes porosos produzidos majoritariamente a partir de resíduos de vidro reciclado, permitindo simultaneamente o reaproveitamento de resíduos e a redução da dependência de matérias-primas convencionais, sem comprometer o desempenho térmico (Owoeye *et al.*, 2020).

Além do excelente desempenho térmico, as espumas vítreas também apresentam uma capacidade de absorção sonora eficiente, por sua estrutura celular porosa com poros interconectados, que favorece a dissipação de energia acústica. Essa característica, aliada à estabilidade em altas temperaturas, torna o material adequado para aplicações que exigem isolamento termoacústico em ambientes urbanos e industriais. (D'Amore *et al.*, 2017) .

A utilização de espumas vítreas também tem sido investigada como alternativa sustentável para materiais de infraestrutura, especialmente no concreto. A construção civil apresenta crescente interesse na substituição parcial de agregados por resíduos reciclados, visando reduzir impactos ambientais sem comprometer o desempenho e a durabilidade dos materiais (Khan *et al.*, 2017). A incorporação da espuma vítrea como substituição parcial de agregados graúdos pode reduzir a extração de recursos naturais, além de reutilizar resíduos vítreos descartados, contribuindo para uma cadeia produtiva mais sustentável (Silva Fernandes *et al.*, 2019).

### 3.7.3 Uso de espumas vítreas no setor cerâmico

No setor cerâmico, o uso de matérias-primas alternativas tem ganhado relevância diante da necessidade de reduzir o consumo energético e os impactos ambientais associados aos processos produtivos (Zeschky, 2003). Estudos têm investigado materiais capazes de atender a essas demandas, incluindo placas cerâmicas porosas, compósitos à base de vidro e ligas metálicas como alumínio. Entre os materiais tradicionalmente utilizados na produção de estruturas porosas destacam-se alumina, mulita, carbetos de silício e zircônia, devido à sua estabilidade térmica e resistência mecânica. Entretanto, a literatura também aponta a viabilidade de produzir materiais porosos a partir de matrizes vítreas, ampliando o potencial de aproveitamento de resíduos e reduzindo o custo de fabricação (Liu, 1997).

Nos últimos anos, o uso de cerâmicas vítreas porosas tem se expandido significativamente, devido à sua estrutura leve e altamente porosa (Ibrahim *et al.*, 2023). Apesar da baixa densidade, essas cerâmicas apresentam desempenho mecânico notável, além de alta resistência ao ataque químico e propriedades incombustíveis, características que as tornam ainda mais atrativas para uma variedade de aplicações (Scheffler; Colombo, 2005).

Esse material tem se destacado especialmente em soluções de isolamento térmico e acústico (Chinnam *et al.*, 2013). Pode ser utilizado, por exemplo, em painéis de partição leves, isolamento de paredes externas e internas, e materiais para locais exclusivos. Comparadas às espumas poliméricas convencionais, as cerâmicas vítreas porosas se destacam em diversos aspectos, especialmente em termos de

propriedades mecânicas, como resistência à compressão e à flexão, além de uma excelente resistência ao fogo (Marangoni *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2014).

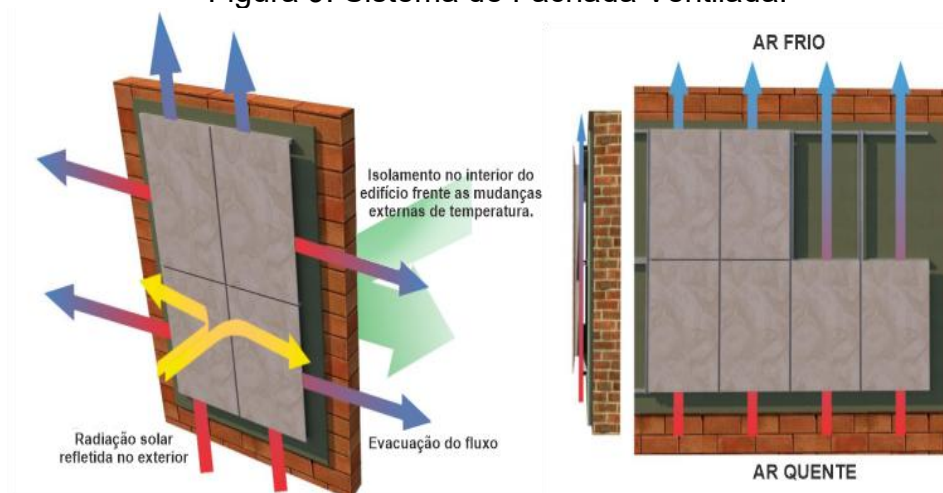
### 3.8 SISTEMA FACHADA VENTILADA

#### 3.8.1 Introdução ao Sistema de Fachada Ventilada

A fachada ventilada é considerada uma solução construtiva sustentável, que permite uma nova abordagem arquitetônica, que alia inovação e eficiência energética, tanto do ponto de vista estético, como funcional. É um elemento fundamental para a valorização de um edifício, otimizando os custos de exploração e manutenção, e funciona como um sistema de proteção e revestimento do envolvente exterior que auxilia na melhora do conforto térmico e acústico, na manutenção dos níveis de desempenho ambiental e estrutural (Balter; Miranda-Gassull; Discoli, 2021; Pizzatto *et al.*, 2021).

Conforme mostrado na Figura 9, o princípio fundamental das fachadas ventiladas é seu sistema de juntas abertas, que permite um afastamento entre as placas de revestimento externo e a base suporte do edifício. Por meio dessa câmara de ar ocorre a ventilação pelo efeito chaminé, onde o ar frio entra pela parte inferior e o ar aquecido é removido pela parte superior, permitindo ventilação contínua no sentido vertical (Althof; Passold; Marques, 2021; Silva; Thomaz; Oliveira, 2018).

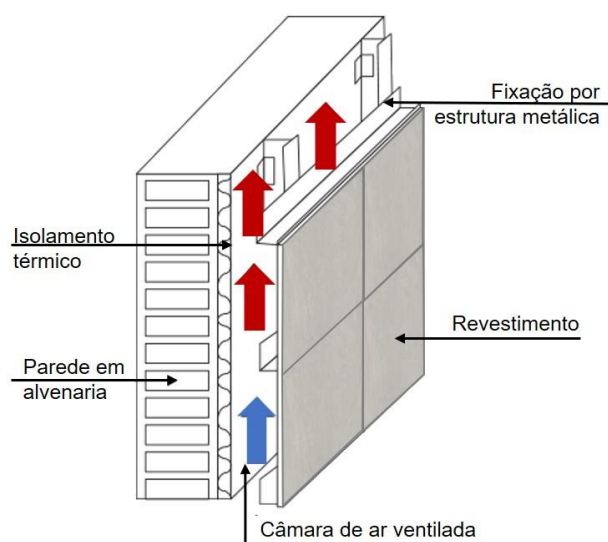
Figura 9: Sistema de Fachada Ventilada.



Fonte: Althof, Passold e Marques (2021).

Atualmente, contém variedade de materiais pode ser empregada no revestimento, como painéis de fibrocimento, alumínio composto, placas de pedras naturais (mármore e granito), chapas metálicas e porcelanatos (Silva; Thomaz; Oliveira, 2018). Na parede externa para fixação utilizam-se elementos metálicos resistentes à corrosão. A Figura 10 mostra as placas cerâmicas em fachadas ventiladas, a sustentação é feita por meio de uma estrutura metálica, a qual é ancorada à parede de suporte com o uso de dispositivos como parafusos chumbadores (Müller e Alarcon, 2005).

Figura 10: Componentes da fachada ventilada.



Fonte: Adaptado de Müller e Alarcon (2005)

A fachada ventilada apresenta um grande potencial para a aplicação da espuma vítrea. Devido à sua propriedade leve e porosa, a espuma vítrea é adequada para a composição de um revestimento cerâmico poroso. Sua estrutura reduz o peso total do sistema, facilitando a instalação e o manuseio, além de aprimorar a eficiência térmica da fachada, tornando-a uma solução prática e eficiente (Pizzatto *et al.*, 2021).

### 3.8.2 Cerâmicas porosas em sistemas de fachadas ventiladas

Estudos recentes têm demonstrado que o sistema de fachadas ventiladas com revestimentos porosos apresenta vantagens significativas em relação a sistemas tradicionais, tanto no desempenho térmico quanto na eficiência estrutural.

No estudo de Pizzatto *et al.* (2021, Part I) placas cerâmicas porosas foram produzidas utilizando subprodutos como lama de cal e basalto, obtendo-se porosidade de até 42,6% e resistência à flexão de 5,1 MPa, demonstrando que foi possível combinar elevada porosidade com desempenho mecânico adequado para aplicação em fachadas ventiladas. Na sequência, em Pizzatto *et al.* (2021, Part II) foi avaliado o desempenho térmico dessas placas, mostrando que a amostra mais porosa apresentou melhor isolamento térmico do que uma placa cerâmica comercial, evidenciando o benefício direto do revestimento poroso na redução da carga térmica do edifício.

Além disso, Pomaranzi *et al.* (2020) investigaram fachadas de dupla pele porosa e demonstraram que a camada porosa externa reduz as pressões de pico induzidas pelo vento sobre a fachada interna, contribuindo para maior durabilidade e segurança estrutural do sistema.

Dessa forma, a literatura evidencia que o uso de revestimentos porosos em fachadas ventiladas combina eficiência térmica, desempenho mecânico e redução de cargas estruturais, tornando-se uma estratégia promissora para edifícios de alto desempenho e sustentabilidade.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

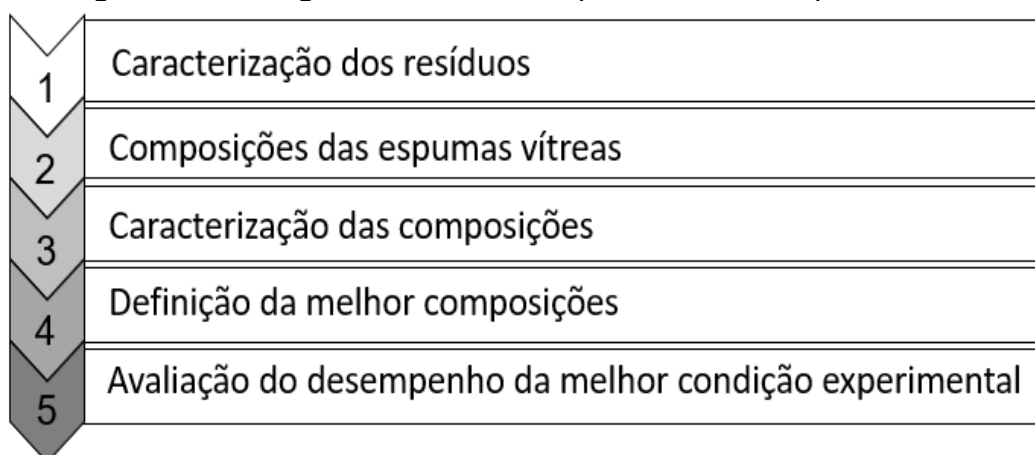
### 4.1 MATERIAIS

Neste trabalho, as matérias-primas utilizadas na fabricação das placas cerâmicas porosas foram resíduos de vidro soda-cal (sódico-cálcico), especialmente cacos de vidro planos. Os resíduos de mármore foram incorporados à matriz vítrea como agente formador de poros, em virtude da decomposição térmica do  $\text{CaCO}_3$  e da subsequente liberação de  $\text{CO}_2$ . O vidro plano foi fornecido por uma vidraçaria local, enquanto os resíduos de mármore foram fornecidos pela empresa Pedecril, localizada em Criciúma-SC. Para fins de comparação no ensaio de condutividade térmica, utilizou-se como material de referência o porcelanato Serra Areia (Elizabeth, Grupo Mohawk), utilizado como parâmetro para avaliação do desempenho térmico das espumas vítreas desenvolvidas.

### 4.2 MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os procedimentos realizados na obtenção e preparação das matérias-primas e da caracterização das espumas vítreas. A Figura 11 apresenta o fluxograma referente ao procedimento experimental adotado neste trabalho, com posterior descrição de tais etapas.

Figura 11: Fluxograma referente ao procedimento experimental.



Fonte: Da autora (2026).

#### 4.2.1 Preparação inicial das matérias-primas

Os cacos de vidro plano (Figura 12) foram lavados e secos em estufa (CE-220/100, CienlaB), a  $100 \pm 15$  °C por 24 h. Em uma etapa posterior os cacos secos foram fragmentados com auxílio de um moinho gira jarros (Certech/ CT-240), contendo bolas de alumina (diâmetros entre 19 e 21 mm) durante 6 h.

Figura 12: Fotografias mostrando o aspecto morfológico do resíduo de vidro (cacos) como matéria-prima (a) antes e após a moagem (b).



Fonte: Da autora (2026).

Os resíduos de mármore (Figura 13) também foram lavados e secos em estufa (CE-220/100, CienlaB), a  $100 \pm 15$  °C por 24 h. Posteriormente, fragmentados com auxílio de um moinho gira jarros (Certech/ CT-240), contendo bolas de alumina (diâmetros entre 19 e 21 mm) durante 6 h.

Figura 13: Fotografias mostrando o aspecto morfológico do resíduo de mármore como matéria-prima antes (a) e após a moagem (b).



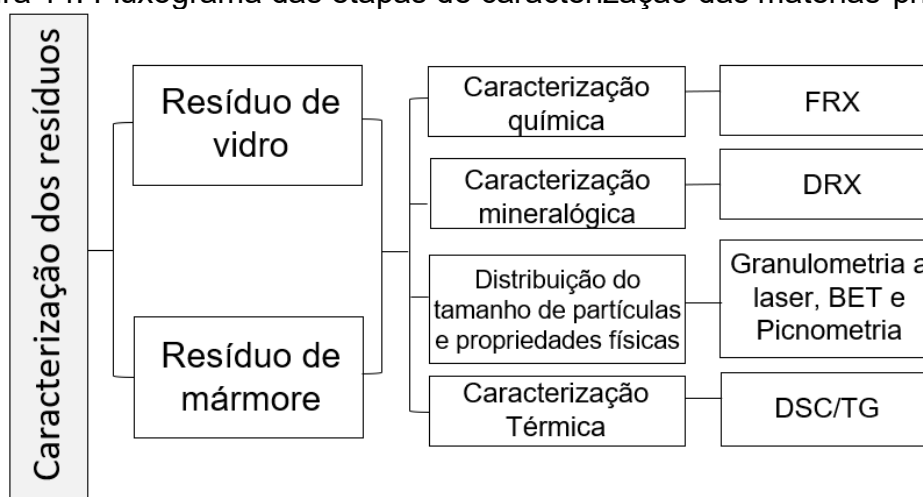
Fonte: Da autora (2026).

A quantidade de amostra a moer e a carga de bolas foram calculadas de modo que a soma representasse 75% do volume útil do moinho, sendo a carga de bolas correspondente a 50% do volume útil, utilizando bolas de alumina com diâmetros entre 19 e 21 mm. De acordo com a literatura, os tamanhos iniciais dos pós devem ser inferiores a 4 mm (Scheffler; Colombo, 2005). Posteriormente, os pós obtidos foram peneirados em malha 325 mesh (diâmetro inferior a 45  $\mu\text{m}$ ) e o procedimento foi realizado no Centro de Caracterização de Materiais (CECAM Multi), localizado no Parque Científico e Tecnológico da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

#### 4.2.2 Caracterização das matérias primas

A primeira etapa refere-se à caracterização das matérias-primas. O fluxograma apresentado a seguir na Figura 14 resume as etapas realizadas, e os ensaios empregados foram descritos nos tópicos subsequentes.

Figura 14: Fluxograma das etapas de caracterização das matérias-primas.



Fonte: Da autora (2026).

##### 4.2.2.1 Caracterização química

A análise química dos componentes foi realizada por meio de espectroscopia por fluorescência de raios X (Panalytical, Axios Max), para a identificação dos óxidos presentes. As análises foram conduzidas no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Senai de Criciúma.

#### 4.2.2.2 Caracterização mineralógica

Os resíduos de vidro e mármore foram analisados mineralogicamente para identificação das fases cristalinas presentes, por meio de difração de raios X (DRX), utilizando um difratômetro (Bruker – D8 com goniômetro theta–theta). A radiação utilizada foi Cu K $\alpha$ , com tensão de 40 kV e corrente de 40 mA. A varredura foi realizada no intervalo de 4° a 72° (2 $\theta$ ), com velocidade de 2 s para cada passo de 0,02° do goniômetro. As análises foram conduzidas no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM) do Senai de Criciúma.

#### 4.2.2.3 Distribuição do tamanho de partículas e propriedades físicas dos pós

O tamanho das partículas dos resíduos, após moagem, foi determinado por análise granulométrica por difração a laser, utilizando o equipamento PSA 1064 (CILAS).

A densidade real,  $\rho_{real}$  (g/cm<sup>3</sup>), foi obtida por picnometria a gás hélio (Quantachrome Ultrapyc 1200e), determinada a partir do pó de resíduo de vidro e mármore. O volume real do sólido foi determinado pela variação da pressão de gás em uma câmara de volume conhecido, técnica que pode ser utilizada mesmo para sólidos porosos. A densidade real foi medida para cada porcentagem de composição. Cinco leituras foram realizadas em cada caso.

A caracterização da área superficial específica das amostras foi realizada pelo método BET (Brunauer–Emmett–Teller), com adsorção de N<sub>2</sub> (Nitrogênio) a baixa temperatura, a fim de quantificar a área superficial específica. Essa propriedade está diretamente relacionada ao tamanho de partícula e ao grau de porosidade do material.

Os ensaios foram executados no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec).

#### 4.2.2.4 Comportamento térmico

O comportamento térmico dos resíduos foi investigado por meio de análises termogravimétricas (ATG) juntamente à calorimetria diferencial por varredura (DSC), utilizando o equipamento (NETZSCH STA 449F3). Utilizou-se cadinhos de alumina,

com cadinho vazio do mesmo material como referência, garantindo a correção do sinal de fundo térmico. O ensaio foi conduzido sob atmosfera de argônio, na faixa de 35 a 1300 °C, com taxa de aquecimento de 10 K/min, permitindo a obtenção simultânea das curvas de ATG e DTA. O ensaio foi executado no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Laboratório de Caracterização de Materiais - CECAM - LAMAT II.

#### 4.2.3 Definição e caracterização das composições

As composições usadas como base neste trabalho têm como referência o estudo de Teixeira *et al.* (2017). Foram formuladas composições contendo resíduos de vidro plano em combinação com teores de resíduo de mármore em diferentes proporções (1; 3; 4,5; 6; 9; 12 e 15%) com 99 a 85% de vidro (em massa). O sistema (vidro + mármore) totalizou sete composições, conforme descrito na Tabela 9.

Tabela 9: Composições formuladas com resíduo de vidro plano e mármore.

<b>Composição</b>	<b>Teor de Mármore (%)</b>	<b>Resíduo de Vidro (%)</b>
VM1	1	99
VM 3	3	97
VM 4,5	4,5	95,5
VM 6	6	94
VM 9	9	91
VM 12	12	88
VM 15	15	85

Fonte: Da autora (2026).

Após a definição das composições, realizou-se a análise do comportamento térmico e, em seguida, a preparação das amostras das composições formuladas.

#### 4.2.4 Comportamento térmico das composições

Os materiais (resíduo de vidro e de mármore) foram pesados individualmente, conforme as proporções estabelecidas, utilizando uma balança analítica de precisão (SHIMADZU AUY 220). Em seguida, os componentes de cada composição foram homogeneizados a seco por aproximadamente 2 min em almofariz,

garantindo uma mistura uniforme. Esse procedimento foi repetido para todas as amostras.

O comportamento térmico do resíduo de vidro e das composições formuladas foi determinado utilizando um dilatômetro óptico (ES Expert System Solutions S.R.L, Misura HSM ODHT) a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de ar. Os ensaios foram executados no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec).

#### 4.2.5 Conformação e queima

Pra se obter os resultados preliminares, as massas cerâmicas foram preparadas pelo processo via seca, em conformidade com o processamento cerâmico tradicional. Inicialmente, as matérias-primas foram secas e caracterizadas, sendo as composições apresentadas na Tabela 9 dosadas por pesagem.

Na etapa de umidificação, foi adicionada água (7%) com o auxílio de um pulverizador, a fim de promover a granulação das amostras de pós. Em seguida, o material foi peneirado em malha de 32 mesh (abertura de 0,5 mm) e homogeneizado manualmente por aproximadamente 3 min, até obtenção de uma massa uniforme. A conformação dos corpos de prova (120x20x8 mm) foi realizada por prensagem manual em prensa hidráulica (Servitech/ 2X12-1S), sob pressão de 10 MPa. Após a prensagem, os corpos cerâmicos foram secos em estufa de laboratório (Odontobras/EL-1.3) a 80 °C durante 24 h. Esta etapa foi executada no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Laboratório de Caracterização de Materiais - CECAM - LAMAT II.

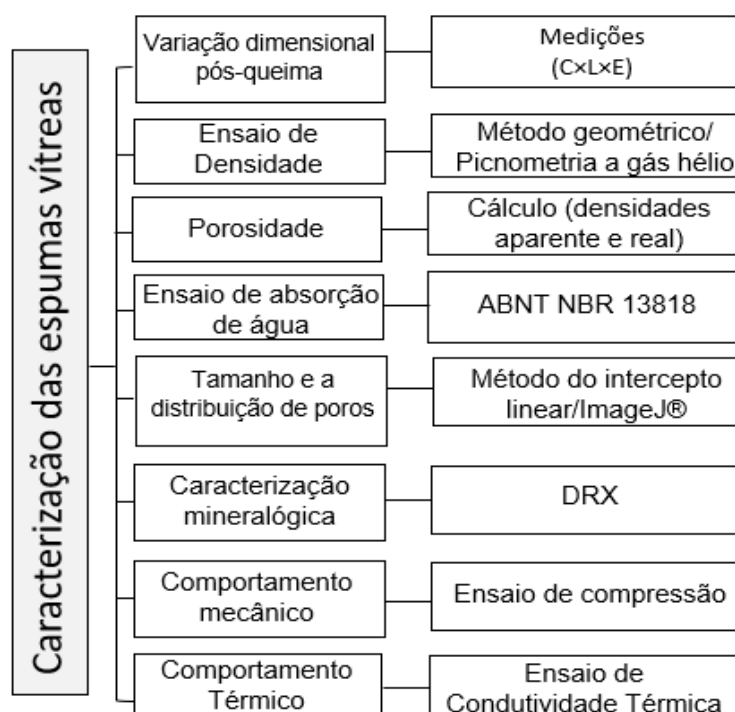
A composição selecionada passou por processo de queima em forno de queima rápida (FORTELAB, modelo ME-1700/10). As temperaturas de queima foram definidas com base nas análises térmicas, sendo adotado o valor de 950 °C por corresponder à faixa em que todas as composições apresentaram comportamento térmico estável, com completa decomposição do  $\text{CaCO}_3$  e viscosidade adequada da fase vítrea, permitindo expansão homogênea sem colapso estrutural. Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, com tempo de patamar de 30 min na temperatura máxima. Após a queima, as placas cerâmicas porosas foram submetidas à caracterização. O processo de queima foi realizado no Parque Científico e

Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, no Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM – LAMAT II).

#### 4.2.6 Caracterização das espumas vítreas

A caracterização das placas de espumas vítreas foi realizada por meio de diferentes ensaios, visando avaliar suas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e microestruturais. O fluxograma a seguir (Figura 15) apresenta de forma resumida a sequência dos procedimentos adotados.

Figura 15: Fluxograma da etapa de caracterização das placas de espumas vítreas.



Fonte: Da autora (2026).

##### 4.2.6.1 Variação dimensional pós-queima

Os corpos de prova foram conformados por prensagem uniaxial utilizando matriz metálica (Servitech 2X12-1S), cujas dimensões internas definem o formato geométrico das amostras. Todas as composições foram moldadas com dimensões iniciais padronizadas conforme apresentado na Tabela 10, a fim de garantir uniformidade geométrica entre as formulações e permitir a comparação adequada da variação dimensional após o tratamento térmico.

Tabela 10: Dimensões iniciais dos corpos de prova

Teor de Mármore (%)	Amostra	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
1;3; 4,5; 6;9;12;15	1,2,3	120	20	8

Fonte: Da autora (2026).

Para a análise da variação dimensional, foram avaliadas amostras contendo 1; 3; 4,5; 6; 9;12 e 15% de resíduo, sendo preparados três corpos de prova para cada porcentagem (amostras 1, 2 e 3). Devido à irregularidade geométrica das peças após a queima, as dimensões de largura e espessura foram determinadas a partir da média de múltiplas medições. O comprimento, por sua vez, foi medido uma única vez por amostra, uma vez que não se observou variação significativa nessa direção. Para a largura e a espessura, realizaram-se três medições em regiões distintas de cada corpo de prova. Em seguida, calculou-se a média do comprimento das três amostras, enquanto para a largura e a espessura, inicialmente calculou-se a média das três medições de cada amostra e, posteriormente, a média total entre as três amostras. Este procedimento foi repetido para todas as porcentagens analisadas, assim pode-se ter um valor de comprimento, largura e espessura padrão de cada porcentagem.

A variação dimensional (equação 1) das amostras após a queima foi avaliada comparando-se as medidas antes e após o processo térmico. Essa abordagem permite quantificar, em porcentagem, a retração ou a expansão ocorrida durante a queima, fornecendo informações importantes sobre a estabilidade dimensional do material e o efeito do processo térmico sobre suas dimensões.

$$\Delta L = \frac{C_{Inicial} - C_{Final}}{C_{Inicial}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:  $C_{Inicial}$  é comprimento antes da queima do corpo de prova,  $C_{Final}$  é o comprimento depois da queima do corpo de prova e  $\Delta L/L_0$  é a variação dimensional (%) quanto o material se deformou em relação ao comprimento original.

Com base na dimensão inicial (antes da queima) e na dimensão final (após a queima) dos corpos de prova, foi possível calcular o volume,  $V$  ( $\text{mm}^3$ ) de cada

porcentagem de amostra (1; 3; 4,5; 6; 9;12 e 15%) utilizando a seguinte equação 2 a seguir:

$$V=C \times L \times E \quad (2)$$

Em que: C é o comprimento médio, L é a largura média e E é a espessura média da amostra em mm.

#### 4.2.6.2 Ensaio de densidade e porosidade

A densidade aparente,  $\rho_{ap}$  (g/cm<sup>3</sup>), foi determinada por meio do método geométrico. Para isso, as dimensões das amostras foram obtidas com o uso de um paquímetro (MTX®, modelo 316119, 0–150 mm,  $\pm 0,03$  mm) realizando-se três medições por dimensão. A massa de cada corpo de prova foi medida em balança de precisão (Marte Científica, UX6200H), com precisão de 0,01 g. Com esses dados, a densidade aparente foi calculada utilizando a equação 3 a seguir:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Em que: m é a massa corpo de prova (g) e v o volume corpo de prova (cm<sup>3</sup>).

A densidade real,  $\rho_{real}$  (g/cm<sup>3</sup>), foi obtida por picnometria a gás hélio (Quantachrome Ultrapyc 1200e), calculada a partir do pó triturado das amostras queimadas. O volume real do sólido foi determinado pela variação da pressão de gás em uma câmara de volume conhecido, técnica que pode ser utilizada mesmo para sólidos porosos. A densidade real foi medida para cada porcentagem de composição (1; 3; 4,5; 6; 9;12 e 15%). Cinco leituras foram realizadas em cada caso.

A porosidade total,  $\varepsilon_t$ , foi então calculada por meio da relação entre a densidade aparente a seco e a densidade real, utilizando equação 4 a seguir:

$$\varepsilon_t = \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:  $\rho_a$  é a densidade aparente a seco do corpo de prova e  $\rho_r$  é a densidade real (massa específica) do material (sem poros).

O método geométrico foi realizado no Laboratório de Cerâmica Técnica (CerTec), localizado no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), enquanto o ensaio de picnometria a gás hélio foi conduzido no Laboratório de Materiais Vitrocerâmicos (VITROCER) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

#### 4.2.6.3 Ensaio de absorção de água

A determinação da absorção de água das placas de espumas vítreas foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio, Anexo B, no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Laboratório de Caracterização de Materiais - CECAM - LAMAT II.

Os ensaios foram conduzidos considerando amostras inteiras e amostras cortadas, utilizando 14 corpos de prova, de modo a refletir diferentes formas de aplicação da espuma vítrea. As amostras inteiras representam o material na forma de placas, cuja superfície externa pode receber acabamento, conferindo propriedades estéticas e funcionais. Por sua vez, as amostras com corte simulam o uso da espuma vítrea como núcleo interno em sistemas sanduíche.

O ensaio foi realizado para amostras contendo 1; 3; 4,5; 6; 9;12 e 15% de resíduo de mármore, permitindo correlacionar a variação percentual do resíduo com a formação de poros e o comportamento de absorção do material. A absorção de água, Abs (%), foi calculada de acordo com a equação 5:

$$Abs (\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \quad (5)$$

Em que:  $m_1$  é a massa seca (g) e  $m_2$  a massa saturada (g).

#### 4.2.6.4 Tamanho e distribuição de poros

O tamanho e a distribuição dos poros das placas de espumas vítreas foram determinados por meio da contagem dos poros dentro dos intervalos de diâmetros

especificados, com base no método do intercepto linear (ASTM D3576-98). Nesse método, a relação entre o comprimento médio da corda ( $t$ ) e o diâmetro médio da esfera ( $D$ ) foi dada por  $D = 1,623 \cdot t$ , o que permitiu uma melhor representação da medição de uma estrutura 3D (poro) a partir de uma imagem 2D.

Para determinar o tamanho médio dos poros, utilizaram-se imagens das superfícies de fratura das espumas vítreas obtidas por microscópio estereoscópio Biotika, modelo L60. Em cada imagem, foram realizadas em média 50 medições com o auxílio do software ImageJ®, permitindo calcular posteriormente a média do comprimento dos poros para cada composição contendo 1; 3; 4,5; 6; 9; 12 e 15% de resíduo de mármore.

#### 4.2.6.5 Caracterização mineralógica

As análises de difração de raios X (DRX) foram realizadas no Parque Científico e Tecnológico (IParque) da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, no Laboratório de Caracterização de Materiais – CECAM (LAMAT II). Utilizou-se um difratômetro de raios X modelo D6 Phaser, da Bruker, operando com radiação  $\text{Cu K}\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ). As varreduras foram realizadas no intervalo angular de  $4^\circ$  a  $72^\circ$  ( $2\theta$ ), com passo de  $0,02^\circ$  e tempo de contagem de 2 s por passo. A identificação das fases cristalinas foi realizada com o auxílio do software X'Pert HighScore Plus® (Philips, Holanda).

#### 4.2.6.6 Comportamento mecânico das placas de espumas vítreas

O ensaio de resistência à compressão é utilizado para avaliar o desempenho mecânico de espumas cerâmicas, especialmente daquelas com alta porosidade superior a 80% (Huo *et al.*, 2018).

O comportamento mecânico das placas de espumas vítreas foi realizado no Parque Científico e Tecnológico – IParque da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto de Desenvolvimento Tecnológico (IDT), utilizando o equipamento de ensaios (EMIC, modelo DL 10000), de acordo com procedimento normatizado, com velocidade de carregamento de 1 mm/min e célula de carga de 5 kN. Os corpos de prova foram preparados em cubos de 25 mm × 25 mm, e todas as porcentagens de agente

espumante estudadas são testadas, permitindo comparar o efeito do teor de aditivo sobre a resistência mecânica do material.

#### 4.2.7 Definição da melhor condição experimental

A definição da melhor condição experimental foi realizada com base em uma análise comparativa dos resultados de porosidade total e resistência mecânica à compressão das sete composições de espumas vítreas estudadas. Todas as composições foram queimadas a 950 °C por 30 min.

Inicialmente, foram determinados os valores de porosidade total e resistência à compressão uniaxial para cada composição. Em seguida, os resultados obtidos foram organizados e correlacionados por meio de representação gráfica, permitindo avaliar simultaneamente o comportamento dessas propriedades em função do teor de mármore.

O critério de seleção da melhor composição considerou:

- A obtenção de porosidade elevada, visando aplicações em materiais cerâmicos porosos;
- Valores de resistência mecânica à compressão compatíveis com aqueles reportados na literatura para espumas vítreas comerciais;
- A busca por um equilíbrio entre porosidade e resistência mecânica à compressão, de modo a evitar composições com porosidade excessiva associada à baixa capacidade de suporte de carga, bem como composições com elevada resistência mecânica acompanhada de redução significativa da porosidade.

Com base nesses critérios, as composições foram comparadas entre si, e aquela que apresentou a melhor combinação entre porosidade e resistência à compressão, foi selecionada como a condição experimental mais adequada para o desenvolvimento da placa cerâmica porosa proposta neste trabalho.

Após a definição da melhor condição experimental, foram produzidos novos corpos de prova de espumas vítreas com dimensões de 120 mm × 60 mm × 3,5 mm, utilizando essa composição, com o objetivo de avaliar o desempenho das placas cerâmicas obtidas. A preparação da massa cerâmica e o processo de sinterização seguiram as etapas descritas no item 4.2.5. A conformação dos corpos de prova foi

realizada por meio de prensa hidráulica (Gabbrielli Technology, GT0785), sob pressão de 10 MPa.

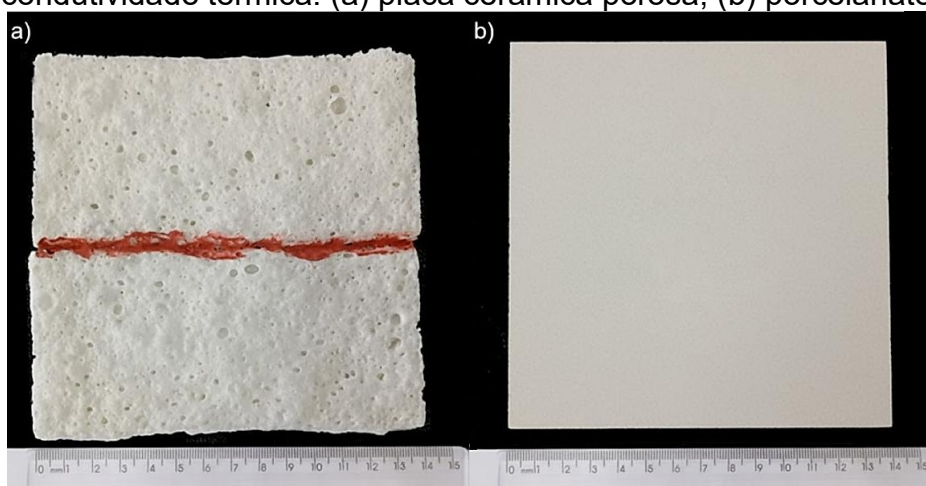
#### 4.2.7.1 Comportamento térmico

##### 4.2.7.1.1 Ensaio de condutividade térmica

Para a realização do ensaio de condutividade térmica, foi utilizado um equipamento experimental baseado no protótipo chamado Prototherm (Gomes, 2021), que foi realizado no Laboratório de Materiais do Instituto Politécnico de Viana do Castelo e com o apoio do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade do Minho, Portugal. O ensaio seguiu o procedimento interno baseado na norma ISO-9869 (2014) desenvolvido por estas duas instituições.

Com o equipamento Protherm adaptado, foi avaliada a condutividade térmica da amostra contendo 4,5 % de resíduo de mármore e de um revestimento cerâmico porcelanato Serra Areia (Elizabeth, Grupo Mohawk); os resultados foram posteriormente comparados. As placas de espuma vítrea foram ajustadas às dimensões necessárias para o equipamento, com medidas de 140 mm × 140 mm × 70 mm, conforme mostra a Figura 16. As análises foram realizadas em temperatura ambiente controlada, média de 20 °C, no Laboratório de Valorização de Resíduos e Economia Circular (LabV@lor-EC) da UNESC.

Figura 16: Fotografias mostrando as amostras cerâmicas utilizadas nos ensaios de condutividade térmica: (a) placa cerâmica porosa; (b) porcelanato.



Fonte: Da autora (2026).



Figura 18: Seção para colocação do corpo de prova.



Fonte: LabV@lor-EC (2026).

O monitoramento das temperaturas foi realizado por meio de termopares conectados a um dispositivo Picolog, responsável pelo registro contínuo da temperatura em função do tempo ao longo de todo o ensaio. Para a medição do fluxo de calor, foi utilizado um sensor de fluxo de calor acoplado a cada amostra, posicionado no mesmo lado do termopar 2, conforme indicado na Figura 18(a). A fixação do sensor de fluxo de calor às placas exigiu procedimentos específicos, incluindo a aplicação de uma pasta de contato térmico na área ativa do sensor. Adicionalmente, foi aplicada pasta térmica no centro das placas, com o objetivo de garantir a aderência do sensor e evitar deslocamentos ou desprendimentos durante o ensaio, conforme mostrado na Figura 18(b).

Figura 18: (a) Sensor de fluxo de calor; b) Fixação do sensor de fluxo à amostra.



Fonte: LabV@lor-EC (2026).

Inicialmente, a temperatura ambiente média em aproximadamente 20 °C foi ajustada. Em seguida, o controlador de temperatura do equipamento foi ajustado para manter a temperatura interna média da câmara quente em 70 °C. O sensor de fluxo de calor foi preparado com a aplicação da pasta de contato e fixado à amostra. Posteriormente, o corpo de prova foi posicionado na seção central do equipamento. A distância entre a amostra e o filamento da câmara fria foi ajustada para 100 mm. Quando necessário, a abertura lateral direita do equipamento foi utilizada para o ajuste do parafuso do filamento, garantindo a correta posição da amostra.

O ensaio foi iniciado somente após a estabilização tanto da temperatura ambiente (20 °C) quanto da temperatura interna do equipamento (70 °C). Cada teste teve duração média de 24 h, tempo necessário para garantir a estabilização do fluxo de calor através da amostra. Após a confirmação dessa condição, foram realizados três ensaios para cada amostra, sendo que, em cada ensaio, foram selecionadas faixas de valores constantes de fluxo de calor. A média dessas faixas foi calculada para obter um valor representativo de condutividade térmica por ensaio. Posteriormente, a média dos resultados dos três ensaios foi determinada, fornecendo o valor final de condutividade térmica do material.

A determinação da condutividade térmica das amostras foi realizada a partir da análise do fluxo de calor em regime estacionário e da diferença de temperatura entre as faces quente e fria do corpo de prova. Para isso, os cálculos foram conduzidos de forma sequencial, utilizando apenas os parâmetros necessários à obtenção da condutividade térmica do material.

Inicialmente, o fluxo de calor ( $Q$ ) foi obtido a partir das leituras fornecidas pelo sensor de fluxo de calor acoplado à amostra. Os sinais elétricos registrados, em microvolts ( $\mu\text{V}$ ), foram convertidos em fluxo de calor, em  $\text{W}/\text{m}^2$ , por meio do fator de calibração do sensor, conforme especificado pelo fabricante. Em seguida, foi calculada a diferença média de temperatura ( $\Delta T$ ) entre as faces quente e fria da amostra. Para isso, foram consideradas as temperaturas médias registradas pelos termopares posicionados nas câmaras quente e fria durante o intervalo de tempo em que o sistema atingiu o regime estacionário.

A resistência térmica da amostra ( $R_t$ ) foi então determinada pela razão entre a diferença média de temperatura e o fluxo de calor medido, conforme a relação 6:

$$R_t = \frac{\Delta T}{Q} \quad (6)$$

Em que:  $U$  é o coeficiente de transmitância térmica, em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ;  $Q$  é o fluxo de calor, em  $W/m^2$  e  $\Delta T$  é a diferença de temperatura, em  $^\circ C$ .

Para o cálculo do coeficiente de transmitância térmica, foi utilizada a Equação (7).

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_t + R_{se}} \quad (7)$$

Em que:  $U$  é o coeficiente de transmitância térmica, em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ;  $R_t$  é a resistência térmica, em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$  e  $R_{si}$  e  $R_{se}$  são as resistências térmicas das superfícies interna e externa da parede, respectivamente, em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$ .

Por fim, a condutividade térmica ( $\lambda$ ) do material foi calculada a partir da razão entre a espessura da amostra ( $e$ ) e a resistência térmica obtida, de acordo com a equação 8:

$$\lambda = \frac{e}{R_t} \quad (8)$$

Em que:  $\lambda$  é a condutividade térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ );  $e$  é a espessura da amostra (m) e  $R_t$  a resistência térmica ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )

Tanto a ISO 9869 (2014) quanto a ISO 6946 (2017) descrevem modelos matemáticos para determinar a resistência térmica de paredes com base na análise dinâmica de dados experimentais. Essas medições usam propriedades térmicas, como resistência térmica, transmitância térmica, fluxo de calor e capacidade térmica, com o objetivo de entender o desempenho do material como elemento isolante térmico.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A caracterização das matérias-primas utilizadas é uma etapa essencial para o desenvolvimento de espumas vítreas com potencial aplicação em sistemas de fachada ventilada, uma vez que o desempenho térmico e mecânico do material final está diretamente associado às propriedades intrínsecas dos resíduos e ao seu comportamento durante o processamento térmico. Em fachadas ventiladas, os materiais devem apresentar baixa densidade, estabilidade dimensional e microestrutura porosa estável, capazes de reduzir a capacidade de transferir calor. Assim, este capítulo apresenta uma análise das características físicas, químicas, mineralógicas e térmicas dos resíduos, fornecendo subsídios fundamentais para compreender e controlar os mecanismos de formação da espuma vítrea, a fim de verificar se os resíduos selecionados possuem propriedades adequadas para a formação de espumas vítreas e se são compatíveis com a aplicação pretendida em sistemas de fachada ventilada.

#### 5.1.1 Caracterização química

A caracterização química das matérias-primas constitui uma etapa necessária na produção de placas cerâmicas porosas para fachadas ventiladas, pois permite avaliar a composição dos resíduos e prever seu comportamento durante a sinterização e a geração de poros. A determinação dos teores de óxidos e da Perda ao Fogo (PF) permite garantir estabilidade térmica, integridade estrutural e uniformidade da porosidade das placas. Tais propriedades exercem influência direta sobre o desempenho do sistema de fachada ventilada, afetando o isolamento térmico, a leveza do material e a eficiência energética.

As Tabelas 11 mostram os resultados das análises químicas referentes ao resíduo de vidro e resíduo de mármore, permitindo uma visão detalhada da composição de cada material.

Tabela 11: Composição química do resíduo de vidro obtida por fluorescência de raios X (FRX).

Matéria-Prima	Óxidos constituintes (% em massa)									
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PF
Resíduo de vidro	70,75	-	1,65	9,75	0,45	4,20	12,71	0,05	0,05	0,39
Resíduo de mármore	12,36	0,16	0,20	29,03	0,11	18,68	0,06	0,07	-	39,29

Fonte: Da autora (2026).

A análise química do resíduo de vidro mostra uma composição típica de vidros do tipo sódico cálcicos, utilizados para a fabricação de vidros planos. O principal constituinte é o dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), com 70,75% em massa, responsável por formar a estrutura vítrea tridimensional e conferir estabilidade ao material. O óxido de sódio (Na<sub>2</sub>O) corresponde a 12,71%, atuando como modificador de rede, responsável por reduzir a viscosidade e a temperatura de fusão do material, o que facilita processos como sinterização e conformação térmica. O óxido de cálcio (CaO), com teor de 9,75%, atua como estabilizador da matriz vítrea, promovendo maior durabilidade química e mecânica. A análise da Perda ao Fogo (PF) revelou um valor inferior a 0,39%, indicando baixa presença de fases voláteis, sendo a perda de massa atribuída principalmente à umidade residual. Esses fatores confirmam a adequação do resíduo de vidro para processos de queima e produção de espumas vítreas, nos quais a liberação controlada de gases é necessária para a obtenção de porosidade uniforme, contribuindo para o desempenho térmico e estrutural das placas.

A composição química do resíduo de mármore, apresentada na Tabela 11, evidencia predominância de óxidos básicos, com destaque para CaO (29,03%) e MgO (18,68%), confirmando o caráter calcário-dolomítico do material, típico de rochas carbonáticas. O MgO, em particular, além de reforçar a natureza dolomítica, contribui para a estabilidade térmica da matriz vítrea, podendo favorecer a formação de poros menores e mais uniformes durante a expansão, devido à sua influência na viscosidade do vidro fundido. Observa-se também teor significativo de SiO<sub>2</sub> (12,36%), indicando a presença de fração silicosa no resíduo. Os demais constituintes, como Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,20%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,16%) e K<sub>2</sub>O (0,11%), ocorrem em baixos teores, sugerindo reduzida participação de impurezas secundárias. A Perda ao Fogo (39,29%) indica a liberação

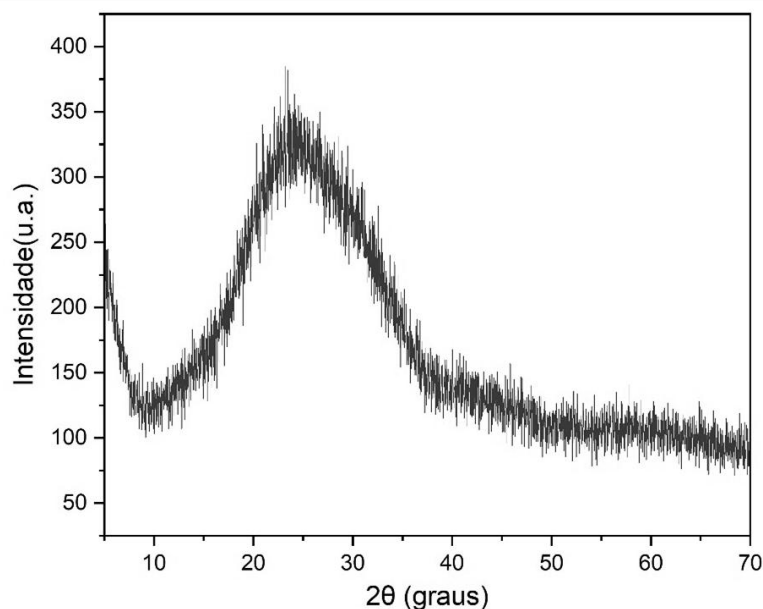
significativa de CO<sub>2</sub> durante o tratamento térmico, processo fundamental para a expansão da matriz vítrea e a formação de uma estrutura de poros fechados. Essa estrutura porosa confere baixa densidade e elevada resistência térmica a placa, características fundamentais para reduzir a carga estrutural e otimizar a eficiência energética do sistema de fachada ventilada.

### 5.1.2 Caracterização mineralógica

Com a análise de difração de raios X (DRX), pode-se avaliar o comportamento do material durante a síntese da espuma vítrea, garantindo a repetibilidade das propriedades necessárias ao desempenho de fachadas ventiladas.

Confirme a Figura 19, o difratograma do vidro apresenta um halo amorfo na região entre 20° e 35° (2θ), característico de materiais vítreos. Essa natureza amorfa confere ao material uma faixa de amolecimento adequada para aprisionar os gases liberados pelo agente espumante, resultando em uma estrutura celular uniforme.

Figura 19: Difratograma de raios X (DRX) do resíduo de vidro.

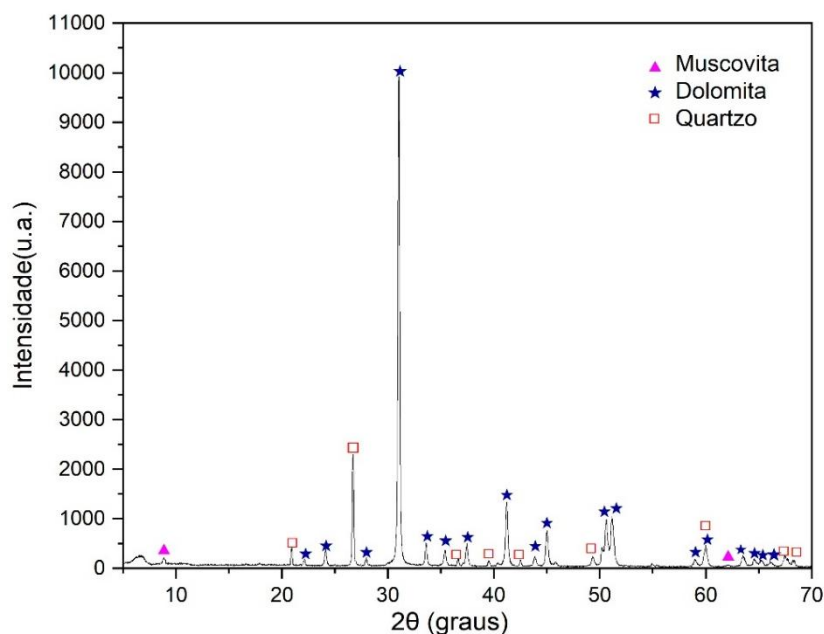


Fonte: Da autora (2026).

Para o resíduo de mármore, a Figura 20 mostra no difratograma a presença predominante de dolomita (00-036-0426), juntamente com quartzo (00-046-1045) e

muscovita (01-086-1385), uma mica comum em rochas metamórficas. A identificação da dolomita valida o uso desse resíduo, já que sua decomposição térmica ocorre em etapas que favorecem a expansão controlada dos poros.

Figura 20: Difratoograma de raios X (DRX) do resíduo de mármore.



Fonte: Da autora (2026).

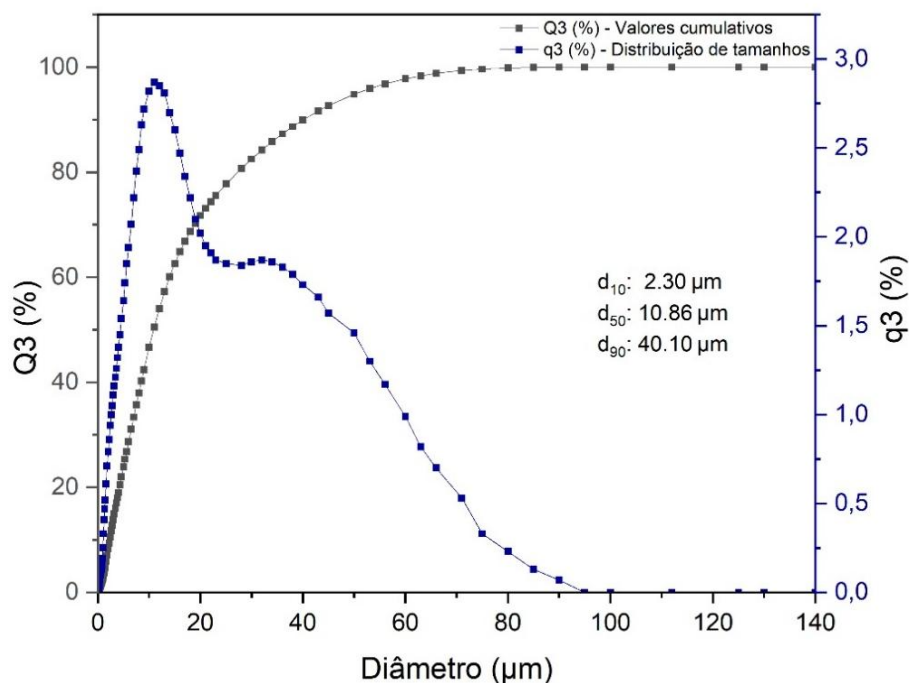
### 5.1.3 Distribuição do tamanho de partículas e propriedades físicas dos pós

A caracterização das propriedades físicas das matérias-primas fornece informações para o controle da porosidade, leveza e desempenho térmico das espumas vítreas. A análise granulométrica permite avaliar o tamanho médio e a distribuição das partículas, parâmetros que influenciam diretamente a formação de poros durante a sinterização e a homogeneidade da estrutura porosa. A densidade real, determinada por picnometria, fornece dados sobre a leveza e a compactação do material, enquanto a área superficial específica, obtida pelo método BET, indica o desenvolvimento da superfície dos pós e da porosidade fina, impactando a uniformidade dos poros e a eficiência térmica das espumas vítreas finais.

A análise granulométrica das amostras de resíduo de vidro e mármore foi realizada por difração a laser. Conforme apresentado na Figura 21, o vidro apresenta uma distribuição granulométrica com pico principal de frequência ( $q_3$ ) entre aproximadamente 10 e 20  $\mu\text{m}$ . A curva cumulativa ( $Q_3$ ) atinge  $d_{50} = 10,86 \mu\text{m}$  e  $d_{90} =$

40,10  $\mu\text{m}$ , resultando em diâmetro médio de 16,41  $\mu\text{m}$ , caracterizando uma distribuição relativamente ampla.

Figura 21: Distribuição granulométrica do resíduo de vidro.



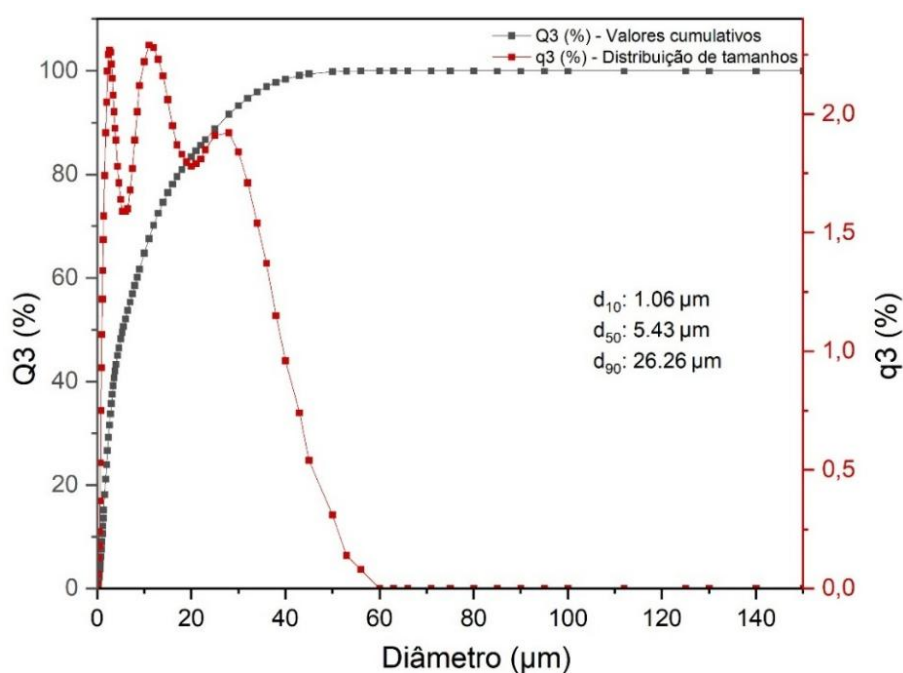
Fonte: Da autora (2026).

A maior concentração de partículas situa-se entre 10 e 40  $\mu\text{m}$ , onde se observam os valores máximos de densidade relativa. No contexto de espumas vítreas, esses valores são favoráveis, pois a literatura indica que partículas de vidro menores que 33  $\mu\text{m}$  são ideais para a obtenção de espumas de baixa densidade e com poros uniformemente distribuídos (König; Petersen; Yue, 2016). Resultados semelhantes foram relatados por Ziejewska *et al.* (2023), que verificaram que a redução do tamanho das partículas de vidro residual favorece a formação de poros menores e mais uniformemente distribuídos, aumentando a porosidade total do material devido ao maior desenvolvimento de área superficial específica.

Conforme apresentado na Figura 22, o resíduo de mármore apresenta distribuição granulométrica predominantemente fina, com maior concentração volumétrica ( $q_3$ ) entre aproximadamente 2 e 15  $\mu\text{m}$ . A curva cumulativa ( $Q_3$ ) cresce de forma contínua, atingindo  $d_{50} = 5,43 \mu\text{m}$  e  $d_{90} = 26,26 \mu\text{m}$ , com diâmetro médio de 9,83  $\mu\text{m}$ , indicando uma distribuição moderadamente ampla.

A curva de distribuição volumétrica (q3) evidencia comportamento trimodal, sugerindo a presença de três frações granulométricas distintas. Dessa forma, a análise isolada do tamanho médio representado por d50 torna-se limitada, sendo mais adequado discutir as faixas granulométricas individualmente. Observa-se uma fração fina concentrada em diâmetros inferiores a 2  $\mu\text{m}$ , uma fração intermediária entre 2 e 12  $\mu\text{m}$  que corresponde à maior contribuição volumétrica do material e uma fração mais grosseira acima de 12  $\mu\text{m}$ . Embora haja presença de partículas de maior diâmetro, sua participação é menos significativa, mantendo o caráter predominantemente fino do resíduo.

Figura 22: Distribuição granulométrica do resíduo de mármore.



Fonte: Da autora (2026).

A granulometria dos pós exerce influência direta na microestrutura das espumas vítreas. Partículas mais finas, como as presentes no resíduo de mármore, promovem uma distribuição mais homogênea e favorecem a formação de poros uniformes. Conseqüentemente, a interação entre a fase líquida e a liberação de gases do agente espumante resulta em uma estrutura final com porosidade controlada e consistente (Jiang *et al.*, 2019).

As Tabelas 12 apresentam os valores de densidade real para as amostras de resíduo de vidro e de mármore, respectivamente. As medições foram realizadas

em quatro repetições independentes para cada material, com o objetivo de garantir maior confiabilidade aos resultados, sendo posteriormente calculada a média aritmética dos valores obtidos. Os resultados indicaram que tanto o resíduo de vidro quanto o resíduo de mármore apresentam valores de densidade real compatíveis com aqueles reportados na literatura.

Tabela 12: Densidade real do resíduo de vidro e mármore determinada por picnometria.

<b>Resíduo de Vidro</b>					
<b>Amostra</b>	d1 (g/cm <sup>3</sup> )	d2 (g/cm <sup>3</sup> )	d3 (g/cm <sup>3</sup> )	d4 (g/cm <sup>3</sup> )	Média (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Resíduo de vidro</b>	2,88	2,89	2,89	2,89	<b>2,89 ± 0,006</b>
<b>Resíduo de mármore</b>	2,54	2,56	2,56	2,56	<b>2,55 ± 0,01</b>

Fonte: Da autora (2026).

A determinação da densidade real mostrou diferenças significativas entre os resíduos analisados. O resíduo de vidro apresentou densidade real de 2,89 g/cm<sup>3</sup>, valor superior ao nominalmente reportado para vidros sódico-cálcicos (~2,5 g/cm<sup>3</sup>). Essa diferença pode estar relacionada à composição específica do material, uma vez que a densidade dos vidros depende do volume livre da rede vítrea e da massa dos íons presentes. A presença de óxidos modificadores de rede tende a reduzir o volume livre e, conseqüentemente, aumentar a densidade (Shelby, 2005). O resíduo de mármore apresentou densidade real de 2,55 g/cm<sup>3</sup> (2,5 a 2,8 g/cm<sup>3</sup>), compatível com valores típicos de calcita e dolomita (Silva; Ribeiro; Rodriguez, 2018).

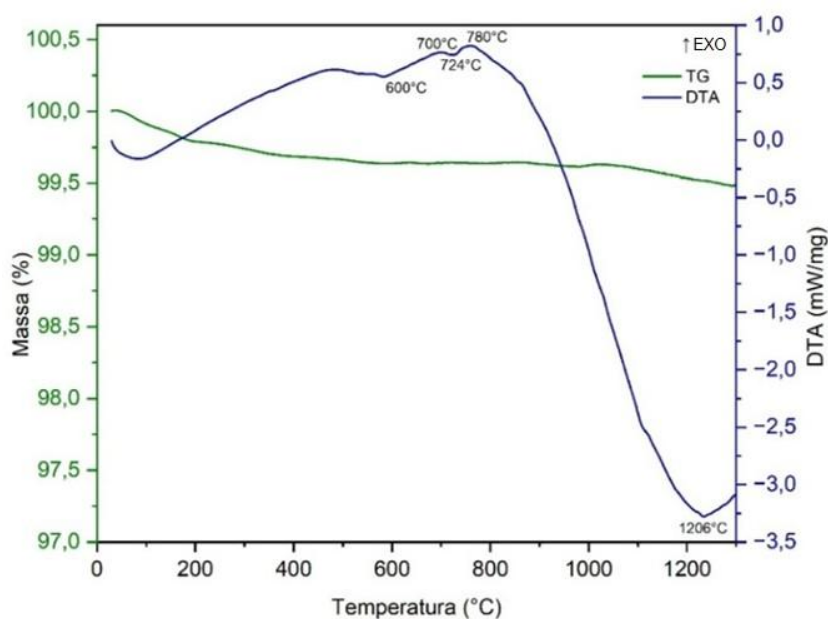
O ensaio de BET (Brunauer–Emmett–Teller) foi necessário para investigar se o processamento dos resíduos gerou uma superfície ativa o suficiente para a formação de microporos. Os resultados indicaram áreas superficiais específicas para a amostra composta exclusivamente por resíduo de vidro de 2,109 m<sup>2</sup>/g e 2,965 m<sup>2</sup>/g para a amostra contendo resíduo de mármore. A maior área superficial do resíduo de mármore indica que suas partículas são mais finas e estão mais expostas, favorecendo a liberação de CO<sub>2</sub> (Babisk *et al.*, 2023).

#### 5.1.4 Comportamento térmico dos resíduos

A análise termogravimétrica (ATG) combinada com calorimetria diferencial por varredura (DSC), fornecendo simultaneamente a curva DTA, permitiu avaliar o comportamento térmico dos resíduos de vidro e mármore. Esse ensaio possibilita identificar faixas de estabilidade térmica, temperaturas de decomposição e possíveis transições de fase, informações essenciais para o planejamento do ciclo térmico adotado (aquecimento a 10 °C/min até 950 °C, com patamar de 30 min), bem como para prever a liberação de gases durante o processo de sinterização e a formação da porosidade.

A partir da Figura 23, é possível observar que o vidro apresenta uma curva TG com mínima perda de massa entre 25 e 1250 °C, com pouca variação significativa. A leve variação ao longo do aquecimento pode estar associada à liberação de traços de umidade ou compostos voláteis residuais. A curva DTA evidencia um evento endotérmico suave entre aproximadamente 600 e 800 °C, possivelmente relacionado à região de transição vítrea e ao início do amolecimento do material. Destaca-se que, por se tratar de material amorfo, o vidro não apresenta temperatura de fusão definida, mas sim redução progressiva da viscosidade com o aumento da temperatura. O evento endotérmico mais intenso observado acima de 1000 °C está associado ao amolecimento avançado e à significativa diminuição da viscosidade, condição favorável ao processo de sinterização e expansão da espuma vítrea.

Figura 23: DTA diferença de fluxo de calor e TG por variação da massa da amostra do resíduo de vidro.

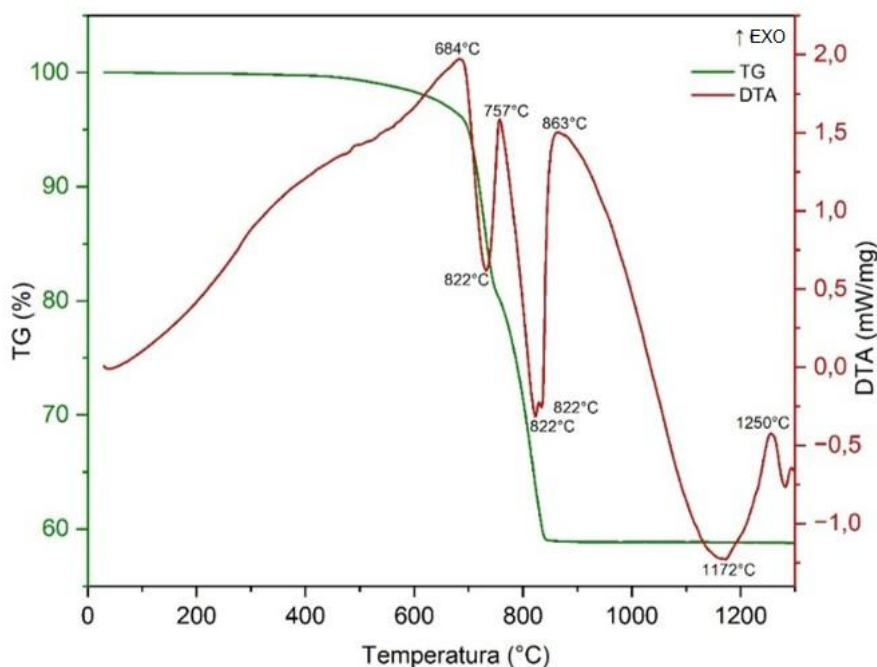


Fonte: Da autora (2026).

Na Figura 24 o mármore apresenta estabilidade térmica até cerca de 700 °C. A partir de 700–800 °C, há uma grande perda de massa, característica da decomposição térmica do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que se converte em óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), liberando  $\text{CO}_2$ . A curva DTA mostra picos endotérmicos bem definidos nessa faixa, reforçando o processo de decomposição. A partir de aproximadamente 850 °C, tanto a TG quanto a DTA se estabilizam, indicando que o processo de calcinação foi concluído.

Embora o perfil térmico obtido neste trabalho apresente maior número de eventos endotérmicos em relação ao relatado por Silva *et al.* (2005), o comportamento principal é equivalente: estabilidade térmica inicial até cerca de 700 °C, seguida de perda de massa significativa associada à decomposição dos carbonatos e posterior estabilização acima de 850 °C. As diferenças observadas no número e na intensidade dos picos podem estar relacionadas a variações na composição mineralógica do resíduo, à presença de impurezas e às condições experimentais adotadas.

Figura 24: DTA diferença de fluxo de calor e TG por variação da massa da amostra do resíduo de mármore.



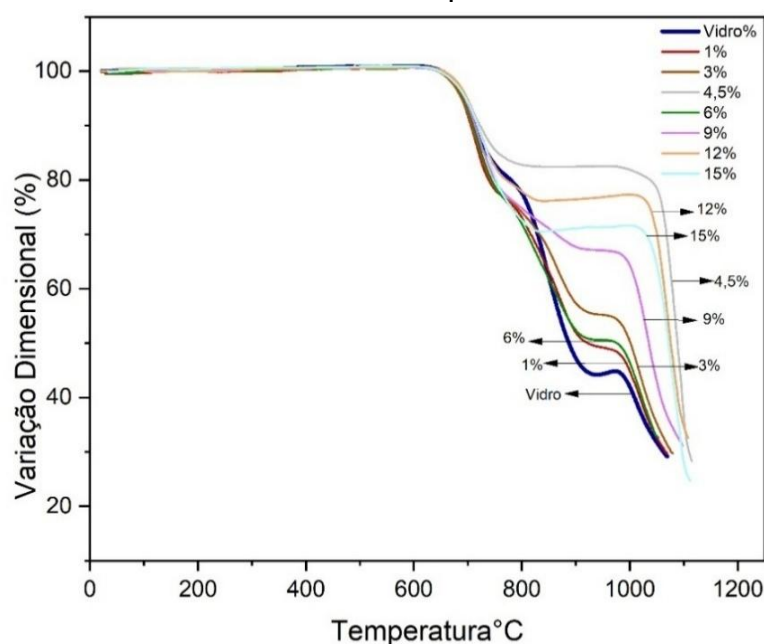
Fonte: Da autora (2026).

### 5.1.5 Comportamento térmico das composições

A partir da definição das composições, foi possível analisar o comportamento térmico das amostras e preparar as massas utilizadas nos ensaios subsequentes. A análise por dilatométrica óptica permitiu acompanhar a variação dimensional das diferentes formulações ao longo do aquecimento, possibilitando identificar as faixas de retração, expansão e início da densificação. Essas informações foram determinantes para compreender a influência dos diferentes teores de resíduo de mármore no processo de sinterização e, principalmente, para definir de forma adequada a temperatura de queima adotada no estudo.

A Figura 25 apresenta as curvas de variação dimensional linear das composições com diferentes teores de mármore (1–15%), obtidas por dilatométrica óptica, demonstrando a influência da decomposição do carbonato de cálcio sobre o comportamento dimensional e o processo de densificação ao longo do aquecimento.

Figura 25: Curvas de variação dimensional de vidro–mármore (1–15%) por dilatométrica óptica.



Fonte: Da autora (2026).

Menores teores (1, 3 e 6%) exibem curvas mais próximas à do vidro puro, sugerindo que, nessas concentrações, o efeito do carbonato sobre a viscosidade é menos significativo, resultando apenas em pequenas variações na temperatura de retração final. Maiores teores de mármore (12 e 15%) apresentaram prolongamento do patamar intermediário antes da retração final, indicando retardamento do processo

de densificação. Esse comportamento está associado a um equilíbrio dimensional, decorrente da atuação simultânea da retração por sinterização viscosa do vidro e da liberação de  $\text{CO}_2$  proveniente da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ .

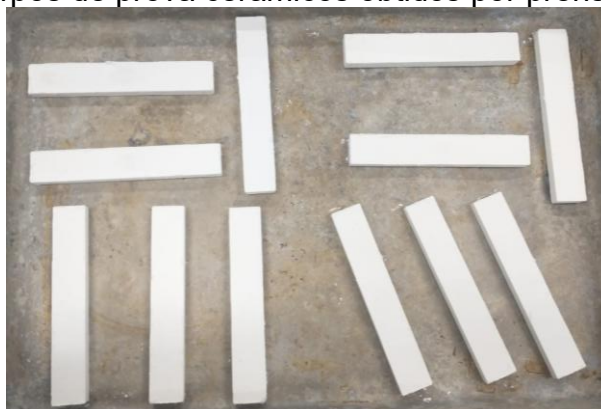
A composição com 4,5% de teor de mármore destacou-se por apresentar o patamar intermediário mais pronunciado e a maior expansão dimensional. Esse comportamento indica que, nessa concentração, houve condição mais favorável entre a viscosidade do vidro e a liberação de  $\text{CO}_2$  proveniente da decomposição do  $\text{CaCO}_3$ , permitindo expansão mais eficiente antes da retração final.

A temperatura de  $950\text{ }^\circ\text{C}$  foi escolhida para a queima das composições, pois, conforme observado no gráfico de variação dimensional (Figura 25), trata-se do ponto em que as amostras permanecem estáveis antes do início da fusão significativa do vidro, permitindo o controle da expansão e a formação uniforme da estrutura porosa.

## 5.2 ANÁLISE VISUAL

As massas cerâmicas foram preparadas pelo processo via seca, com homogeneização dos pós e posterior umidificação controlada. Com base na análise das curvas de dilatométrica óptica, foram testadas composições contendo 1, 3, 4,5, 6, 9, 12 e 15% de resíduo de mármore, substituindo parcialmente o vidro, totalizando 21 amostras preparadas em triplicata. A Figura 26 apresenta os corpos cerâmicos obtidos após a etapa de prensagem uniaxial, evidenciando a geometria, o acabamento superficial e a uniformidade dimensional das amostras ainda em estado a verde, antes de serem submetidas ao processo de queima.

Figura 26: Corpos de prova cerâmicos obtidos por prensagem uniaxial.



Fonte: Da autora (2026).

As placas cerâmicas foram submetidas ao processo de queima, apresentando expansão dimensional significativa e características visuais típicas de placas porosas, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27: Espumas vítreas após queima a 950 °C por 30 min.



Fonte: Da autora (2026).

A análise visual das espumas vítreas após a queima evidencia a formação de estruturas características desse tipo de material, apresentando expansão dimensional, coloração uniforme e poros distribuídos ao longo de todo o volume das amostras, conforme ilustrado na Figura 27. Observa-se que todas as composições apresentaram integridade macroscópica após a queima, sem ocorrência de colapso estrutural ou fusão excessiva, indicando que o ciclo térmico adotado foi adequado para promover a espumação e a estabilização da matriz vítrea.

Nota-se, ainda, que o aumento do teor de resíduo de mármore influencia visualmente o grau de expansão e a aparência superficial das placas de espuma vítrea, sugerindo variações na quantidade e na distribuição dos poros formados. Composições com menores teores de mármore apresentam estruturas mais compactas, enquanto teores intermediários e elevados resultam em maior expansão volumétrica e textura superficial mais rugosa, associadas à intensificação da liberação gasosa durante a queima. Essas diferenças visuais indicam modificações na microestrutura porosa em função da composição, as quais serão discutidas de forma quantitativa nos próximos subcapítulos, por meio da análise de porosidade, densidade e distribuição do tamanho de poros, parâmetros diretamente relacionados ao desempenho térmico e mecânico requerido para aplicação em sistemas de fachada ventilada.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ESPUMAS VÍTREAS

#### 5.3.1 Variação dimensional pós-queima

A avaliação da variação dimensional pós-queima é um parâmetro relevante para a aplicação de espumas vítreas em sistemas de fachada ventilada, especialmente quando se considera a viabilidade de produção em escala industrial. Em sistemas de revestimento externo, o controle dimensional das placas é essencial para garantir compatibilidade com sistemas de fixação, padronização modular, facilidade de montagem e desempenho estrutural adequado, além de minimizar perdas por retrabalho ou descarte durante o processo produtivo. Os corpos de prova confeccionados para as diferentes composições (1 a 15% de resíduo de mármore) apresentaram dimensão inicial padronizada de 120 mm × 20 mm × 8 mm, determinada pelo molde utilizado no processo de prensagem. Essas medidas foram adotadas como referência para a avaliação da variação dimensional decorrente da etapa de queima, permitindo quantificar o comportamento geométrico das espumas vítreas após a queima.

A Tabela 13 mostra que o desvio padrão ( $\sigma$ ) indica que o comprimento apresenta a maior variabilidade dimensional, com 3% ( $\sigma = 5,8$ ), enquanto a largura e a espessura apresentam menor variabilidade, com 0,2 ( $\sigma = 15\%$ ) e 0,4 ( $\sigma = 15\%$ ), respectivamente.

Tabela 13: Valores médios de comprimento, largura e espessura das amostras (1; 3; 4,5; 6; 9; 12 e 15%)

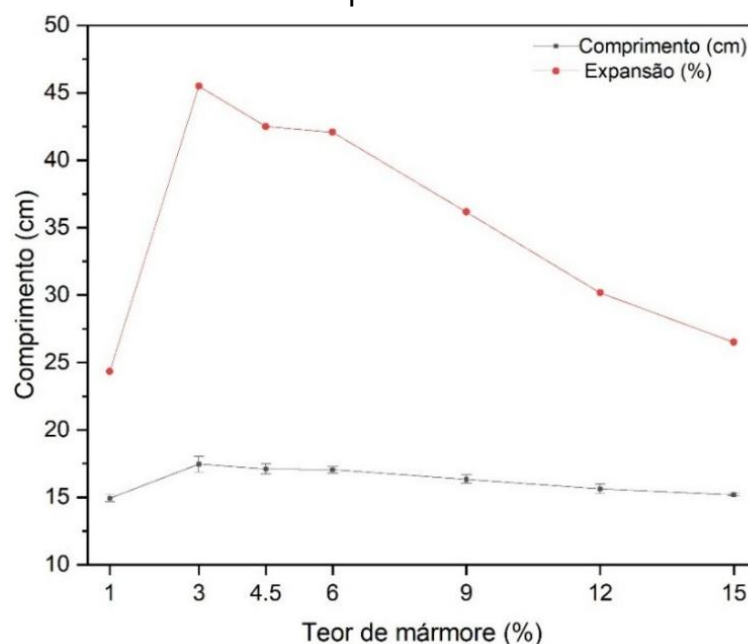
Teor de mármore (%)	Tamanho (mm)	Largura média (mm)	Espessura média (mm)
1%	149,2	35,3	18,7
D.P ( $\sigma$ )	2,7	0,6	0,5
3%	174,6	32,3	14,2
D.P ( $\sigma$ )	5,8	1,2	1,0
4,5%	171,0	35,2	16,6
D.P ( $\sigma$ )	3,6	0,9	1,0
6%	170,5	35,4	17,1
D.P ( $\sigma$ )	2,6	0,9	0,2
9%	163,4	34,8	15,9
D.P ( $\sigma$ )	3,1	0,6	0,3
12%	156,2	34,0	14,4

D.P ( $\sigma$ )	3,5	1,0	0,4
15%	151,8	30,2	13,3
D.P ( $\sigma$ )	1,0	0,2	0,4

Fonte: Da autora (2026).

A análise da variação dimensional dos corpos de prova após a queima, conforme a Figura 28, mostrou expansão do comprimento em todas as amostras avaliadas. As maiores expansões foram observadas nos teores de 3 e 6% de padrão, que apresentaram  $\Delta L$  de 45,50 e 42,08%, respectivamente. Em seguida, as amostras com 4,5, 9, 12 e 15% exibiram expansões de 42,50, 36,17, 30,17 e 26,50%, respectivamente. A menor expansão ocorreu na amostra com 1% de padrão, com  $\Delta L$  de 24,33%. Esses resultados indicam que o aumento do teor influencia diretamente a expansão dimensional, especialmente na faixa intermediária de composição.

Figura 28: Variação dimensional média dos corpos de prova após o processo de queima.



Fonte: Da autora (2026).

Quanto à precisão dimensional, os desvios padrão ( $\sigma$ ) do tamanho mostram maior variabilidade nas amostras com 3% ( $\sigma = 5,8$ ) e 4,5% ( $\sigma = 3,6$ ), enquanto a amostra com 15% apresentou menor variabilidade ( $\sigma = 0,1$ ). A redução da expansão com o aumento do padrão, conforme observado na Figura 28, indica que tanto a quantidade de agente formador de poros quanto a densidade inicial influenciam diretamente a liberação de gases e seu aprisionamento na matriz amolecida. Estudos

anteriores mostram que quantidades excessivas de agente espumante podem limitar a formação de espuma na matriz vítrea, resultando em menor expansão das amostras com maiores porcentagens em massa de resíduo de mármore (Rangel *et al.*, 2021).

A partir das dimensões finais dos corpos de prova após a queima, foram estimados os volumes correspondentes às amostras contendo 1, 3, 4,5, 6, 9, 12 e 15% de resíduo de mármore, com os valores posteriormente convertidos para centímetros cúbicos. Os resultados mostram que o aumento do teor não promove um comportamento linear do volume. O volume inicial observado para 1% foi de aproximadamente 98,5 cm<sup>3</sup>, aumentando para 102,4 cm<sup>3</sup> em 3% e apresentando leve redução para 99,9 cm<sup>3</sup> em 4,5%. Em 6%, ocorreu o maior volume 103,2 cm<sup>3</sup>, seguido por uma redução progressiva em 9% para 90,4 cm<sup>3</sup>, 12% para 76,5 cm<sup>3</sup> e 15% para 61,0 cm<sup>3</sup>, que apresentou a maior contração volumétrica entre os teores analisados.

Embora os maiores volumes coincidam com as maiores expansões lineares na faixa intermediária (3–6%), o volume apresenta queda em teores elevados de mármore (12 e 15%), evidenciando que a contração volumétrica é intensificada pelo colapso estrutural da espuma e não apenas pela redução dimensional ao longo do comprimento.

### 5.3.2 Porosidade

A porosidade é um dos parâmetros mais relevantes na caracterização de placas produzidas a partir de espumas vítreas, destinadas à aplicação em sistemas de fachada ventilada, uma vez que exerce influência direta tanto sobre o desempenho térmico quanto sobre o comportamento mecânico do material. Em fachadas ventiladas, materiais com elevada porosidade tendem a apresentar menor condutividade térmica devido à retenção de ar no interior da microestrutura, contribuindo para a redução da transferência de calor através do sistema construtivo. Entretanto, a porosidade deve ser controlada de modo a garantir estabilidade estrutural e integridade do material durante o uso e a instalação, aspectos fundamentais para a aplicação em escala industrial.

A Tabela 14 apresenta os valores de densidade real, aparente e de porosidade das espumas vítreas obtidas com diferentes teores de resíduo de mármore.

Tabela 14: Resultados de densidade aparente ( $\text{g/cm}^3$ ) e de porosidade (%) para teor de mármore.

Teor de mármore (%)	$\rho_{\text{real}}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$\rho_{\text{ap}}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	Porosidade (%)
1	$2,202 \pm 0,23$	0,320	$85,40 \pm 1,52$
3	$2,320 \pm 0,12$	0,322	$86,07 \pm 0,72$
4,5	$2,382 \pm 0,17$	0,280	$88,27 \pm 0,84$
6	$2,379 \pm 0,01$	0,263	$88,96 \pm 0,05$
9	$2,373 \pm 0,00$	0,330	$86,10 \pm 0,02$
12	$2,389 \pm 0,00$	0,370	$84,51 \pm 0,03$
15	$2,454 \pm 0,00$	0,454	$81,50 \pm 0,03$

Fonte: Da autora (2026).

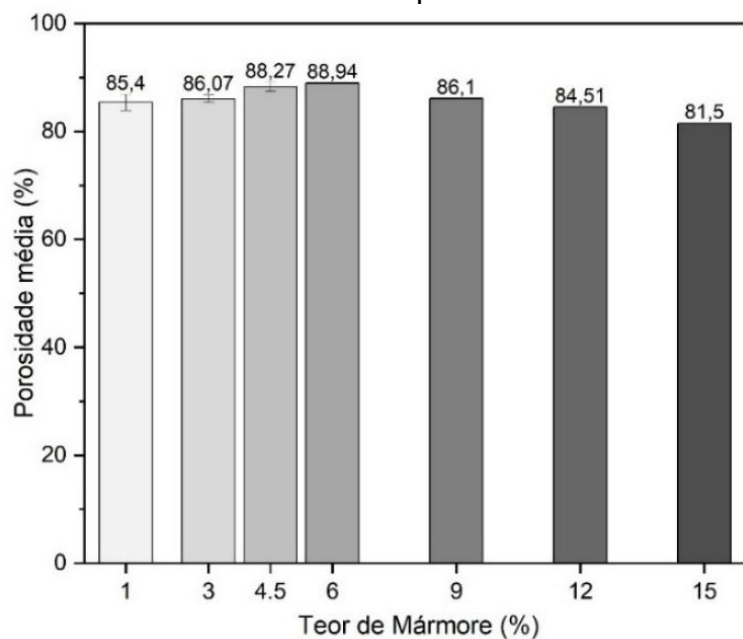
Os valores iniciais de densidade aparente foram de  $0,320 \text{ g/cm}^3$  (1%) e  $0,322 \text{ g/cm}^3$  (3%), seguidos de redução para  $0,280 \text{ g/cm}^3$  (4,5%) e  $0,263 \text{ g/cm}^3$  (6%), indicando maior expansão e formação de poros. A partir de 9% ( $0,330 \text{ g/cm}^3$ ), observou-se aumento progressivo da densidade aparente, atingindo  $0,370 \text{ g/cm}^3$  (12%) e  $0,454 \text{ g/cm}^3$  (15%), o que sugere menor eficiência de expansão e maior compactação estrutural em teores elevados de resíduo. De acordo com Scheffler e Colombo (2005), espumas vítreas comerciais apresentam densidades na faixa de 0,1 a  $0,3 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados obtidos apresentaram valores compatíveis com esse intervalo, exceto para a composição com 15% de resíduo, cuja densidade aparente atingiu  $0,454 \text{ g/cm}^3$ , acima da faixa típica. Esse comportamento indica redução da eficiência de expansão e maior compactação estrutural do material para teores elevados de resíduo.

A densidade real, por sua vez, manteve-se relativamente constante, variando entre  $2,202$  e  $2,454 \text{ g/cm}^3$ . Essa constância indica que as pequenas diferenças observadas na densidade aparente não decorrem de alterações na composição química ou na fase vítrea do material, que permanece homogênea, mas estão predominantemente associadas à quantidade, ao tamanho e à distribuição dos poros presentes na espuma vítrea.

Conforme a Figura 29, a porosidade das amostras apresentou valores elevados para todas as composições, típicos de espumas vítreas. Observou-se aumento progressivo da porosidade de  $85,40$  (1%) para  $86,07$  (3%), atingindo  $88,27\%$  para o teor de 4,5%, o que indica elevada eficiência de expansão nessa composição. O valor máximo foi atingido com  $88,96$  em (6%). A partir desse teor, ocorreu redução

da porosidade para 86,10 (9%), 84,51 (12%) e 81,50 (15%), evidenciando menor formação de poros em teores mais elevados de resíduo. Mugoni *et al.* (2015) ressaltam que espumas vítreas comerciais se caracterizam por elevada porosidade (85–95%) associada à baixa densidade (0,1–0,3 g/cm<sup>3</sup>). Nesse contexto, observa-se que as amostras com 4,5 e 6% de resíduo atingiram valores próximos à faixa de referência.

Figura 29: Influência do teor de mármore na porosidade média das espumas vítreas.



Fonte: Da autora (2026).

O comportamento observado nas amostras com 15% de resíduo de mármore pode estar relacionado ao aumento da viscosidade da fase líquida durante a sinterização. De acordo com Pozzobom *et al.* (2014), o acréscimo da fração sólida eleva significativamente a viscosidade, reduzindo a fluidez do sistema e dificultando a expansão e a estabilização das bolhas geradas pelo agente espumante. Dessa forma, o teor mais elevado de resíduo reduz a capacidade de expansão do material, resultando em menor porosidade em comparação às composições com menor conteúdo sólido.

Do ponto de vista da aplicação em fachadas ventiladas e da produção industrial, esses resultados indicam que existe uma faixa ótima de teor de resíduo de mármore na qual se obtém elevada porosidade sem comprometer excessivamente a estabilidade estrutural do material. O controle da porosidade é, portanto, um fator

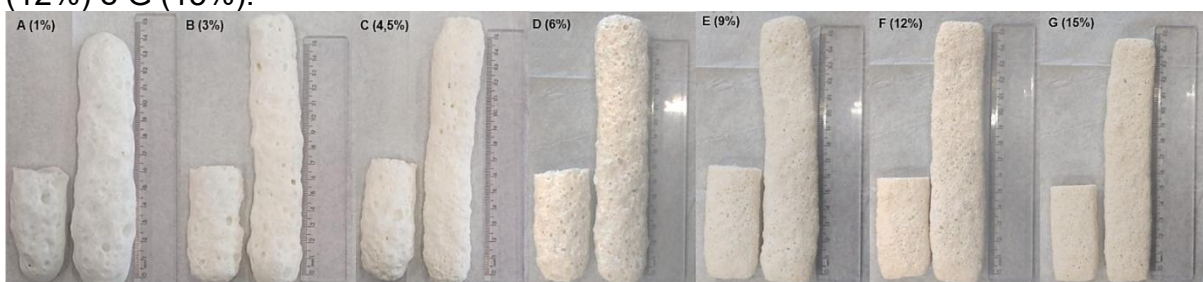
importante para o equilíbrio entre desempenho térmico e integridade mecânica, requisitos essenciais para o uso de placas cerâmicas porosas em sistemas construtivos de fachada ventilada.

### 5.3.3 Absorção de água

A absorção de água desempenha papel determinante na avaliação de placas de espuma vítrea para fachadas ventiladas, pois está diretamente relacionada à conectividade dos poros, à permeabilidade do material e à sua durabilidade em ambientes externos. Em fachadas ventiladas, o material pode estar sujeito à ação de umidade, chuva dirigida e variações higrótérmicas, de modo que elevados índices de absorção de água podem comprometer o desempenho térmico, favorecer processos de degradação e impactar a estabilidade dimensional ao longo do tempo. Assim, a avaliação da absorção de água fornece informações sobre a natureza da porosidade formada e sobre a adequação do material à aplicação pretendida.

A Figura 30 ilustra o preparo inicial das amostras destinadas ao ensaio de absorção de água, evidenciando a diferença entre a amostra inteira e a com corte. Essa distinção é relevante, pois a presença da seção cortada altera significativamente a área de contato do material com a água, afetando diretamente a taxa e a quantidade de absorção.

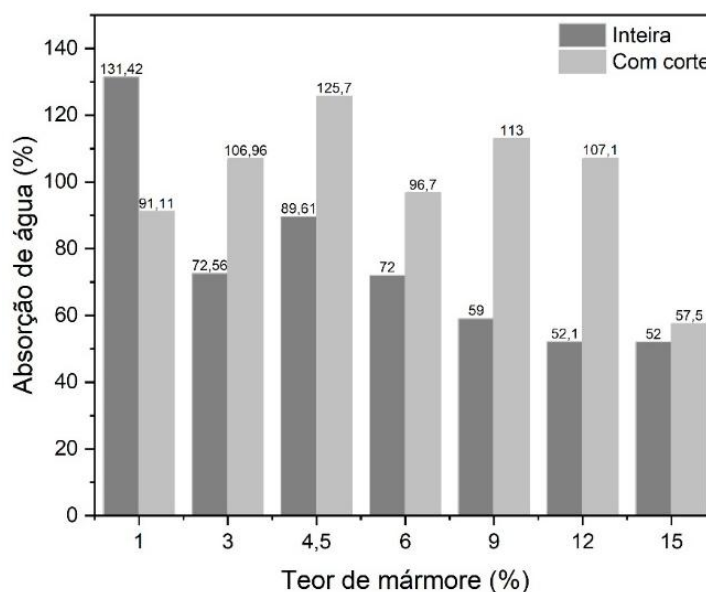
Figura 30: Amostras de espuma vítrea, inteiras (sem corte) e em seção transversal (com corte), para os diferentes teores: A (1%), B (3%), C (4,5%), D (6%), E (9%), F (12%) e G (15%).



Fonte: Da autora (2026).

A Figura 31 apresenta os resultados quantitativos do ensaio de absorção de água para as amostras contendo 1; 3; 4,5; 6; 9; 12 e 15% de resíduo de mármore. Esses valores permitem avaliar a influência da variação percentual do resíduo na formação de poros e, conseqüentemente, no comportamento de absorção do material.

Figura 31: Resultado da absorção de água das amostras de espuma vítrea em função do teor de mármore.



Fonte: Da autora (2026).

As amostras inteiras apresentaram absorção de água entre 52 e 72%, com redução progressiva conforme o teor de mármore aumenta, indicando menor permeabilidade e maior ocorrência de poros fechados, com o menor valor observado em 15%.

Nas amostras com corte, a absorção de água apresentou variações significativas, variando de 57 a 126% resultado diretamente relacionado à exposição dos poros internos que, ao serem cortados, aumentam a área de contato do material com a água. Esse comportamento é característico de materiais altamente porosos, nos quais a presença de canais e cavidades internas facilita a capilaridade e a penetração de líquidos. Fenômenos semelhantes foram observados em estudos anteriores, como o de Horonko *et al.* (2025), que relataram absorção de até 162% em espumas vítreas produzidas a partir de resíduos de vidro combinados com perlita.

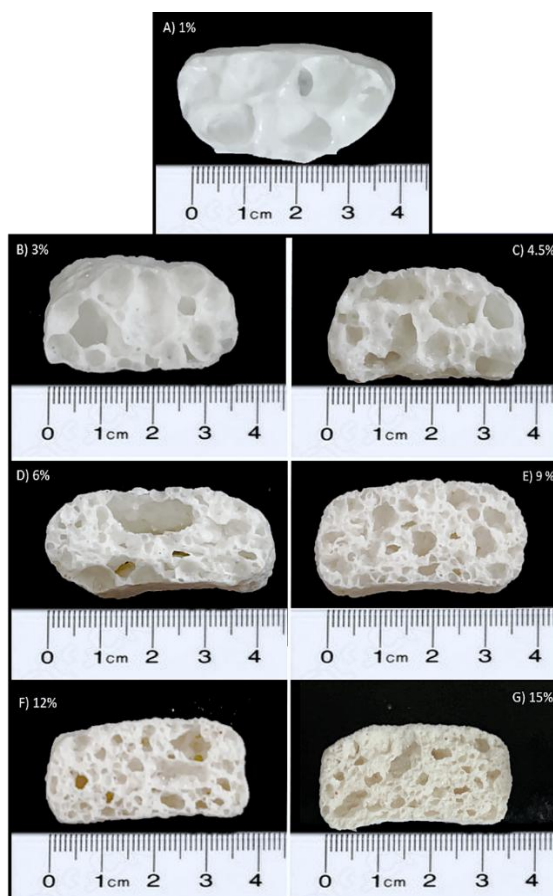
Segundo König *et al.* (2016) e Horonko *et al.* (2025), teores reduzidos de agente formador de gás tendem a gerar poros mais acessíveis pela superfície, enquanto maiores teores favorecem o crescimento de bolhas internas e o fechamento parcial das paredes. Assim, a composição com 1% apresentou maior absorção na amostra inteira, pois seus poros já se comunicam diretamente com a superfície, tornando o corte pouco efetivo em expor cavidades adicionais.

Do ponto de vista da aplicação em fachadas ventiladas, esses resultados indicam que a absorção de água está fortemente associada à microestrutura porosa e ao teor de resíduo de mármore empregado. Embora elevados valores de absorção sejam intrínsecos a espumas vítreas altamente porosas, os valores expressivos de absorção indicam que a estrutura obtida apresenta fração significativa de poros abertos e/ou interconectados, particularmente na região superficial do material. Observa-se que, embora determinadas composições tenham apresentado redução relativa na absorção, o comportamento indica a importância de um controle mais refinado da formação e estabilização dos poros durante o processamento, de modo a favorecer a redução da conectividade estrutural. Para aplicação prática em fachadas ventiladas, esses resultados reforçam a importância do controle da microestrutura e indicam que eventuais tratamentos superficiais ou configurações de uso como camada protegida podem ser estratégias adequadas para compatibilizar elevada porosidade interna, necessária ao isolamento térmico, com requisitos de durabilidade e desempenho em ambientes externos.

#### 5.3.4 Tamanho e distribuição dos poros

O tamanho e a distribuição dos poros constituem parâmetros microestruturais fundamentais para a compreensão integrada dos resultados de porosidade e absorção de água discutidos anteriormente, uma vez que a fração volumétrica de poros, sua dimensão, distribuição e conectividade determinam o comportamento térmico, mecânico e de transporte de fluidos em espumas vítreas. Em sistemas de fachada ventilada, essas características influenciam diretamente a capacidade de isolamento térmico, a permeabilidade à umidade e a durabilidade do material quando exposto a condições ambientais externas. A distribuição dos poros das espumas vítreas foi determinada por meio da contagem dos poros dentro dos intervalos de diâmetros especificados, com base no método do intercepto linear. A Figura 32 apresenta as imagens das espumas vítreas produzidas com diferentes teores de resíduo de mármore (1 a 15%), evidenciando a evolução da morfologia e da estrutura porosa conforme o aumento do aditivo.

Figura 32: Imagens das espumas vítreas produzidas com diferentes teores de resíduo de mármore (1–15%).



Fonte: Da autora (2026).

A Tabela 15 mostra que o maior tamanho médio dos poros ocorre na amostra com 4,5% de mármore (6,441 mm). A maior dispersão, no entanto, é observada para 1% (D.P. = 7,848 mm), indicando maior heterogeneidade. A partir de 6%, há redução progressiva do comprimento médio dos poros e do desvio padrão, atingindo o menor valor em 15% (2,514 ± 1,204 mm). Esses resultados indicam que o aumento do teor de mármore reduz o tamanho médio dos poros.

Tabela 15: Tamanho médio dos poros em função do teor de mármore.

Teor de Mármore (%)	Tamanho médio (mm)	D.P (mm)
1	6,321	7,848
3	5,600	4,472
4.5	6,441	5,684
6	5,214	3,926
9	5,062	3,397
12	4,837	2,973
15	2,514	1,204

Fonte: Da autora (2026).

Afim de compreender como o teor de resíduo de mármore influencia a estrutura porosa das espumas vítreas, foram elaborados histogramas de distribuição do tamanho de poros para todas as composições produzidas (1 a 15%), para visualizar a variação da frequência relativa de cada faixa de diâmetro de poro e identificar mudanças na predominância de micro, pequenos e médios poros conforme o teor de aditivo aumenta. A Figura 33 apresenta os histogramas obtidos, possibilitando a análise comparativa do comportamento de nucleação e crescimento dos poros ao longo dos diferentes teores.

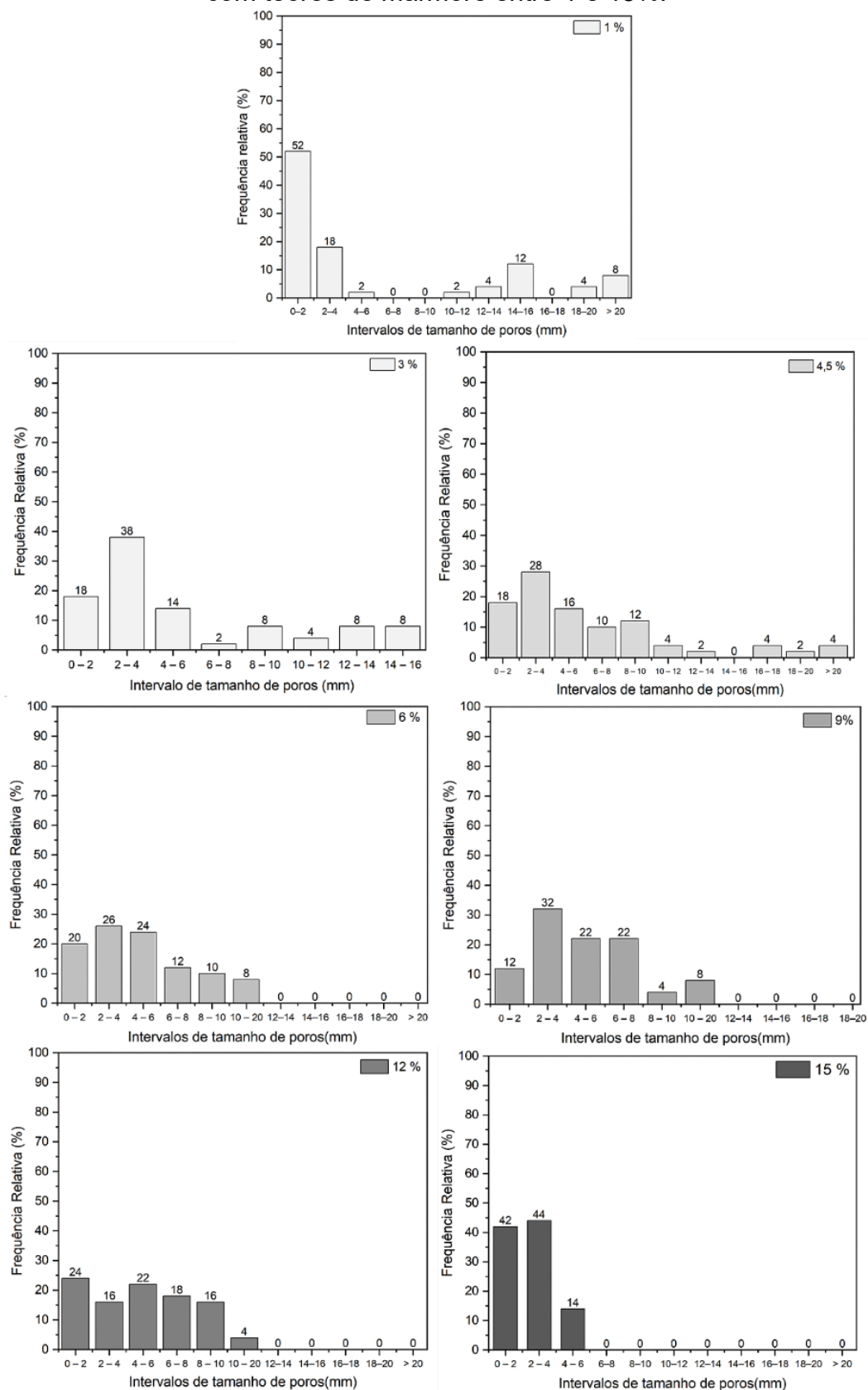
Em baixas concentrações de agente espumante, os microvazios presentes podem estar associados à compactação heterogênea da mistura. Pequenos poros residuais permanecem quando o CO<sub>2</sub> gerado pelo agente espumante não se expande significativamente, originando poros recém-nucleados de reduzida relevância para o comportamento macroscópico da espuma vítrea (Fernandes; Fernandes; Rossignolo, 2024).

Com teores intermediários (3 a 9%), predomina poros pequenos e médios (2–8 mm), de distribuição mais homogênea e com menor frequência de microporos. O CaCO<sub>3</sub> do mármore atua como agente expensor secundário, favorecendo maior número de bolhas que competem entre si, limitando o crescimento individual e gerando poros estáveis e uniformes (Wang; Feng; Sun, 2018).

Em teores elevados (12 e 15%), observa-se retorno aos poros finos (0–4 mm), com desaparecimento dos poros maiores em 15%, indicando saturação da matriz, supersaturação de núcleos gasosos e possível colapso parcial ou densificação excessiva durante a sinterização (Pozzobom *et al.*, 2014).

Os resultados indicam que teores intermediários de mármore (3 a 9%) promovem uma porosidade mais equilibrada, com maior variedade dimensional e estrutura mais funcional. Já teores muito baixos ou muito altos (1 e 15%) favorecem predominantemente microporos, cuja influência mecânica e de transporte pode ser limitada. Essa configuração favorece simultaneamente a retenção de ar, essencial para o desempenho térmico, e a redução da conectividade superficial dos poros, contribuindo para menores valores de absorção de água nas amostras inteiras. Em contrapartida, teores muito baixos ou muito elevados de resíduo tendem a gerar microestruturas menos funcionais, seja pela predominância de microporos abertos ou pela formação de poros excessivamente finos e densificação estrutural.

Figura 33: Histograma da distribuição do tamanho de poros das espumas vítreas com teores de mármore entre 1 e 15%.



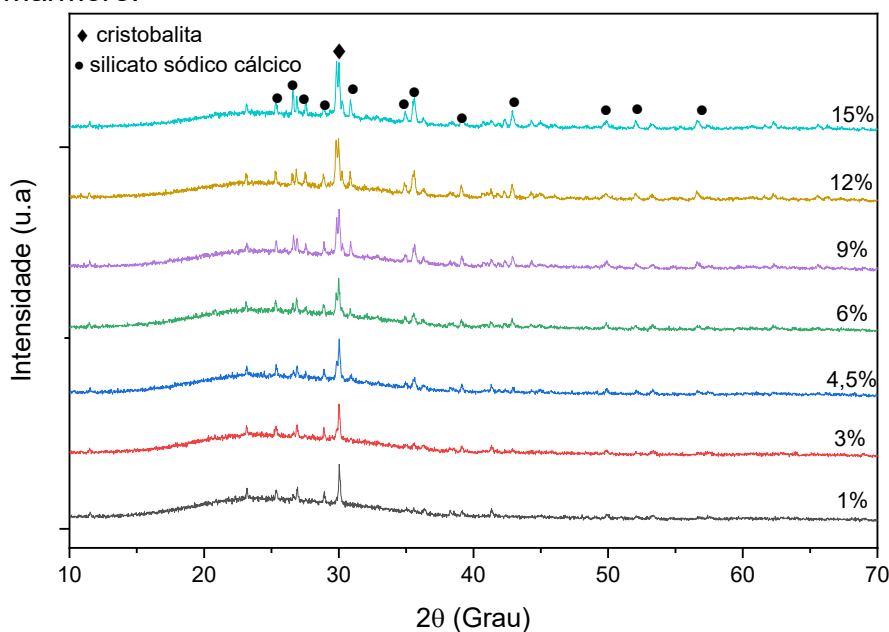
Fonte: Da autora (2026).

Do ponto de vista da aplicação em sistemas de fachada ventilada, os resultados indicam que o controle do tamanho e da distribuição dos poros é tão relevante quanto a porosidade total, pois define o equilíbrio entre isolamento térmico, permeabilidade à umidade e integridade estrutural. Assim, as composições com teores intermediários de resíduo de mármore destacam-se como as mais promissoras para a obtenção de placas cerâmicas porosas com desempenho compatível às exigências funcionais e construtivas de fachadas ventiladas.

### 5.3.5 Caracterização mineralógica das espumas vítreas

A análise mineralógica tem papel fundamental na avaliação da estabilidade estrutural e da viabilidade técnica das placas de espuma vítrea destinadas à aplicação em fachadas ventiladas. Após a mistura das matérias-primas e a variação do teor de resíduo de mármore, os difratogramas obtidos apresentaram comportamento semelhante, com predominância da fase amorfa característica do vidro e apenas variações na intensidade dos reflexões cristalinas, conforme observado na Figura 34.

Figura 34: Difratogramas de raios X (DRX) das composições com diferentes teores de resíduo de mármore.



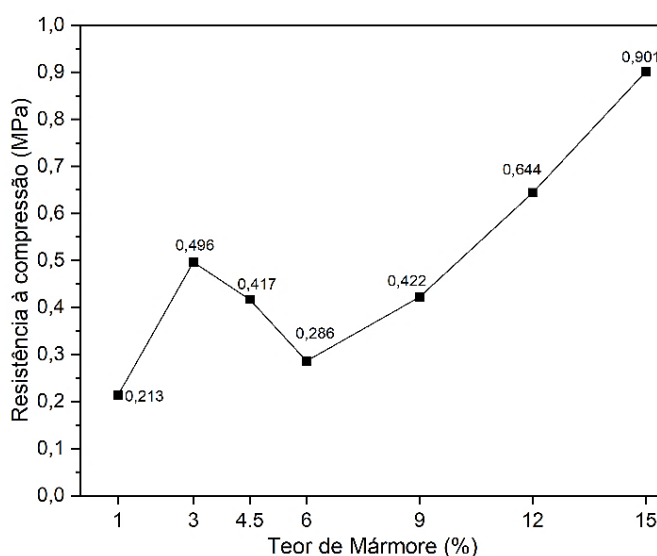
Fonte: Da autora (2026).

Pode-se observar pela análise do difratograma que há aproximadamente 50% de fase vítrea residual (medindo-se a área abaixo do difratograma de raios  $X$ /*background*) e duas fases cristalinas identificadas como cristobalita (JCPDS-01.076-0939) e silicato de sódico-cálcico (JCPDS-00.023-0671). Essas fases cristalinas são geralmente observadas em vidros sódio-cálcicos desvitrificados.

### 5.3.6 Comportamento mecânico das espumas vítreas

A viabilidade do uso de placas de espuma vítrea em fachadas ventiladas depende, entre outros fatores, de sua adequada resistência à compressão. Apesar de sua função principal ser o isolamento térmico, a placa deve apresentar resistência mecânica adequada para suportar esforços relacionados à instalação e às condições de uso. As placas de espuma vítrea podem ser submetidas a cargas decorrentes do próprio sistema de fixação e da ação do vento, tornando necessária a avaliação da integridade estrutural. Assim, o ensaio de compressão permite verificar se a elevada porosidade, responsável pelo desempenho térmico, é compatível com os requisitos de segurança e durabilidade do sistema. A Figura 35 apresenta os resultados da resistência à compressão das espumas vítreas produzidas com diferentes teores de mármore, variando de 1 a 15%, permitindo avaliar a influência da incorporação desse resíduo sobre o desempenho mecânico a compressão.

Figura 35: Resistência à compressão das espumas vítreas em função do teor de mármore.



Fonte: Da autora (2026).

Observa-se um aumento progressivo da resistência mecânica com o acréscimo do teor de resíduo de mármore, elevando-se de 0,213 (1%) a 0,901 MPa (15%). Esse comportamento está diretamente relacionado à redução gradual da porosidade com o aumento do teor de resíduo de mármore. Menores volumes de vazios promovem maior continuidade da matriz vítrea, resultando em melhor capacidade de suporte aos esforços de compressão. De modo geral, porosidades mais elevadas tendem a reduzir a resistência mecânica, pois diminuem a área efetiva resistente e favorecem a concentração de tensões. Além disso, o tamanho e a distribuição dos poros também influenciam o desempenho: estruturas com poros menores e mais homogêneos apresentam comportamento mecânico mais favorável (Boonphayak *et al.*, 2024).

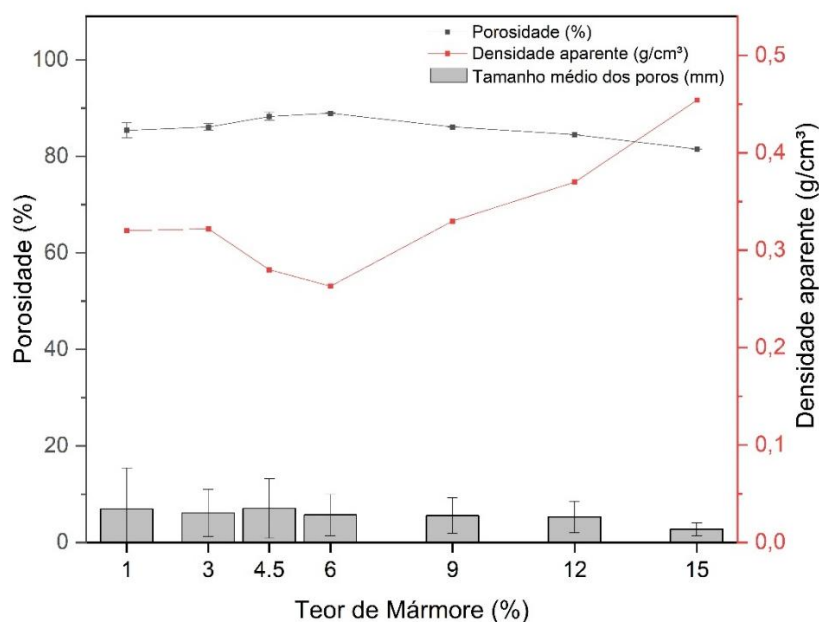
As composições com 12 e 15% de mármore apresentaram valores de resistência superiores ao limite inferior reportado para espumas vítreas comerciais (0,4–6,0 MPa), conforme Scheffler e Colombo (2005). Entretanto, para aplicação em sistemas de fachada ventilada, o material deve conciliar resistência mecânica com baixa densidade e elevada capacidade de isolamento térmico. Nesse sentido, os teores intermediários de mármore mostraram-se mais adequados, pois proporcionam um equilíbrio mais favorável entre porosidade e resistência, garantindo leveza e desempenho térmico sem comprometer a integridade mecânica necessária para suportar o sistema de fixação e as pressões dinâmicas do vento.

#### 5.4 DEFINIÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO EXPERIMENTAL

A seleção da composição mais adequada para a produção de placas de espuma vítrea destinadas a fachadas ventiladas necessita de um equilíbrio entre propriedades físicas e mecânicas.

Para essa definição, foram correlacionadas as variáveis de porosidade, densidade aparente e tamanho médio de poros, conforme mostrado na Figura 36. Essa análise permite identificar o teor de resíduo de mármore que apresenta o desempenho mais favorável, atendendo simultaneamente aos requisitos de porosidade, densidade aparente e tamanho médio de poros, fundamentais para sistemas posicionados em área externa.

Figura 36: Comparação de porosidade, densidade aparente e tamanho médio de poros em função do teor de mármore.

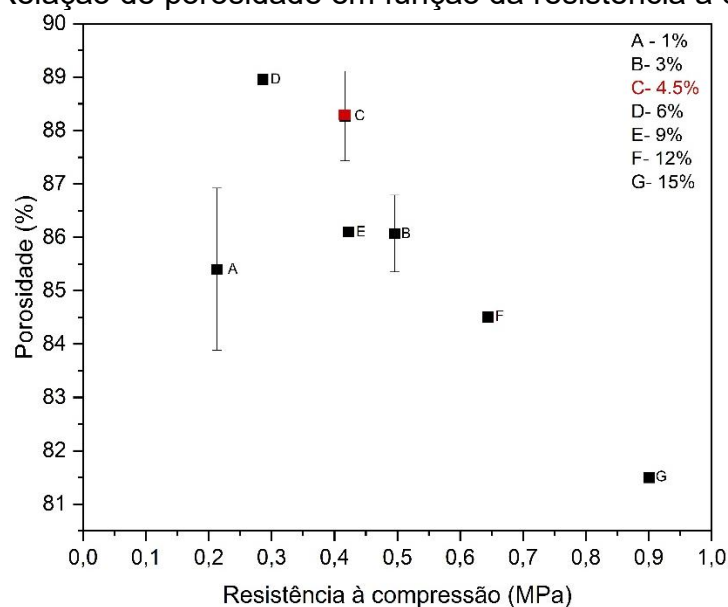


Fonte: Da autora (2026).

Observou-se que, até 6% de adição de mármore, houve o aumento da porosidade, associado à redução da densidade aparente, evidenciando a atuação eficiente do resíduo de mármore como agente espumante. Para teores superiores, verificou-se diminuição da porosidade acompanhada pelo aumento da densidade aparente, comportamento atribuído à instabilidade estrutural da espuma, possivelmente relacionada à coalescência e ao colapso dos poros durante a sinterização.

Os resultados de porosidade e resistência mecânica à compressão das sete composições estudadas, sinterizadas à temperatura de 950 °C, foram analisados de forma integrada, visando à obtenção de uma espuma vítrea com equilíbrio adequado entre leveza e desempenho mecânico. Essa análise conjunta permitiu verificar quais composições atendem simultaneamente aos requisitos de elevada porosidade e de resistência mecânica compatível com as necessidades para aplicação em sistemas de fachada ventilada. A Figura 37 apresentam os resultados de porosidade total e resistência mecânica à compressão dos corpos de prova obtidos, para os teores de mármore.

Figura 37: Relação de porosidade em função da resistência à compressão.



Fonte: Da autora (2026).

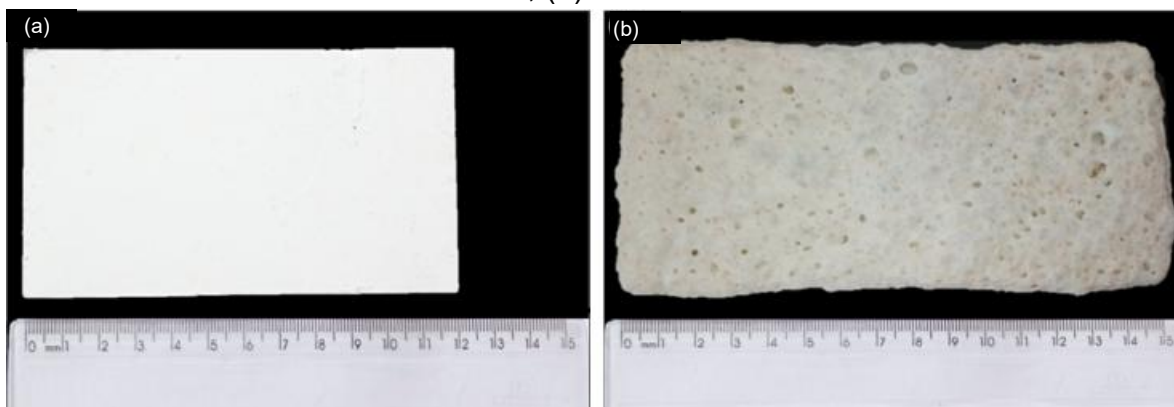
O gráfico de porosidade em função da resistência à compressão evidencia que, à medida que a resistência mecânica aumenta, há uma tendência de redução da porosidade, comportamento típico de materiais porosos. Assim, é essencial definir um teor de mármore que garanta um equilíbrio adequado entre resistência estrutural e leveza.

A amostra com teor de 4,5% de mármore mostrou-se como a condição experimental mais adequada para as placas de espuma vítrea. Essa composição apresentou o maior tamanho médio de poros, com dispersão moderada, elevada porosidade (88,27%), baixa densidade aparente e resistência mecânica à compressão adequada (0,417 MPa) valor que se situa dentro da faixa de desempenho das espumas vítreas comerciais, conforme Scheffler e Colombo (2005), evidenciando a composição de melhor desempenho do agente espumante e, por consequência, configurando uma espuma vítrea com elevado potencial para aprimorar a eficiência do sistema de fachadas ventiladas existente.

Para a realização dos ensaios de condutividade térmica, a composição selecionada, após a etapa de prensagem, permitiu a obtenção de placas de espuma vítrea com dimensões iniciais de 120 mm × 60 mm × 3,5 mm. Em seguida, essas placas foram submetidas ao processo de queima, durante o qual ocorreu expansão volumétrica das espumas vítreas, resultando em placas retangulares com dimensões aproximadas de 155 mm × 70 mm × 7 mm, conforme apresentado na Figura 38. Dessa

forma, foi possível realizar os ensaios de condutividade térmica, garantindo a padronização necessária para a avaliação do desempenho térmico da espuma vítrea.

Figura 38: Espumas vítreas produzidos com a composição selecionada (4,5%): (a) a seco; (b) Sinterizado.



Fonte: Da autora (2026).

#### 5.4.1 Ensaio condutividade térmica

A análise da condutividade térmica constitui um parâmetro fundamental para validar a funcionalidade de materiais como isolantes térmicos. Por esse motivo, o ensaio foi realizado para avaliar se a microestrutura obtida na composição selecionada (4,5% de resíduo de mármore) é capaz de atingir resultados de condutividade térmica compatíveis com os encontrados na literatura. Materiais cerâmicos densos, com baixa porosidade, apresentam maiores valores de condutividade térmica devido à continuidade da fase sólida, que favorece a condução de calor. Em contrapartida, cerâmicas porosas apresentam menor transferência de calor em razão dos poros preenchidos por ar, sendo considerados isolantes aqueles com condutividade térmica inferior a  $0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  (Vivaldini *et al.*, 2014).

Nesse contexto, estudos destacam a eficiência térmica de cerâmicas porosas. Pizzatto *et al.* (2021) avaliaram o comportamento térmico de cerâmicas, com resultado de  $\lambda = 0,46 \pm 0,09 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para a cerâmica porosa e  $\lambda = 1,44 \pm 0,17 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  para o porcelanato Laminum (Eliane, Grupo Mohawk). Espumas vítreas produzidas a partir de resíduos, com porosidade entre 40 e 90%, apresentaram condutividade

térmica de 0,06 a 0,175 W/m·K (Arcaro *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2018; Teixeira *et al.*, 2017).

O porcelanato comercial Serra Areia (Elizabeth, Grupo Mohawk) utilizado como referência comercial foi obtido a partir do corte de uma placa comercial com dimensões de 60 cm × 60 cm, resultando em uma amostra de 14 cm × 14 cm, conforme exigência dimensional do equipamento. Durante o ensaio, o porcelanato foi colocado no equipamento e monitorado por sensores de temperatura nas faces quente e fria. Ressalta-se que métodos de medição baseados em contato podem ser influenciados pela resistência térmica interfacial, contribuindo para valores de condutividade térmica aparente inferiores aos usualmente reportados para porcelanatos densos (Han *et al.*, 2020).

Os resultados apresentados na Tabela 16 confirmam o desempenho superior da placa de espuma vítrea como isolante térmico, atingindo um valor de  $0,0537 \pm 0,0001$  W/m·K. Este resultado é significativamente inferior ao obtido para o porcelanato comercial Serra Areia (Elizabeth, Grupo Mohawk) com resultado de  $0,2013 \pm 0,0110$  W/m·K, evidenciando que a estrutura celular desenvolvida é altamente eficaz na redução do fluxo de calor.

Tabela 16: Comparação da condutividade térmica entre porcelanato e cerâmica porosa.

<b>Ensaio realizado</b>	<b>Média A1</b>	<b>Média A2</b>	<b>Média A3</b>	<b>Média Total</b>	<b>D.P</b>
Porcelanato	0,1896	0,2034	0,2111	0,2013	0,0110
Cerâmica Porosa	0,0537	0,0538	0,0530	0,0537	0,0001

Fonte: Da autora (2026).

Esta redução na transferência de calor é um indicador direto da eficiência da microestrutura celular desenvolvida com 4,5% de resíduo de mármore, na qual o volume de ar estagnado atua como uma barreira física rigorosa ao fluxo térmico. Para o sistema de fachadas ventiladas, esse desempenho é fundamental, pois permite a diminuição da absorção de calor solar, promovendo uma redução substancial no consumo energético com climatização e garantindo maior conforto térmico.

Os resultados obtidos neste estudo foram igualmente comparados com dados da literatura provenientes do trabalho desenvolvido por Cechinel, Pereira e Acordi (2024), apresentados na Tabela 17. Nesse estudo, foram avaliados blocos de cerâmica vermelha e blocos de concreto celular utilizando o mesmo equipamento

experimental e a mesma metodologia aplicada na presente pesquisa para a determinação da condutividade térmica.

No referido estudo, os blocos de cerâmica vermelha analisados, o bloco B4 apresentou o menor valor de condutividade térmica (0,4236 W/m·K), sendo o mais isolante dentro dessa tipologia. Ainda assim, esse valor mostrou-se superior ao obtido para a placa de espuma vítrea desenvolvida no presente trabalho, evidenciando a maior eficiência térmica do material proposto.

Em relação aos blocos de concreto celular (BCC e BCS), embora apresentem valores de condutividade térmica inferiores aos dos blocos de cerâmica vermelha, estes também apresentam valores superiores ao obtido para a placa cerâmica porosa analisada. Ressalta-se que, no estudo de Cechinel, Pereira e Acordi (2024), tanto os blocos de cerâmica vermelha quanto os blocos de concreto celular foram submetidos às mesmas condições experimentais, o que confere maior confiabilidade à comparação dos resultados.

Tabela 17: Comparação da condutividade térmica de materiais cerâmicos e cimentícios para fachadas.

<b>Ensaio realizado</b>	<b>Condutividade térmica média (W/m·K)</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Referências</b>
Bloco de cerâmica vermelha (B4)	0,4236 ± 0,02	Vedação	(Cechinel; Pereira; Acordi, 2024)
Bloco de concreto celular (BCC)	0,0951 ± 0,01	Vedação	(Cechinel; Pereira; Acordi, 2024)
Bloco de concreto celular (BCS)	0,0944 ± 0,01	Vedação	(Cechinel; Pereira; Acordi, 2024)
Porcelanato	0,2013±0,0001	Revestimento	Dados da presente pesquisa
Cerâmica porosa	0,0537±0,0001	Revestimento Externo	Dados da presente pesquisa

Fonte: Da autora (2026).

Destaca-se que os blocos de cerâmica vermelha e os blocos de concreto celular atuam como elementos de vedação, enquanto a placa de espuma vítrea desenvolvida neste estudo é destinada à aplicação como camada externa em sistemas de fachadas ventiladas. Associada à câmara de ar em movimento característica desse sistema, a espuma vítrea atua como barreira térmica de elevado desempenho (0,0537 ± 0,0001 W/m·K), contribuindo de forma significativa para a

redução da transferência de calor por condução. Ainda que o sistema de fachadas ventiladas proporcione eficiência no desempenho térmico da edificação em função da câmara de ar, a utilização do porcelanato como camada externa pode não resultar em ganho térmico adicional significativo quando associada a sistemas de vedação compostos, por exemplo, por blocos de concreto celular (BCC e BCS). Considerando que o porcelanato apresenta condutividade térmica superior à dos blocos BCC e BCS, conforme indicado na Tabela 19, sua contribuição para o conforto térmico do sistema tende a ser pouco relevante, atuando predominantemente como elemento de proteção e acabamento estético.

Dessa forma, as placas de espumas vítreas apresentam desempenho térmico superior quando comparado a sistemas convencionais de vedação sem ventilação, potencializando a eficiência energética da edificação. Esses resultados reforçam o potencial da espuma vítrea como solução promissora para fachadas ventiladas que buscam melhorar a efetividade do sistema, atender a critérios mais rigorosos de conforto térmico e sustentabilidade.

## 6 CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou a viabilidade do desenvolvimento de placas cerâmicas porosas a partir de espumas vítreas, produzidas com resíduos industriais de vidro e de mármore, destinadas à aplicação em sistema de fachada ventilada. Foram avaliadas composições contendo 1; 3; 4,5; 6; 9;12 e 15% de resíduo de mármore, permitindo analisar de forma a influência desse resíduo na formação da microestrutura porosa e no desempenho físico, mecânico e térmico do material.

Dentre as composições estudadas, a composição com 4,5% de resíduo de mármore apresentou o melhor equilíbrio entre porosidade e resistência mecânica, com porosidade de 88,27%, densidade aparente de 0,280 g/cm<sup>3</sup> e resistência à compressão de 0,417 MPa, além de uma distribuição de poros mais homogênea. Essa microestrutura favoreceu a redução da transferência de calor por condução, refletindo diretamente no baixo valor de condutividade térmica, que apresentou média de 0,0537 ± 0,0001 W/m·K. Tal desempenho foi significativamente superior ao do porcelanato de referência Serra Areia (Elizabeth, Grupo Mohawk), validando a placa de espuma vítrea desenvolvida como um isolante térmico de alto desempenho e evidenciando seu elevado potencial para aplicações voltadas à eficiência energética.

Os resultados demonstraram que a combinação dos resíduos de vidro e mármore, submetida à queima a 950 °C, proporcionou condições adequadas para o desenvolvimento da espuma vítrea. Nessa temperatura, a fase vítrea apresentou viscosidade ideal para o aprisionamento dos gases gerados pela decomposição do resíduo de mármore, promovendo a formação de uma microestrutura porosa estável, com elevada porosidade e baixa densidade aparente, características essenciais para o desempenho térmico do material.

A avaliação conjunta das composições evidenciou que o teor de resíduo de mármore exerceu influência direta sobre a porosidade, densidade aparente, resistência mecânica e comportamento térmico das espumas vítreas. Observou-se que o aumento do teor de resíduo promoveu uma redução na formação de poros, resultando em porosidade total entre 81,50 e 88,96%, aumento da densidade aparente entre 0,263 e 0,454 g/cm<sup>3</sup> e elevação da resistência à compressão, entre 0,213 e 0,901 MPa. A composição contendo 4,5% de resíduo de mármore destacou-se por apresentar o melhor equilíbrio dos parâmetros de desempenho necessários para a aplicação proposta, configurando-se como a condição mais favorável para utilização

como placa cerâmica porosa para sistema de fachada ventilada. Esses resultados confirmam o controle composicional como uma estratégia eficaz para a otimização de espumas vítreas, demonstrando que o reaproveitamento de resíduos industriais de vidro e mármore pode resultar em um material técnico com propriedades adequadas para atender, de forma integrada, às exigências térmicas e estruturais.

Dessa forma, o presente estudo contribui para a área de materiais cerâmicos porosos e para a construção civil sustentável ao demonstrar que resíduos industriais de vidro, associados ao resíduo de mármore, podem ser valorizados na produção de espumas vítreas com propriedades adequadas à aplicação em sistemas de fachadas ventiladas. O trabalho confirma a eficácia da valorização de resíduos regionais na criação de um produto de maior valor agregado, alinhado aos princípios da economia circular.

A solução proposta constitui um componente inovador, capaz de conciliar leveza, resistência mecânica e baixa condutividade térmica, apresentando desempenho superior ao dos porcelanatos atualmente utilizados nesse sistema. Considerando que o sistema de fachadas ventiladas já apresenta benefícios consolidados em termos de conforto térmico e eficiência energética, a utilização da placa de espuma vítrea desenvolvida neste estudo possibilita potencializar ainda mais esses ganhos, contribuindo para a redução do fluxo de calor para o interior da edificação. Assim, o material proposto configura-se como uma alternativa para o aprimoramento do desempenho térmico e energético das edificações, associando inovação, sustentabilidade e eficiência ao setor da construção civil.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

A partir da realização da presente pesquisa, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Desenvolver estratégias para aprimorar o controle das variações dimensionais durante a queima, visando garantir maior estabilidade geométrica das placas de espumas vítreas;
- Estudar patamares de temperatura e rampas de aquecimento mais precisas para otimizar a liberação de CO<sub>2</sub> durante a queima, minimizando defeitos e poros irregulares e reduzindo imperfeições internas que possam comprometer o desempenho mecânico e a durabilidade das placas de espumas vítreas;
- Investigar acabamento superficial, cores e texturas, com o objetivo de tornar as placas esteticamente compatíveis com soluções arquitetônicas de fachada ventilada;
- Avaliar tratamentos ou modificações de composição para redução da absorção de água, buscando melhorar a resistência à umidade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, p. 0–77, 2004. Disponível em: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). Acesso em: 22 set. 2024.

ABRAVIDRO. Entenda a importância da reciclagem de vidro. **O Vidroplano**, São Paulo, p. 0–66, 2023. Disponível em: <https://abravidro.org.br/revistapdf/?urlpdf=23052>. Acesso em: 22 set. 2024.

ADAM, Q. F. *et al.* Thermal insulation of flexible pavements utilizing foam glass aggregates to mitigate frost action in cold regions — Development of design tools. **Construction and Building Materials**, vol. 414, p. 134841, 2024.

AGUILAR-JURADO, M. Á. *et al.* Effects of an Educational Glass Recycling Program against Environmental Pollution in Spain. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, vol. 16, nº 24, p. 5108, 2019.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. São Paulo: CETEV – Centro Técnico de Elaboração do Vidro, 2000. Disponível em: [https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcem/wp-content/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut\\_Prop\\_Vidro-Saint-Gobain-2000.pdf](https://www.unifal-mg.edu.br/ppgcem/wp-content/uploads/sites/116/2020/06/NaturezaEstrut_Prop_Vidro-Saint-Gobain-2000.pdf). Acesso em: 3 nov. 2024.

ALMEIDA, K. S. de *et al.* Incorporação de resíduo de gesso em formulação para adoquim cerâmico. **Cerâmica industrial**, vol. 25, nº esp, 2020.

ALTHOF, R. B.; PASSOLD, D.; MARQUES, T. D. Análise comparativa de revestimento de fachada: estudo de caso de substituição do revestimento cerâmico aderido por revestimento de acm em fachada ventilada em um edifício / Comparative analysis of facade coating: case study of replacement of ceramic coating adhered by acm coating on ventilated facade in a building. **Brazilian Journal of Development**, vol. 7, nº 9, 93926–93942, 2021.

ÁLVARO GUZMÁN, A. *et al.* Optimization of the technological properties of porcelain tile bodies containing rice straw ash using the design of experiments methodology. **Ceramics International**, vol. 42, nº 14, p. 15383–15396, 2016.

ARCARO, S. *et al.* Thermal insulating foams produced from glass waste and banana leaves. **Materials Research**, vol. 19, nº 5, p. 1064-1069, 2016.

ARUNTAŞ, H. Y. *et al.* Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials and Design**, vol. 31, nº 8, p.4039-4042, 2010.

ASSEFI, M. *et al.* High strength glass foams recycled from LCD waste screens for insulation application. **Journal of Cleaner Production**, vol. 280, p. 124311, 2021.

ASSIS, O. B. G. O uso de vidro reciclado na confecção de membranas para microfiltração. **Cerâmica**, vol. 52, nº 321, p. 105–113, 2006.

ATTILA, Y.; GÜDEN, M.; TAŞDEMIRCI, A. Foam glass processing using a polishing glass powder residue. **Ceramics International**, vol. 39, nº 5, p. 5869–5877, 2013.

ATZORI, D. *et al.* Industrial Technologies for CO2 Reduction Applicable to Glass Furnaces. **Thermo**, vol. 3, nº 4, p. 682–710, 2023.

AYADI, A. *et al.* Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass. **Powder Technology**, vol. 208, nº 2, p. 423–426, 2011.

AYDIN, E.; AREL, H. Ş. High-volume marble substitution in cement-paste: Towards a better sustainability. **Journal of Cleaner Production**, vol. 237, 117801, 2019.

BABISK, M. P. *et al.* Foam Glass Synthesized Exclusively from Wastes. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, vol. 18, nº 2, p. e04310, 2023.

ABIROCHAS. Balanço do setor brasileiro de rochas ornamentais e de revestimento em 2023. Brasília. p.0-44, 2024. Disponível em: [www.abirochas.com.br](http://www.abirochas.com.br).

BALTER, J.; MIRANDA-GASSULL, V.; DISCOLI, C. La Fachada ventilada y su posible adaptación en ciudades de la región de Cuyo, Argentina. **Revista de Arquitectura**, (Bogotá), v. 23, n. 2, p. 94–105, 2021.

BARBOSA, K. S. L. *et al.* Resíduos de mármore e granito em materiais compósitos: relação da granulometria nas propriedades mecânicas. **Conjecturas**, vol. 22, nº 2, p.1319-1331, 2022.

BEDNAREK, P. *et al.* Gelcasting of alumina with a new monomer synthesized from glucose. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 30, nº 8, p. 1795–1801, 2010.

BENGISU, M.; YILMAZ, E. Gelcasting of alumina and zirconia using chitosan gels. **Ceramics International**, vol. 28, nº 4, p. 431–438, 2002.

BERNARDO, E. Micro- and macro-cellular sintered glass-ceramics from wastes. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 27, nº 6, p. 2415–2422, 2007.

BERNARDO, E. *et al.* Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. **Ceramics International**, vol. 33, nº 6, p. 963–968, 2007.

BESSONOV, I. *et al.* Optimization of the technology for the production of foam glass aggregate. **E3S Web of Conferences**, vol. 164, p. 14016, 2020.

BOCCACCINI, A. R. *et al.* Development of titania coatings on glass foams. **Construction and Building Materials**, vol. 23, nº 7, p. 2554–2558, 2009.

BOONPHAYAK, P. *et al.* Waste-to-resource: Employing lime mud as a foaming agent in glass foam manufacturing. **Construction and Building Materials**, vol. 450, 138590, 2024.

CALAS, G.; GALOISY, L.; CORMIER, L. The Color of Glass. *In: ENCYCLOPEDIA OF GLASS SCIENCE, TECHNOLOGY, HISTORY, AND CULTURE*. Wiley, p. 677–691, 2021

CARRARO, C. G.; HOTZA, D. Diagnóstico e gestão de resíduos sólidos industriais em Santa Catarina: possibilidades de aproveitamento na indústria cerâmica. **Cerâmica industrial**, vol. 30, e1430, 2025.

CECHINEL, P. C.; PEREIRA, F. R.; ACORDI, J. Estudo das propriedades de blocos de cerâmica vermelha para uso em paredes resistentes ao fogo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2024. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/handle/1/11308>. Acesso em: 19 jan. 2026.

CHEN, Y. *et al.* Defect inspection technologies for additive manufacturing. **International Journal of Extreme Manufacturing**, vol. 3, nº 2, p. 022002, 2021.

CHEN, Q. *et al.* Modelling of the strength–porosity relationship in glass-ceramic foam scaffolds for bone repair. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 34, nº 11, p. 2663–2673, 2014.

CHEN, Z. *et al.* Reuse of mineral wool waste and recycled glass in ceramic foams. **Ceramics International**, vol. 45, nº 12, p. 15057–15064, 2019.

CHEN, Y. *et al.* Utilization of waste glass as precursor material in one-part alkali-activated aggregates. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 33, p. 5551–5558, 2024.

CHEN, Y. *et al.* Valorization of High-Volume Crushed Waste Glass as Fine Aggregate in Foamed Geopolymer. **Case Studies in Construction Materials**, v. 22, p. e04202, 2025.

CHINELATTO, A. S. A. *et al.* Estudo da viabilidade do uso de resíduo de polimento de rochas ornamentais em porcelanas. **Revista Materia**, v. 20, nº. 4, p. 1075-1086, 2015.

CHINNAM, R. K. *et al.* Review. Functional glasses and glass-ceramics derived from iron rich waste and combination of industrial residues. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 365, nº 1, p. 63–74, 2013.

COLOMBO, P. Conventional and novel processing methods for cellular ceramics. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, vol. 364, nº 1838, p. 109–124, 2006.

COLOMBO, P. *et al.* Inertization and reuse of waste materials by vitrification and fabrication of glass-based products. **Current Opinion in Solid State and Materials Science**, vol. 7, nº 3, p. 225–239, 2003.

CRAMER, J. Effective governance of circular economies: An international comparison. **Journal of Cleaner Production**, v. 343, p. 130874, 2022.

CRUZ, G. M. *et al.* A novel foam glass obtained from solid waste: A sustainable strategy for application in the degradation of an environmental pollutant. **Ceramics International**, vol. 48, nº 18, p. 26351–26360, 2022.

DA SILVA FERNANDES, F. A. *et al.* Glass foams produced from soda-lime glass waste and rice husk ash applied as partial substitutes for concrete aggregates. **Process Safety and Environmental Protection**, vol. 128, p. 77–84, 2019.

DA SILVA, W.; FILGUEIRAS, C. O vidro e sua importância na vida e na química. **Química Nova**, v. 46, nº. 5, p. 491-501, 2023.

DELBARI, S. A.; HOF, L. A. Glass waste circular economy - Advancing to high-value glass sheets recovery using industry 4.0 and 5.0 technologies. **Journal of Cleaner Production**, vol. 462, p. 142629, 2024.

DENSLEY TINGLEY, D.; HATHWAY, A.; DAVISON, B. An environmental impact comparison of external wall insulation types. **Building and Environment**, vol. 85, p. 182–189, 2015.

DONADEL, K. *et al.* Processamento e caracterização de espumas cerâmicas de microfibras naturais de sílica amorfa obtidas pelo método de réplica. **Exacta**, vol. 6, nº 1, p. 41–48, 2009.

DUONG-VIET, C. *et al.* Silicon carbide foam as a porous support platform for catalytic applications. **New Journal of Chemistry**, v. 40, nº. 5, p. 4285-4299, 2016.

MARI, E. A. *Los vidrios: propiedades, tecnologías de fabricación y aplicaciones*. Buenos Aires: **Editorial Américalee**, p.447,1982.

EL-AMIR, A. A. M. *et al.* Aluminium dross/soda lime glass waste-derived high-quality glass foam. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 15, p. 4940–4948, 2021.

ELICHE-QUESADA, D. *et al.* Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials**, vol. 34, p. 275–284, 2012.

ERGÜN, A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 25, nº 2, 2011.

EWAIS, E. M. M. *et al.* Optimal conditions and significant factors for fabrication of soda lime glass foam from industrial waste using nano AlN. **Journal of Alloys and Compounds**, vol. 747, p. 408–415, 2018.

GOMES, F. C. F. Placas à base de desperdícios industriais para paredes interiores. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Braga, 2021.

FERNANDES, H. R. *et al.* The use of egg shells to produce Cathode Ray Tube (CRT) glass foams. **Ceramics International**, vol. 39, nº 8, p. 9071–9078, 2013.

FERNANDES, F. A. da S.; FERNANDES, T. F. da S.; ROSSIGNOLO, J. A. Production of Glass Foam in a Microwave Oven Using Agro-Industrial Waste as Raw Material. **Buildings**, vol. 14, nº 6, p. 1643, 2024.

FERNANDES, H. R.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. **Ceramics International**, vol. 35, nº 1, p. 229–235, 2009.

GUEDES, I. *et al.* GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL: DESAFIOS E ESTRATÉGIAS. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, vol. 6, nº 1, 2024.

FIUME, E. *et al.* Foam Replica Method in the Manufacturing of Bioactive Glass Scaffolds: Out-of-Date Technology or Still Underexploited Potential?. **Materials**, vol. 14, nº 11, p. 2795, 2021.

NICOLÁS, M. *et al.* Low-temperature sintering of ceramic bricks from clay, waste glass and sand. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, vol. 63, nº 5, p. 377–388, 2024.

BEZERRA, F. D. Rochas ornamentais: novas perspectivas de investimento. **Revista Cadernos do Semiárido**, v. 2, n. 21, 2017.

GHOMI, H.; FATHI, M. H.; EDRIS, H. Effect of the composition of hydroxyapatite/bioactive glass nanocomposite foams on their bioactivity and mechanical properties. **Materials Research Bulletin**, vol. 47, nº 11, p. 3523–3532, 2012.

GONZENBACH, U. T. *et al.* Processing of Particle-Stabilized Wet Foams Into Porous Ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, vol. 90, n° 11, p. 3407–3414, 2007.

GRANQVIST, C. G. *et al.* Electrochromic materials and devices for energy efficiency and human comfort in buildings: A critical review. **Electrochimica Acta**, vol. 259, p. 1170–1182, 2018.

GUO, P. *et al.* New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. **Construction and Building Materials**, vol. 257, p. 119579, 2020.

GUO, Y. *et al.* Novel glass ceramic foams materials based on polishing porcelain waste using the carbon ash waste as foaming agent. **Construction and Building Materials**, vol. 125, p. 1093–1100, 2016.

GUTZOW, I. S.; SCHMELZER, J. W. P. Theory of Crystal Growth and Dissolution in Under-cooled Melts: Basic Approaches. *In*: THE VITREOUS STATE. 2013, p. 333–365.

HAN, D. *et al.* Measurement of the thermophysical properties of anisotropic insulation materials with consideration of the effect of thermal contact resistance. **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1353, 2020.

HASSAN, A. M. *et al.* Alkali activation of waste glass and aluminium dross for self-foaming glass ceramics production. **Ceramics International**, vol. 51, n° 5, p. 6365–6378, 2025.

HESKY, D. *et al.* Water and waterglass mixtures for foam glass production. **Ceramics International**, vol. 41, n° 10, p. 12604–12613, 2015.

HORONKO, I.; TIHOMIROVS, P.; KORJAKINS, A. Study of Properties and Characteristics of a Foam Glass from a Mixture of Glass Shards and Perlite. **Materials**, vol. 18, n° 18, p. 4422, 2025.

HUO, W. *et al.* Mechanical strength of highly porous ceramic foams with thin and lamellate cell wall from particle-stabilized foams. **Ceramics International**, vol. 44, n° 5, p.5780-5784,2018.

IBRAHIM, M. H. *et al.* Development of porous glass-ceramic using silica sand for wall tiles application. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

IOANA, A. *et al.* Glass Foam from Flat Glass Waste Produced by the Microwave Irradiation Technique. **Micromachines**, vol. 13, n° 4, p. 550, 2022.

JIANG, C. *et al.* Tailoring pore structure and properties of waste-derived ceramic foams for lightweight construction. **RSC Advances**, vol. 9, n° 62, p. 36308-36315, 2019.

JOST, D. *et al.* Life cycle assessment of measures towards a low-carbon flat glass production. **Journal of Cleaner Production**, vol. 501, p. 145294,2025.

KHAN, M. N. N. *et al.* Filler effect of pozzolanic materials on the strength and microstructure development of mortar. **KSCE Journal of Civil Engineering**, vol. 21, n° 1, p. 274–284, 2017.

KOKABI, M.; BABALUO, A. A.; BARATI, A. Gelation process in low-toxic gelcasting systems. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 26, n° 15, p. 3083–3090, 2006.

KÖNIG, J. *et al.* Gas-releasing reactions in foam-glass formation using carbon and  $Mn_xO_y$  as the foaming agents. **Ceramics International**, vol. 43, n° 5, p.4638-4646, 2017.

KÖNIG, J. *et al.* Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. **Construction and Building Materials**, vol. 247, p. 118574, 2020.

KÖNIG, J.; PETERSEN, R. R.; YUE, Y. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. **Ceramics International**, vol. 41, n° 8, p. 9793–9800, 2015.

KÖNIG, J.; PETERSEN, R. R.; YUE, Y. Influence of the glass particle size on the foaming process and physical characteristics of foam glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 447, p. 190-197, 2016.

KUMARI, S.; AGARWAL, S.; KHAN, S. Micro/nano glass pollution as an emerging pollutant in near future. **Journal of Hazardous Materials Advances**, vol. 6, p. 100063, 2022.

KUSUMAWARDANI, D. M. *et al.* Evaluation of the feasibility of treated waste glass as aggregate in asphalt mixture. **Innovative Infrastructure Solutions**, vol. 8, n° 4, p. 131, 2023.

OO D'AMORE, G. *et al.* Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. **Journal of Cleaner Production**, vol. 165, p. 1306–1315, 2017.

LENART, S.; KAYNIA, A. M. Dynamic properties of lightweight foamed glass and their effect on railway vibration. **Transportation Geotechnics**, vol. 21, p. 100276, 2019.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; FOTIADOU, S. Performance of granulated foam glass concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 28, n° 1, p. 759–768, 2012.

LIU, D.-M. Influence of porosity and pore size on the compressive strength of porous hydroxyapatite ceramic. **Ceramics International**, vol. 23, n° 2, p. 135–139, 1997.

LOPES, M. M. S. *et al.* Optimization of performance of building paints using granite and marble waste. **Ambiente Construído**, vol. 24, e136181, 2024.

KING, S. *et al.* Desenvolvimento de espuma vítrea a partir de rejeitos de vidro. 2018, Maringá. **8º Encontro Anual de Iniciação Tecnológica e Inovação**. Maringá: 2018.

MANEVICH, V. E.; SUBBOTIN, K. Yu. Mechanism of foam-glass formation. **Glass and Ceramics**, vol. 65, nº 5–6, p. 154–156, 2008.

MARANGONI, M. *et al.* Cellular glass–ceramics from a self foaming mixture of glass and basalt scoria. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 403, p. 38–46, 2014.

MARIOSI, F. R. *et al.* Desenvolvimento de espumas vítreas a partir de garrafa e casca de ovo. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 24, nº 1, e-12314, 2019.

MARQUEZ, A.; SINGH, J.; MAHARAJ, C. Corrosion Under Insulation Examination to Prevent Failures in Equipment at a Petrochemical Plant. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, vol. 21, nº 3, p.723–732 ,2021.

MÉAR, F.; YOT, P.; RIBES, M. Effects of temperature, reaction time and reducing agent content on the synthesis of macroporous foam glasses from waste funnel glasses. **Materials Letters**, vol. 60, nº 7, p. 929–934, 2006.

MELO, V. *et al.* ANÁLISE DA DIFICULDADE DE RECICLAGEM DO VIDRO NO BRASIL E A LOGÍSTICA REVERSA COMO ALTERNATIVA PARA MINIMIZAR OS IMPACTOS AMBIENTAIS. 2023. **Contemporânea – Revista de Ética e Filosofia Política**, v. 3, n. 5, p. 4226–4241, 2023.

MOHAJERANI, A. *et al.* Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review. **Construction and Building Materials**, vol. 156, p. 443–467, 2017.

MOHAMMED AL-SAUDI, S. K.; GÉBER, R. Production of lightweight geopolymer concrete with foam glass aggregate derived from cathode-ray glass waste. **Case Studies in Construction Materials**, vol. 21, p. e03888, 2024.

MONTERO, M. A. *et al.* The use of sewage sludge and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**, vol. 46, nº 4, p.404-408, 2009.

MUGONI, C. *et al.* Design of glass foams with low environmental impact. **Ceramics International**, vol. 41, nº 3, p. 3400–3408, 2015.

MÜLLER, A.; ALARCON, O. E. Desenvolvimento de um sistema de fachada ventilada com placas cerâmicas de grês porcelanato voltado para a construção civil do Brasil. **Cerâmica**, vol. 51, nº 320, 2005.

OLIVEIRA, F. de A. *et al.* Previsão da geração de resíduos na construção civil por meio da modelagem BIM. **Ambiente Construído**, vol. 20, nº 4, p. 157–176, 2020.

OLIVEIRA, M. M. de; JÚNIOR, G. B. A.; JÚNIOR, J. de A. M. Panorama dos principais materiais reciclados no Brasil. 2022. **Anais do II Congresso Nacional On-line de Conservação e Educação Ambiental**. Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente, 2022.

OLOFINNADE, O. M. *et al.* Application of Waste Glass Powder as a Partial Cement Substitute towards more Sustainable Concrete Production. **International Journal of Engineering Research in Africa**, vol. 31, p. 77–93, 2017.

OSFOURI, M. *et al.* Sustainable structural lightweight concrete containing foam glass aggregates. **Journal of Building Engineering**, vol. 104, p. 112270, 2025.

OSFOURI, M.; IBRAHIM, J.-E. F. M.; SIMON, A. Properties of foam glass produced with the use of soot from a cement factory as a foaming agent: A study based on Taguchi design of experiments. **Ceramics International**, vol. 50, nº 24, Part A, p. 53025–53038, 2024.

OSFOURI, M.; SIMON, A. The detection of porous media volume using the modified Archimedes method. **Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials**, vol. 75, nº 2, p. 48–51, 2023.

OSWALDO, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. Vidros. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola – Edição especial, p. 0–12, 2001.

OWOEYE, S. S. *et al.* Preparation and characterization of foam glass from waste container glasses and water glass for application in thermal insulations. **Ceramics International**, vol. 46, nº 8, p. 11770–11775, 2020.

PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2024. São Paulo: 2024. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/12/panorama-dos-residuos-solidos-no-brasil-2024.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2025. São Paulo: 2025. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2025/12/panorama-2025.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2026.

PANOV, Y. T. *et al.* High-Performance Thermal Insulation Material Based on Waste Glass. 2020. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. vol. 896, p. 012074, 2020.

PAPADOPOULOS, A. M.; GIAMA, E. Environmental performance evaluation of thermal insulation materials and its impact on the building. **Building and Environment**, vol. 42, nº 5, p. 2178–2187, 2007.

PARGANA, N. *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. **Energy and Buildings**, vol. 82, p. 466-481, 2014.

PETERSEN, R. R. *et al.* Effect of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as foaming agent on dynamics and structure of foam glass melts. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 400, p. 1–5, 2014.

PETERSEN, R. R.; KÖNIG, J.; YUE, Y. The mechanism of foaming and thermal conductivity of glasses foamed with MnO<sub>2</sub>. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 425, p. 74–82, 2015.

PETERSEN, R. R.; KÖNIG, J.; YUE, Y. The viscosity window of the silicate glass foam production. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 456, p. 49–54, 2017.

PIZZATTO, F. O. *et al.* Análise de desempenho de placas cerâmicas porosas obtidas com resíduo de vidro e lama de cal para aplicação em fachadas ventiladas. **Cerâmica**, vol. 67, nº 384, p. 388–398, 2021.

PIZZATTO, S. M. S. *et al.* Thermal evaluation of the use of porous ceramic plates on ventilated façades – Part I: Effect of composition and firing temperature on porosity and bending strength. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, vol. 18, nº 6, p. 2169–2177, 2021.

PIZZATTO, S. M. dos S. *et al.* Thermal evaluation of the use of porous ceramic plates on ventilated façades—part II: Thermal behavior. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, vol. 18, nº 5, p. 1734-1742 2021.

POKORNY, A.; VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. Influência da adição de alumina na microestrutura da espuma vítrea. **Cerâmica**, vol. 54, nº 329, p. 97–102, 2008.

POKORNY, A.; VICENZI, J.; PÉREZ BERGMANN, C. Influence of heating rate on the microstructure of glass foams. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, vol. 29, nº 2, p. 172–179, 2011.

POMARANZI, G. *et al.* Experimental assessment of the effects of a porous double skin façade system on cladding loads. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, vol. 196, p. 104019, 2020.

POZZOBOM, I. E. F. *et al.* Processamento e caracterização de espumas vitrocerâmicas do sistema Li<sub>2</sub>O-ZrO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (LZSA) produzidas por gelcasting. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 19, nº 2, p. 117–124, 2014.

PURBA, W. *et al.* Potentials of Gas Emission Reduction (GHG) by the Glass sheet Industry through energy conservation. In: **1st International Conference on Bioenergy and Environmentally Sustainable Agricultural Technology (ICoN BEAT 2019)**. *E3S Web of Conferences*, v. 226, art. 00047, p. 1–12, 2021.

QU, X. *et al.* Novel glass foam with microwave absorption properties obtained from waste glass, C and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 601, p. 122069, 2023.

QUAGLIO, R. S.; ARANA, A. R. A. Diagnóstico da gestão de resíduos da construção civil a partir da leitura da paisagem urbana. **Sociedade & Natureza**, vol. 32, p. 457–471, 2020.

RAMTEKE, D. D. *et al.* Up-cycling of ‘unrecyclable’ glasses in glass-based foams by weak alkali-activation, gel casting and low-temperature sintering. **Journal of Cleaner Production**, vol. 278, p. 123985, 2021.

RANGEL, E. M. *et al.* Espumas vítreas produzidas a partir de resíduos sólidos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 23, nº 1, e-11967, 2018.

RANGEL, E. M. *et al.* Influence of processing parameters on the microstructure of the eco-friendly glass foam. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, vol. 18, nº 3, p. 862–868, 2021.

RODRIGUES, R.; DE BRITO, J.; SARDINHA, M. **Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge**, v. 77, p. 349–356, 2015.

SALZMANN, R. D.; ACKERMAN, J. N.; CICEK, N. Pilot-scale, on-site investigation of crushed recycled glass as tertiary filter media for municipal lagoon wastewater treatment. **Environmental Technology**, vol. 43, nº 1, p. 51–59, 2022.

SANTANA, A. L.; LANGE, L. C.; MAGALHÃES, A. S. The impact of the economic instrument Recycling Exchange intended for waste pickers on the glass recycling market in the state of Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, vol. 27, nº 4, p.737-747,2022.

SANTOS, E. A. *et al.* Influência da incorporação de resíduo de lapidação de vidro nas propriedades da argamassa de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 29, nº 2, 2024.

SANTOS, P. A. M. dos *et al.* Sustainable Glass Foams Produced from Glass Bottles and Tobacco Residue. **Materials Research**, vol. 22, nº 1, e20180452 ,2018.

SAPARUDDIN, D. I. *et al.* Effect of sintering temperature on the crystal growth, microstructure and mechanical strength of foam glass-ceramic from waste materials. **Journal of Materials Research and Technology**, vol. 9, nº 3, p. 5640–5647, 2020.

SARI, A. *et al.* The influence of process parameters on the properties of glass foam produced from industrial waste glass using sic as the foaming agent. **Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering**, vol. 23, nº 1, p. 21–36, 2022.

SASSI, M. *et al.* Effect of microstructure on the physicochemical characteristics of foam glass made by soda lime -CRT glasses and aluminium dross. **Ceramics International**, vol. 50, nº 19, p. 37085–37095, 2024.

SAVIĆ, V. *et al.* Foam glasses made from green bottle glass and sugar beet factory lime as a foaming agent. **Heliyon**, vol. 9, nº 7, p. e17664, 2023.

SCARINCI, G.; BRUSATIN, G.; BERNARDO, E. Glass Foams. In: BERNARDO, E. (Ed.). *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. Wiley, 2005. p. 158–176.

SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. **Cellular Ceramics**. *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005

SCHIAVONI, S. *et al.* Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 62, p. 988–1011, 2016.

SCHMITZ, A. *et al.* Energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the European glass industry. **Energy Policy**, vol. 39, n° 1, p. 142–155, 2011.

SEPULVEDA, P.; BINNER, J. G. P. Processing of cellular ceramics by foaming and in situ polymerisation of organic monomers. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 19, n° 12, p. 2059–2066, 1999.

SHELBY, J. E. **Introduction to Glass Science and Technology**. London: Royal Society of Chemistry, 2005. 308 p.

SIDDIKA, A.; HAJIMOHAMMADI, A.; SAHAJWALLA, V. A novel eco-friendly foaming technique for developing sustainable glass foams from the waste glass. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 190, p. 106801, 2023.

SIDDIKA, A.; HAJIMOHAMMADI, A.; SAHAJWALLA, V. Powder sintering and gel casting methods in making glass foam using waste glass: A review on parameters, performance, and challenges. **Ceramics International**, vol. 48, n° 2, p. 1494–1511, 2022.

SILVA, J. B. *et al.* Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, vol. 51, n° 320, p.325-330 2005.

SILVA, R. V. *et al.* The role of glass waste in the production of ceramic-based products and other applications: A review. **Journal of Cleaner Production**, vol. 167, p. 346–364, 2017.

SILVA, F. S.; GOMES RIBEIRO, C. E.; SÁNCHEZ RODRIGUEZ, R. J. Physical and mechanical characterization of artificial stone with marble calcite waste and epoxy resin. **Materials Research**, vol. 21, nº 1, e20160377, 2018.

SILVA, C. L. da; SAUKA, J. E. Desenvolvimento local e possibilidades de uma economia circular a partir de uma cooperativa de catadores de materiais recicláveis. **Interações (Campo Grande)**, p. e2524030, 2024.

SILVA, L. F. B. da; THOMAZ, E.; OLIVEIRA, L. A. de. Ventilated cladding systems: structural and drainability performance criteria. *In: AMBIENTE CONSTRUÍDO*. 2018. p. 341–358.

SILVEIRA, R. P. *et al.* Tratamento de efluentes da indústria de rochas ornamentais: uma abordagem bibliométrica. **ScientiaTec**, vol. 4, nº 1, p.42-59, 2017.

SMILJANIĆ, S.; SPREITZER, M.; KÖNIG, J. Application of the container waste glass in foamed glass production. **Open Ceramics**, vol. 14, p. 100339, 2023.

SOOKSAEN, P. *et al.* Fabrication of granular foam glass aggregates from soda lime silicate glass waste. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, vol. 33, nº 4, p.1671, 2023.

SOUZA, M. T. *et al.* Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes. **Process Safety and Environmental Protection**, vol. 111, p. 60–64, 2017.

SOUZA, E. De *et al.* Vitrocerâmicas porosas do sistema LZSA utilizando resíduos orgânicos como agentes formadores de poros. **Exacta**, vol. 4, nº 2, p. 289–296, 2008.

SOUZA BARRETO, L. S. *et al.* Reuse of ornamental rock solid waste for stabilization and solidification of galvanic solid waste: Optimization for sustainable waste management strategy. **Journal of Cleaner Production**, vol. 275, p.122996,2020.

SPIRIDONOV, Yu. A.; ORLOVA, L. A. Problems of Foam Glass Production. **Glass and Ceramics**, vol. 60, n° 9/10, p. 313–314, 2003.

STEINER, A.; SCHAAF, J. Van Der; BEERKENS, R. G. C. Numerical simulation of bubble growth in foam glass containing polyvalent ions. 6th Conference of the European Society of Glass Science and Technology (ESG 2002), *Glass Odyssey: 6th ESG Conference*, Montpellier: **European Society of Glass Science and Technology**, 2002. p. 1–6.

STUDART, A. R. *et al.* Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review. **Journal of the American Ceramic Society**, vol. 89, n° 6, p. 1771–1789, 2006.

SUFIAN, M. *et al.* An experimental and empirical study on the use of waste marble powder in construction material. **Materials**, vol. 14, n° 14, p. 3829,2021.

TALLON, C. *et al.* Gelcasting of alumina suspensions containing nanoparticles with glycerol monoacrylate. **Journal of the European Ceramic Society**, vol. 29, n° 5, p. 875–880, 2009.

TEIXEIRA, L.B. *et al.* Produção e caracterização de espumas vitrocrystalinas a partir de resíduos sólidos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, vol. 22, n° 4, e-11884, 2017.

TEIXEIRA, L.B. *et al.* Vitrocrystalline foams produced from glass and oyster shell wastes. **Ceramics International**, vol. 43, n° 9, p. 6730–6737, 2017.

TOPÇU, I. B.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. **Cement and Concrete Research**, vol. 34, n° 2, p.267-274 2004.

TRAMONTIN SOUZA, M. *et al.* Sustainable glass foams produced with stone waste as a pore-forming agent: Assessing the role of heating rate in foamability and glass foams recyclability. **Journal of Cleaner Production**, vol. 338, p. 130596, 2022.

TULYAGANOV, D. U. *et al.* Preparation and characterization of high compressive strength foams from sheet glass. **Journal of Porous Materials**, vol. 13, n° 2, p. 133–139, 2006.

VARSHNEYA, A. K.; MAURO, J. C. **Fundamentals of Inorganic Glasses**. 3rd ed. Amsterdam: **Elsevier**, 2019, 753 p.

VETTORATO, J. G. *et al.* O VIDRO E A IMPORTÂNCIA DE SEU PROCESSO DE RECICLAGEM E LOGÍSTICA REVERSA. **DI@LOGUS**, vol. 10, n° 1, p. 25–47, 2021.

VIVALDINI, D. O. *et al.* Review: fundamentals and materials for the microstructure design of high performance refractory thermal insulating. **Cerâmica**, v. 60, n. 354, p. 163–178, 2014.

WANG, H. *et al.* Effects of Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·5H<sub>2</sub>O on the properties of foam glass from waste glass and titania-bearing blast furnace slag. **Materials Letters**, vol. 132, p. 176–178, 2014.

WANG, L. P. *et al.* Foam glass production from waste bottle glass using silicon cutting waste of loose abrasive slurry sawing as foaming agent. **Construction and Building Materials**, vol. 383, p. 131344, 2023.

WANG, W.; CHI, J.; NIU, S. On the Application of foam Glass in Interior Design. **E3S Web of Conferences**, vol. 406, p. 04033, 2023.

WANG, H.; FENG, K.; SUN, Q. Effect of calcium carbonate on the preparation of glass ceramic foams from water-quenched titanium-bearing blast

furnace slag and waste glass. **Advances in Applied Ceramics**, vol. 117, n° 5, p. 312–318, 2018.

WATTANASIRIWECH, D. *et al.* Foam glass from municipal waste as a lightweight aggregate for cement mortar. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, vol. 351, n° 1, p. 012008, 2019.

ZESCHKY, J. *et al.* Preceramic polymer derived cellular ceramics. **Composites Science and Technology**, vol. 63, n° 16, p.2361-2370, 2003.

ZHAI, C. *et al.* Producing light, strong foam glass under a low sintering temperature with insights from molecular simulations. **Journal of Non-Crystalline Solids**, vol. 582, p. 121447, 2022.

ZHANG, Y. *et al.* Preparation and Study of Borosilicate Foam Glass with High Thermal Insulation and Mechanical Strength. **Journal of Renewable Materials**, vol. 11, n° 5, p.2125-2141,2023.

ZHANG, Q. *et al.* Preparation of high strength glass ceramic foams from waste cathode ray tube and germanium tailings. **Construction and Building Materials**, vol. 111, p. 105–110, 2016.

ZHU, Y. *et al.* Air drying scalable production of hydrophobic, mechanically stable, and thermally insulating lignocellulosic foam. **Chemical Engineering Journal**, vol. 450, p. 138300, 2022.

ZHU, M. *et al.* Preparation of glass ceramic foams for thermal insulation applications from coal fly ash and waste glass. **Construction and Building Materials**, vol. 112, p. 398–405, 2016.

ZIEJEWSKA, C.; GRELA, A.; HEBDA, M. Influence of Waste Glass Particle Size on the Physico-Mechanical Properties and Porosity of Foamed Geopolymer Composites Based on Coal Fly Ash. **Materials**, v. 16, n° 5, p. 2044,2023.

ZIER, M. *et al.* A review of decarbonization options for the glass industry.  
**Energy Conversion and Management: X**, vol. 10, 100083, 2021.