

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CARLOS EDUARDO KELLER BERTOLO

**ESPUMAS PRODUZIDAS COM VIDRO RECICLADO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ: AVALIAÇÃO PARA POTENCIAIS APLICAÇÕES COMO ISOLANTE
TÉRMICO EM FORROS**

**Alegrete
2025**

CARLOS EDUARDO KELLER BERTOLO

**ESPUMAS PRODUZIDAS COM VIDRO RECICLADO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ: AVALIAÇÃO PARA POTENCIAIS APLICAÇÕES COMO ISOLANTE
TÉRMICO EM FORROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Strictu Sensu em Engenharia - PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dra. Chiara Valsecchi

**Alegrete
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

K546e Keller Bertolo, Carlos Eduardo
ESPUMAS PRODUZIDAS COM VIDRO RECICLADO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ: AVALIAÇÃO PARA POTENCIAIS APLICAÇÕES COMO ISOLANTE
TÉRMICO EM FORROS / Carlos Eduardo Keller Bertolo.
102 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2025.
"Orientação: Chiara Valsecchi".

1. Espumas vítreas. 2. CCA. 3. Sustentabilidade. 4.
Isolamento térmico. I. Título.

CARLOS EDUARDO KELLER BERTOLO

**ESPUMAS PRODUZIDAS COM VIDRO RECICLADO E CINZA DE CASCA DE ARROZ:
avaliação
para potenciais aplicações como isolante térmico em forros**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 27/02/2025.

Banca examinadora:

Prof^ª Dr^ª. Chiara Valsecchi
Orientadora
(Unipampa)

Prof^ª Dr^ª. Simone Dornelles Venquiaruto
(Unipampa)

Prof^ª Dr^ª. Marília Brykalski
(UFPel)

Prof. Dr . Jacson Weber de Menezes
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **CHIARA VALSECCHI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2025, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **JACSON WEBER DE MENEZES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2025, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Marília Brykalski, Usuário Externo**, em 27/02/2025, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/02/2025, às 08:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1673741** e o código CRC **C266DC1F**.

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos, os quais sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando. Dedico também este trabalho a todos os mestres, doutores e técnicos que de alguma forma me auxiliaram e tornaram este trabalho possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me guiar e pela motivação e força para seguir em frente mesmo diante das adversidades encontradas ao longo da jornada.

Agradeço à Universidade Federal do Pampa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PPEng) por proporcionarem a minha formação como Mestre. Expresso também minha gratidão a CAPES pelo apoio financeiro fornecido ao longo desse percurso, o qual foi fundamental para a conclusão do curso.

Agradeço a minha mãe, Fabiana Marcon Keller, por sempre me apoiar e incentivar a seguir em frente, a qual nunca mediu esforços para me oferecer o melhor ao longo desses anos. Agradeço também ao meu pai, Silvério Zanini Bertolo e aos meus familiares, em especial minhas avós, Dorina Catarina Marcon Keller e Elaine Ana Zanini Bertolo, que sempre incentivaram a buscar o melhor de mim e correr atrás dos meus sonhos.

Agradeço a minha orientadora, Prof. Dra. Chiara Valsecchi, pelo profissionalismo e competência, por ter aceitado me guiar ao longo desta jornada e por estar sempre me auxiliando e incentivando a seguir em frente.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Prof. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, Dra. Marília Brykalski e Prof. Dr. Jacson Weber de Menezes, por aceitarem avaliar e contribuir para o aprimoramento deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Celso Nobre da Fonseca e à aluna de graduação do curso de Ciência da Computação, Mariana Rodrigues Padilha, por não medirem esforços para me auxiliar na conclusão deste trabalho com êxito.

Agradeço a todos os professores, técnicos e colegas que, de alguma forma, me auxiliaram ao longo de mais esta jornada.

Por fim, mas não menos importante, agradeço aos meus amigos, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nos melhores e piores momentos desta jornada, em especial a Victor Duarte, Lucas Tito, Luíza Dotta, Thiago Gomes, Joice Lima e Andressa Durlo. Desejo a todos muito sucesso e prosperidade.

A persistência é o menor caminho do êxito.

- (Charles Chaplin)

RESUMO

Nos dias atuais, as mudanças climáticas, intensificadas por ações antrópicas, tem aumentado o desconforto térmico no interior das edificações, impulsionando um aumento no consumo de energia e agravando impactos ambientais. Neste trabalho, foram investigadas a produção de espumas vítreas sustentáveis a partir de vidro reciclado, cinza da casca do arroz (CCA) e carbonato de cálcio (CaCO_3) como agente espumante, para fins de isolamento térmico. Além disso, a espuma definida como mais eficiente no estudo foi aplicada como revestimento de forro de gesso em um protótipo construído em alvenaria de tijolos cerâmicos, simulando uma situação real de aplicação. Espumas vítreas com teores distintos (95%, 97,7%, 98% e 100%) de vidro reciclado e CCA, nas proporções de 80% e 20%, respectivamente, e diferentes concentrações de CaCO_3 (5%, 2,5%, 2% e 0%) foram produzidas, sob variadas temperaturas de sinterização (950 °C, 1000 °C e 1030 °C). Análises nas propriedades das espumas produzidas mostraram que a composição contendo 98% da mistura (80% vidro + 20% CCA) e 2% de CaCO_3 , sinterizada a 1000°C, mostrou-se mais eficiente para aplicações como isolante térmico. A espuma descrita apresentou densidade aparente de $0,29 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, condutividade térmica variando de $0,1195 \pm 0,0069 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a $0,1270 \pm 0,0101 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, diâmetro médio dos poros de $1,827 \pm 0,749 \text{ mm}$, porosidade de 88,1% e resistência à compressão axial de $0,81 \pm 0,14 \text{ MPa}$. Uma placa desta espuma, com espessura média de 20 mm e dimensões de 1,32 m x 1,32 m foi produzida e aplicada como revestimento de forro de gesso em um protótipo de alvenaria. Um segundo protótipo, de características equivalentes, foi utilizado como referência. Dados relativos à temperatura e umidade foram coletados por 48 horas. Constatou-se que a incorporação da espuma vítrea como revestimento retardou a transferência de calor entre as superfícies do forro, evidenciando que o material atua de forma eficaz no isolamento térmico quando aplicado sob as condições descritas. Nesse sentido, os resultados obtidos demonstraram que as espumas vítreas produzidas neste estudo, além de serem eficazes na promoção do isolamento térmico, representam uma alternativa ambientalmente responsável, contribuindo com redução de resíduos e diminuindo a demanda por energia e matérias-primas de origem natural.

Palavras-Chave: Espumas vítreas. CCA. Sustentabilidade. Isolamento térmico.

ABSTRACT

Nowadays, climate change intensified by anthropogenic actions has increased thermal discomfort inside buildings, driving the increase of energy consumption and worsening environmental impacts. This study investigated the production of sustainable glass foams from recycled glass, rice husk ash (RHA) and calcium carbonate (CaCO_3) as a foaming agent for thermal insulation purposes. In addition, the foam identified as the most efficient in the study was applied as a gypsum ceiling coating in a prototype built with ceramic brick masonry to simulate a real-world application scenario. Glass foams with different contents (95%, 97.7%, 98% and 100%) of recycled glass and RHA in proportions of 80% and 20% respectively and varying concentrations of CaCO_3 (5%, 2.5%, 2% and 0%) were produced at different sintering temperatures (950 °C, 1000 °C and 1030 °C). Analyses of the properties of the produced foams showed that the composition containing 98% of the mixture (80% glass + 20% RHA) and 2% CaCO_3 sintered at 1000 °C proved to be the most efficient for thermal insulation applications. The described foam exhibited an apparent density of $0.29 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$, thermal conductivity ranging from $0.1195 \pm 0.0069 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ to $0.1270 \pm 0.0101 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, average pore diameter of $1.827 \pm 0.749 \text{ mm}$, porosity of 88.1% and axial compressive strength of $0.81 \pm 0.14 \text{ MPa}$. A panel of this foam with an average thickness of 20 mm and dimensions of 1.32 m x 1.32 m was produced and applied as a gypsum ceiling coating in a masonry prototype. A second prototype with equivalent characteristics was used as a reference. Temperature and humidity data were collected for 48 hours. It was found that the incorporation of glass foam as a coating delayed heat transfer between the ceiling surfaces, which demonstrates the material effectiveness for thermal insulation when applied under the described conditions. In this regard, the results obtained showed that the glass foams produced in this study, in addition to being effective in promoting thermal insulation, they represent an environmentally responsible alternative which contributes to waste reduction and weaken the demand for energy and raw materials of natural origin.

Keywords: Glass foams. RHA. Sustainability. Thermal insulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deposição de CCA residual em aterro a céu aberto	27
Figura 2 - Transferência de calor nas edificações	33
Figura 3 - Fragmentos de vidro reciclado	35
Figura 4 - Fluxograma do programa experimental	41
Figura 5 - (a) amostra de CCA; (b) amostra de vidro reciclado	42
Figura 6 - Homogeneização em almofariz	45
Figura 7 - Processo de moldagem, onde: (a) molde metálico; (b) prensa hidráulica; (c) amostras originadas antes da sinterização.	45
Figura 8 - Forno mufla de alta temperatura	46
Figura 9 - Equipamento LaserComp	48
Figura 10 - Prensa SHIMADZU	49
Figura 11 - Localização dos protótipos, onde: (a) Mapa de Alegrete-RS com a localização da UNIPAMPA; (b) Local exato onde os protótipos encontram-se nas dependências da UNIPAMPA.	53
Figura 12 - Protótipos em alvenaria	53
Figura 13 - (a) Telhas de fibrocimento; (b) Placas de gesso	54
Figura 14 - Ilustração da ordem de instalação dos componentes, onde: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo de forro revestido com espuma vítrea	55
Figura 15 - Ilustração da disposição dos sensores de temperatura e umidade	56
Figura 16 - Sensores, onde: (a) LM35; (b) DHT11.	57
Figura 17 - Arduino UNO	57
Figura 18 - Análise granulométrica	59
Figura 19 - Estrutura das espumas sinterizadas a 950 °C.	62
Figura 20 - Estrutura das espumas sinterizadas a 1000 °C.	63
Figura 21 - Espuma C0% sinterizada a 1000 °C	63
Figura 22 - Estrutura das espumas sinterizadas a 1030 °C.	64
Figura 23 - Densidade aparente média das espumas vítreas	66
Figura 24 - Resistência à compressão axial média das espumas vítreas	67
Figura 25 - Placas utilizadas na determinação da condutividade térmica	71
Figura 26 - (a) imagem utilizada para calibração no ImageJ®; (b) Capturas utilizadas para medição dos poros	73
Figura 27 - Histograma da distribuição de tamanho dos poros	73

Figura 28 - Análise DRX.....	77
Figura 29 - (a) Espécimes que originaram as espumas vítreas; (b) Espumas vítreas resultantes.....	78
Figura 30 - Espumas vítreas regularizadas	78
Figura 31 - Placa final de espuma vítrea.....	79
Figura 32 – Sequência de instalação no protótipo referência, onde: (a) Forro de gesso; (b) Telha de fibrocimento.	79
Figura 33 – Sequência de instalação no protótipo de forro revestido com espuma vítrea, onde: (a) Forro de gesso; (b) Placa de espuma vítrea; (c) Telha de fibrocimento.....	80
Figura 34 - Vista interna do forro de gesso	80
Figura 35 - Sensores posicionados nos protótipos, onde: (a), (b) e (c) sensores posicionados no protótipo referência; (d), (e) e (f) sensores posicionados no protótipo de forro revestido com espuma vítrea.	81
Figura 36 - Sistema projetado para coletar os dados de temperatura e umidade	82
Figura 37 - Variação da temperatura ao longo do tempo, onde: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo de forro revestido com espuma vítrea.....	83
Figura 38 - Diferenças de temperatura entre superfícies do forro	84
Figura 39 - Variação da umidade em função do tempo, onde: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo de forro revestido com espuma vítrea.	86
Figura 40 - Variação da temperatura no centro interno ao longo do tempo	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica típicas de materiais isolantes.....	30
Tabela 2 - Composição química do CaCO_3	43
Tabela 3 - Resumo das combinações testadas.....	44
Tabela 4 - Propriedades das placas de gesso	55
Tabela 5 - Composição química da CCA	61
Tabela 6 - Composição química do vidro reciclado	61
Tabela 7 - Densidade aparente média	65
Tabela 8 - Resistência à compressão axial média	67
Tabela 9 - Condutividade térmica média.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estrutura das espumas vítreas.....	64
Quadro 2 - Resumo das propriedades de densidade aparente e resistência à compressão axial relatadas na literatura.....	69
Quadro 3 - Resumo das condutividades térmicas relatadas na literatura	72
Quadro 4 - Resumo das porosidades relatadas na literatura	75

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al_2O_3 - óxido de alumínio

Art. - artigo

B_2O_3 - óxido de boro

C - carbono

CaCO_3 - carbonato de cálcio

CaO - cal

CCA - cinza da casca do arroz

CO_2 - dióxido de carbono

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

DRX - Difração de Raios X

EPS - poliestireno expandido

Fe - ferro

Fe_2O_3 - óxido de ferro

GOMNDI - Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos

HCl - ácido clorídrico

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

K_2O - óxido de potássio

LEMAC - Laboratório de Estruturas, Materiais e Construção

MgO - óxido de magnésio

MnO_2 - dióxido de manganês

MnO - óxido de manganês

MPa - mega Pascal

Nº - número

Na_2CO_3 - carbonato de sódio

Na_2O - óxido de sódio

NaOH - Hidróxido de sódio

NBR - Norma Brasileira

ONU - Organização das Nações Unidas

PPCEM - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

PU - poliuretano

P_2O_5 - óxido de fósforo

RCC - resíduos da construção civil

RS - Rio Grande do Sul

RSU - resíduos sólidos urbanos

SI - sistema Internacional de Unidades

SiC - carbetto de silício

SiO_2 - sílica ativa

SnO_2 - dióxido de estanho

SO_3 - trióxido de enxofre

SVA - Silica Verde do Arroz Ltda.

Temp. - temperatura

UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa

XPS - poliestireno extrudado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo Geral.....	21
1.2	Objetivos Específicos	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	A sustentabilidade na construção civil	23
2.1.1	Vidro reciclado.....	25
2.1.2	Cinza da casca do arroz (CCA)	26
2.2	Isolamento térmico em edificações.....	28
2.3	Transmitância térmica em edificações.....	30
2.4	Espumas vítreas	33
2.4.1	Produção das espumas vítreas	35
2.4.2	Agentes espumantes	38
2.4.3	Aplicações das espumas vítreas	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Etapa 1: Caracterização das matérias-primas.....	41
3.2	Etapa 2: Produção, análise e caracterização da espuma vítrea otimizada...43	
3.2.1	Produção das espumas vítreas	43
3.2.2	Análise das espumas vítreas produzidas	46
3.2.2.1	Densidade aparente	47
3.2.2.2	Condutividade térmica	47
3.2.2.3	Resistência à compressão axial	48
3.2.2.4	Diâmetro médio dos poros e porosidade	49
3.2.2.5	Microestrutura e composição das fases	50
3.3	Etapa 3: Produção da placa, instalação dos componentes do forro e coleta dos dados.....	51
3.3.1	Produção da placa de espuma vítrea	51
3.3.2	Instalação dos componentes do forro em protótipos de alvenaria.....	52
3.3.3	Instalação de sensores e coleta de dados.....	55
3.4	Etapa 4: Análise de dados e conclusões da pesquisa.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Caracterização das matérias-primas	59
4.1.1	Granulometria.....	59

4.1.2	Composição química	60
4.2	Determinação do teor de agente espumante e da temperatura de sinterização ideal.....	61
4.3	Caracterização da espuma vítrea ideal	70
4.3.1	Condutividade térmica	70
4.3.2	Diâmetro médio dos poros e porosidade	72
4.3.3	Microestrutura e composição das fases	75
4.4	Produção da placa de espuma vítrea	77
4.5	Instalação dos componentes do forro e dos sensores responsáveis pela coleta de dados	79
4.6	Análise da capacidade de isolamento térmico da espuma vítrea aplicada...	82
5	CONCLUSÃO.....	89
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A - CÓDIGO ARDUÍNO	100

1 INTRODUÇÃO

O constante e acelerado progresso tecnológico observado nos últimos anos desencadeou novos problemas ambientais, tais como: a redução de recursos naturais causada pela exploração excessiva e o aumento significativo na geração de resíduos sólidos (HOSSAIN, MATHUR e ROY, 2018; GAUR *et al.*, 2020). De acordo com Hossain, Mathur e Roy (2018), a única forma de reduzir ou até mesmo eliminar esses problemas seria através da introdução dos resíduos gerados nos principais fluxos de produção. A prática da reciclagem, ao permitir que os resíduos sólidos gerados sejam remanejados e transformados em matérias-primas utilizáveis nos fluxos de produção de novos materiais para consumo, tem ganhado destaque como uma questão ambiental de extrema importância (FERNANDES, TULYAGANOV e FERREIRA, 2009; FONSECA, 2013).

Além disso, não é novidade que o crescimento populacional e o surgimento de novas tecnologias trouxeram consigo danos significativos ao meio ambiente, o que vem promovendo alterações climáticas ao longo dos anos (ORTIZ e PEÑA, 2010; MEHRZAD *et al.*, 2022). As mudanças climáticas impulsionam um aumento expressivo no consumo de energia. Isso ocorre porque, para alcançar o conforto térmico no interior das edificações, os indivíduos recorrem ao uso de aparelhos que demandam alto consumo energético, como os aparelhos de ar-condicionado (HASSID *et al.*, 2000; SANTAMOURIS *et al.*, 2015). De acordo com Cetiner e Shea (2018), uma das formas mais eficazes para mitigar o consumo de energia em um edifício é através do seu isolamento térmico. O autor ainda expõe que é comum a utilização de materiais origem inorgânica no isolamento de edifícios, como o poliestireno expandido (EPS), conhecido popularmente como isopor, poliestireno extrudado (XPS), espuma de poliuretano, dentre outras; contudo, os processos que originam esses materiais afetam negativamente o meio ambiente.

Assim, apesar de desempenhar um importante papel no desenvolvimento econômico e social do mundo, o setor da construção civil é responsável por consumir expressivas quantidades de matérias-primas de origem natural e por produzir vastos volumes de resíduos, contribuindo assiduamente com o agrave dos impactos ao meio ambiente e aos indivíduos (SILVA, DE BRITO e DHIR, 2014; ANTÓNIO *et al.*, 2018; MA e ZHANG, 2020). Como uma alternativa de reduzir os

danos causados pelo setor ao meio ambiente, a indústria da construção pode investir no desenvolvimento e implementação de materiais sustentáveis, como aqueles originados de matérias-primas provenientes de fontes recicladas e/ou derivadas de processos agroindustriais (BOLDEN, ABU-LEBDEH e FINI, 2013).

Os resíduos de vidro, particularmente, emergem como materiais de grande interesse no contexto da reciclagem, pois podem ser reciclados várias vezes sem que haja perda de qualidade, ou seja, sem sofrer alterações nas suas propriedades químicas (FERNANDES, TULYAGANOV e FERREIRA, 2009; LIOTTO e SANTANA, 2020). Por ser um material de natureza não biodegradável, a deposição do vidro em aterros sanitários não é adequada, pois colabora com a superlotação desses locais em curto prazo e induz graves impactos ambientais (ADAWAY e WANG, 2015). A produção de alguns materiais de construção utilizando resíduos de vidro como matéria-prima já tem sido abordada por diversos pesquisadores, dentre eles podemos citar a produção de concretos com incorporação de vidro como agregado (RIGHI *et al.*, 2011; TANWAR *et al.*, 2021; SOBUZ *et al.*, 2023) e a produção de espumas vítreas (ZHU *et al.*, 2016; ASSEFI *et al.*, 2021; EL-AMIR *et al.*, 2021).

As espumas vítreas são materiais porosos obtidos a partir do aquecimento de uma mistura contendo vidro moído em forma de pó e algum agente gerador de gás, também conhecido como agente espumante, sendo este geralmente composto por carbono ou substâncias carbonáceas. A elevada porosidade das espumas vítreas resulta em baixas densidades e condutividades térmicas, características que tornam o material ideal para aplicações em isolamentos térmicos de edificações (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005). A produção de espumas vítreas representa uma alternativa promissora nos âmbitos sustentáveis e econômicos da engenharia civil, pois além de consumir expressivas quantidades de resíduos de vidro durante sua produção, o que reduz o volume do resíduo destinado a aterros, também mitiga a demanda por energia e matérias-primas de origem natural (MUGONI *et al.*, 2015). Além do vidro e do agente espumante, alguns agentes de origem mineral, como sílica (SiO_2), podem ser incorporados como matéria-prima na produção de espumas vítreas, sem comprometer as propriedades finais do material (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005; FERNANDES, 2019).

Uma fonte alternativa de sílica que vem sendo explorada nos últimos decênios é a casca de arroz (POUEY, 2006). A casca do arroz é um subproduto gerado durante o processo de beneficiamento do arroz, que comumente é

submetido ao processo de queima para a geração de energia em termelétricas ou na própria indústria responsável pela secagem e parbolização do grão (STRACKE *et al.*, 2020). Como resultado dessa queima tem-se a geração da cinza da casca de arroz (CCA) (POUEY, 2006). A casca de arroz e a CCA são resíduos que possuem biodegradação lenta e volume elevado, sendo assim, quando depositadas em aterros sanitários ocupam grandes áreas por longos intervalos de tempo (DELLA, KÜHN e HOTZA, 2005; PODE, 2016). O alto teor de SiO_2 presente na CCA permite que este resíduo seja incorporado como um agente mineral na produção de espumas vítreas (DÁVALOS *et al.*, 2021), podendo viabilizar uma diminuição no acúmulo de CCA em aterros, colaborando com a redução de impactos ambientais.

Dessa forma e, considerando que a lei N° 12.305 (BRASIL, 2010) que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil estabelece em seu Art. 3º, parágrafo XII a logística reversa como [...] conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos [...]", justifica-se que a pesquisa tem a finalidade de explorar a utilização de resíduos de vidro e CCA na produção de espumas vítreas para aplicação como revestimento térmico em forros de edificações construídas em alvenaria de tijolos cerâmicos. A utilização dos resíduos descritos na produção de um material que pode ser amplamente utilizado pelo setor da construção civil representa uma alternativa sustentável para minimizar os danos causados pelo setor ao meio ambiente, de forma a reduzir o acúmulo de vidro e CCA em aterros, minimizar a extração de matérias-primas de origem natural e o consumo de energia. Além disso, dessa forma o setor da construção civil estará engajado com a política da logística reversa mundial, colaborando com o desenvolvimento sustentável do planeta.

1.1 Objetivo Geral

Produzir espuma vítrea a partir de vidro reciclado, CCA como aditivo e CaCO_3 como agente espumante e avaliar a sua capacidade de isolamento térmico quando aplicada como revestimento de forro de gesso em protótipos de alvenaria de tijolos cerâmicos.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o vidro reciclado e a CCA através de peneiramento manual e Fluorescência de Raios x;
- Encontrar os teores ótimos, em massa, da combinação contendo CCA, vidro e CaCO_3 para produção da espuma vítrea;
- Encontrar as condições ótimas de produção da espuma vítrea em respeito à temperatura de sinterização;
- Caracterizar a espuma vítrea segundo suas propriedades físicas, como densidade aparente, condutividade térmica, diâmetro médio dos poros e porosidade;
- Caracterizar a espuma vítrea segundo sua propriedade mecânica de resistência à compressão axial;
- Reproduzir a espuma vítrea com melhor desempenho e otimizar a construção de uma placa de 1,32 m x 1,32 m que possa ser utilizada para promover o isolamento térmico em protótipos de alvenaria quando aplicada como revestimento de forro em gesso;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta e discute os principais tópicos que englobam a sustentabilidade na construção civil, o isolamento térmico em edificações, a transmitância térmica nas edificações e as espumas vítreas, com a finalidade de impulsionar uma melhor compreensão ao leitor em relação aos assuntos que norteiam o trabalho.

2.1 A sustentabilidade na construção civil

Conforme o relatório da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, apresentado pela Organização das Nações Unidas (ONU), o desenvolvimento sustentável deve ser adotado pela humanidade como uma forma de garantir que todas as demandas atuais sejam atendidas, porém, sem originar danos que comprometam as demandas futuras das próximas gerações (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987). De acordo com Brasileiro e Matos (2015), a principal prática a ser implantada e explorada com a finalidade de promover o desenvolvimento sustentável é a produção de bens que utilizem a menor quantidade possível de matérias primas de origem natural e causem a menor poluição, ou seja, o foco do desenvolvimento sustentável deve estar concentrado na reciclagem de resíduos para produção de novos produtos, mitigando assim os impactos ao meio ambiente.

A indústria da construção civil ocupa um importante papel dentro de uma sociedade, pois atua na promoção de atividades que impulsionam o desenvolvimento econômico e social do país, como a geração de empregos e a comercialização de materiais e imóveis (LARUCCIA, 2014). Em contrapartida, o setor da construção civil é responsável por exercer significativa influência negativa ao meio ambiente, pois além de consumir grande parte dos recursos naturais disponíveis no planeta, também é responsável por gerar expressivas quantidades de resíduos sólidos (BEHERA *et al.*, 2014; LARUCCIA, 2014; RIOS, GRAU e CHONG, 2019; ADESINA, 2020; DUAN *et al.*, 2020). No Brasil, estima-se que 20% a 50% dos recursos naturais explorados são consumidos pelo setor da construção civil (MESQUITA, 2012); além disso, estimativas apontam que cerca de 50% a 70% do

total de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados no país são provenientes da indústria da construção (MARQUES *et al.*, 2020).

A extração de recursos naturais recorrentemente utilizados na construção civil geralmente é realizada através da mineração, atividade que pode resultar em significativas degradações ambientais. Durante o processo de mineração, algumas técnicas de exploração podem causar impactos que promovam alterações na área natural explorada: o desmatamento e consequente perda de espécies animais que habitavam o local, a poluição da água e do ar, a poluição sonora e visual, a modificação do terreno ou dos rios e a destruição de matas ciliares são alguns exemplos de danos que podem ser originados pela mineração (LARUCCIA, 2014).

O grande volume de resíduos da construção civil (RCC) gerados durante os processos de construção ou demolição de obras tem despertado sérias preocupações a nível global, não só no âmbito ambiental, mas também no econômico. Os aterros sanitários onde esses resíduos são constantemente destinados terminam por alcançar sua capacidade máxima em curtos intervalos de tempo, demandando a recorrente ampliação dessas áreas de descarte (BEHERA *et al.*, 2014). Além dos problemas ambientais causados pela necessidade de expansão dessas áreas, o custo para despejo de RCC's aumentou consideravelmente nos últimos anos devido ao aumento do preço dos terrenos que precisam ser adquiridos para suprir a demanda (BEHERA *et al.*, 2014).

Devido à larga escala dos impactos ambientais causados pela indústria da construção civil, torna-se evidente que o desenvolvimento sustentável só será efetivamente alcançado se o setor contribuir com a adoção e promoção de práticas que mitiguem danos ambientais (BRASILEIRO e MATOS, 2015). A utilização de resíduos e/ou subprodutos de origem urbana ou industrial na produção de materiais recorrentemente utilizados na construção civil tem ganhado destaque no meio acadêmico, como uma forma de buscar soluções que promovam construções mais sustentáveis e ecologicamente corretas (AMIN, 2023).

Entre os diversos detritos gerados, destaca-se o vidro. A incorporação de resíduos de vidro reciclado na indústria da construção civil tem se mostrado uma alternativa eficiente na substituição de matérias-primas virgens na produção de materiais alternativos. O emprego do resíduo para fabricação de novos materiais, além de reduzir os custos associados à obtenção de matérias-primas de origem natural, reduz significativamente os impactos ambientais causados pelo próprio

descarte do vidro (ROBERT, BAEZ e SETUNGE, 2021). Outro resíduo que vem ganhando destaque na produção de materiais mais sustentáveis é a CCA. Quando tratada adequadamente, a CCA pode possuir até 95% de sílica pura em sua composição, o que permite a sua incorporação como matéria-prima na fabricação de diversos materiais, os quais variam desde produtos farmacêuticos e de limpeza, até materiais frequentemente empregados na construção civil, como cimentos, cerâmicas e vidros (FOLETTTO *et al.*, 2005; HOSSAIN, MATHUR e ROY, 2018).

2.1.1 Vidro reciclado

Os vidros em geral são materiais de simples produção, classificados como materiais não cristalinos ou amorfos, ou seja, os átomos e moléculas que compõem o material são distribuídos de forma desordenada ao longo de sua estrutura. Dentre as suas principais aplicações destacam-se a produção de recipientes, lentes, fibras, dentre outras. Os recipientes, como as garrafas ou potes, são normalmente fabricados utilizando o vidro do tipo soda-cal, material composto por cerca de 70% de sílica ativa (SiO_2), além de conter outros elementos como, principalmente, soda (Na_2O , óxido de sódio) e cal (CaO , óxido de cálcio) (CALLISTER, 2012).

Teoricamente, o vidro é um material que possui ciclo de reciclagem infinito, ou seja, pode ser completamente reaproveitado inúmeras vezes, dando origem a novos materiais, sem perdas ou danos em suas propriedades (ABIVIDRO, 2019; ROBERT, BAEZ e SETUNGE, 2021; DONG, LI e TAO, 2021). No entanto, a prática da reciclagem dos resíduos de vidro ainda é pouco difundida, principalmente no Brasil e nos países em desenvolvimento; a falta de coletas seletivas eficientes, a presença de contaminantes e as inconsistências químicas entre os vidros de diferentes tipos e colorações são alguns dos fatores que dificultam a sua reciclagem (DONG, LI e TAO, 2021; TAMANNA, TULADHAR e SIVAKUGAN, 2020).

No Brasil, estima-se que cerca de 1,3 milhão de toneladas de vidro são produzidas anualmente e que, na ausência de coleta seletiva eficiente, a destinação final desse material acaba sendo os aterros sanitários (PIZZATTO, 2021). De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de vidro, devido a natureza inerte do vidro, a decomposição total do material no meio ambiente ocorre em um longo período de tempo, levando em torno de cinco (5) mil anos (ABIVIDRO, 2019). Dessa forma, por ser um resíduo não biodegradável em curto prazo, os resíduos de vidro

contribuem com a superlotação permanente dos aterros sanitários, implicando na necessidade de expansão dessas áreas e intensificando os impactos ambientais (ROBERT, BAEZ e SETUNGE, 2021; LIU *et al.*, 2022).

A reciclagem do vidro para produção de novos materiais de construção pode representar uma diminuição na incessante exploração de jazidas onde são extraídas as matérias-primas de origem natural, as quais se encontram cada vez mais escassas e distantes dos centros urbanos, fomentando assim a mitigação de problemas ambientais e uma diminuição nos custos relacionados ao transporte de matérias-primas naturais até a indústria (ROBERT, BAEZ e SETUNGE, 2021). Nos últimos anos, diferentes estudos apontaram a utilização de resíduos de vidro na construção civil, como aditivos e/ou agregados para produção de concretos (DU e TAN, 2014; KURI *et al.*, 2023; PENG *et al.*, 2023; KUFFNER *et al.*, 2023; BERTOLO *et al.*, 2023) e em materiais com finalidade de isolamento térmico e acústico, como as espumas vítreas (OWOEYE *et al.*, 2020; STOCHERO *et al.*, 2021; FERNANDES *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2023). A utilização desses resíduos na fabricação de espumas vítreas representa uma importante inovação de caráter sustentável na indústria da construção civil (LI *et al.*, 2018; ROBERT, BAEZ e SETUNGE, 2021).

2.1.2 Cinza da casca do arroz (CCA)

O arroz, denominado cientificamente como *Oryza sativa*, destaca-se como um dos cereais mais cultivados e consumidos no planeta (WALTER, MARCHEZAN e AVILA, 2008). De acordo com dados fornecidos pela CONAB (2024), o Brasil produziu na safra 2022/2023 um equivalente de 10 milhões de toneladas de arroz, sendo o Estado do Rio Grande Sul responsável pela produção de aproximadamente 7 milhões de toneladas, o que representa em torno de 69% da produção total do país. Segundo Antônio *et al.* (2018), 20% da massa total do grão de arroz refere-se a sua casca, dessa forma, estima-se que aproximadamente 2 milhões de toneladas de casca de arroz foram geradas no Brasil na safra de 2022/2023, sendo que a maior parcela do resíduo gerado, cerca de 1,4 milhões de toneladas, concentrou-se no Estado do Rio Grande do Sul.

A casca de arroz é frequentemente utilizada pela própria indústria responsável pelo beneficiamento do alimento ou por outras indústrias, como uma fonte alternativa para a geração de energia. Essa utilização está atribuída à elevada

capacidade que o material tem de gerar calor através da sua queima. Contudo, a combustão desse resíduo gera expressivos volumes de cinzas, um subproduto que, na ausência de aplicações efetivas, é descartado em aterros a céu aberto (Figura 1), podendo desencadear graves impactos ambientais (ANTÓNIO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2020; AMIN, 2023). Estimativas apontam que a cinza resultante do processo de queima da casca do arroz equivale, em massa, a 4% da massa total do grão (QUEVEDO *et al.*, 2022), dessa forma, pode-se concluir que se toda a casca de arroz gerada no Brasil na safra de 2022/2023 fosse submetida a queima, cerca de 400 mil toneladas de CCA seriam geradas no país apenas no ano correspondente.

Figura 1 - Deposição de CCA residual em aterro a céu aberto



Fonte: Pouey (2006).

No caso da utilização da casca do arroz para geração de energia, a combustão da matéria-prima ocorre sem o controle de temperatura, ou seja, na presença de ar, dando origem a CCA com teores de sílica que variam entre 85% e 98% (NASKAR, KUNDU e CHATTERJEE, 2012). A CCA proveniente da queima sem controle de temperatura é constituída por sílica amorfa e, geralmente apresenta uma tonalidade preta acinzentada devido à presença de carbono residual que não foi totalmente consumido durante a sua combustão. Isso ocorre porque normalmente a queima sem controle de temperatura é realizada em uma faixa de temperatura que varia entre 550°C e 800°C, não atingindo níveis suficientes para eliminar completamente o carbono (SIDDIQUE *et al.*, 2020).

A CCA, graças a sua alta concentração de sílica, principalmente quando submetida a queima sob temperaturas controladas, apresenta características típicas de materiais pozzolânicos desde que finamente moída, podendo até mesmo ser

equiparada com a sílica ativa. Essas características permitem que o material seja utilizado como aditivo ou até mesmo como substituto parcial do cimento na produção de concretos e/ou argamassas (SAAD *et al.*, 2015; ISAIA *et al.*, 2017). O alto teor de sílica, baixa densidade e a alta porosidade também são algumas das propriedades que potencializam a utilização da CCA como matéria-prima na produção de cerâmicas refratárias. A utilização da CCA na fabricação de materiais cerâmicos com boas propriedades de isolamento é uma alternativa promissora para reduzir o descarte e o acúmulo de cinzas em aterros, além disso, a incorporação do resíduo na produção do material pode promover uma redução de custos e impulsionar a sustentabilidade na indústria da construção civil (DELLA, KÜHN e HOTZA, 2001).

2.2 Isolamento térmico em edificações

O acelerado crescimento populacional acompanhado de mudanças nos padrões de vida devido aos avanços tecnológicos desencadeou em um aumento significativo no consumo de energia a nível global (BERARDI e JAFARPUR, 2020; OLABI e ABDELKAREEM, 2022). A crescente demanda por energia trouxe consigo impactos negativos ao meio ambiente, essencialmente devido à queima de combustíveis fósseis realizada durante o processo de produção de energia originada de fontes não renováveis, resultando na intensificação da emissão de gases de efeito estufa que contribuem consideravelmente com o aquecimento global (AHMAD *et al.*, 2019; OLABI e ABDELKAREEM, 2022). As mudanças climáticas intensificadas pelo aquecimento global ocasionaram um aumento no desconforto térmico no interior das edificações, ampliando ainda mais o consumo de energia e agravando os impactos ambientais (AHMAD *et al.*, 2022).

O isolamento térmico, desde que bem planejado, executado e utilizado, pode promover uma economia de até 50% no consumo de energia (LEIVA *et al.*, 2015). Na atualidade, uma das alternativas consideradas mais práticas e eficazes para mitigar o consumo de energia elétrica é o isolamento térmico de uma edificação, promovendo não só uma redução nos custos relacionados ao consumo de energia aos clientes, mas também uma redução significativa na emissão de carbono no meio ambiente e, conseqüentemente, uma amenização nas alterações climáticas causadas pela emissão de gases que colaboram com o aquecimento global (LEIVA *et al.*, 2015; CETINER e SHEA, 2018).

A eficiência de um isolamento térmico depende, sobretudo, da origem do material de construção que está sendo empregado, da capacidade que o material possui de retardar a transferência de calor e da espessura da camada de isolamento adotada (AL-HOMOUD, 2005; ADITYA *et al.*, 2017). Existem distintos tipos e formas de materiais que podem ser utilizados como isolamento térmico em edificações, como exemplos mais tradicionais pode citar-se aqueles em forma de manta/rolo, preenchimento solto, espumas no local, forma rígida, dentre outros. O que define a escolha do tipo de material mais adequado para utilização como isolamento é o local onde será aplicado, assim como as propriedades físicas e térmicas do material (AL-HOMOUD, 2005; ADITYA *et al.*, 2017).

O que geralmente determina a eficiência de isolamento térmico de um material em comparação a outro é o valor da condutividade térmica. O valor de condutividade térmica, expresso na unidade de watt por metro kelvin ($W/(m \cdot K)$) no Sistema Internacional de Unidades (SI), é uma função da temperatura média e do teor de umidade do material e está relacionada com a capacidade que determinado material possui de transferir energia em forma de calor (AL-HOMOUD, 2005; VIVALDINI *et al.*, 2014; SCHIAVONI *et al.*, 2016; QIAN, ZHOU e CHEN, 2021).

Existem diversos materiais que podem ser empregados em isolamentos térmicos de edificações, contudo, alguns ganharam destaque na indústria da construção devido à amplitude e frequência com que são utilizados. Como exemplo desses materiais tradicionais, podem ser citadas as lãs de origem mineral, como a lã de rocha e a lã de vidro (fibra de vidro), as quais são recorrentemente utilizadas como isolamento e podem ser encontradas tanto na forma de manta/rolo, assim como na forma de placas ou de preenchimento solto (JELLE, 2011; SCHIAVONI *et al.*, 2016). Outro material bastante comum utilizado como isolamento térmico é o isopor (EPS), geralmente encontrado e utilizado em sua forma rígida (placa ou afins) (JELLE, 2011; SCHIAVONI *et al.*, 2016). O poliuretano (PU) também vem sendo frequentemente utilizado para melhorar o conforto térmico de edificações, seja na forma de placas ou de espuma (JELLE, 2011; SCHIAVONI *et al.*, 2016). Por fim, pode-se destacar a celulose e a cortiça, materiais que podem utilizados como isolamento térmico não só na forma de placas, mas também como preenchimento solto (JELLE, 2011; SCHIAVONI *et al.*, 2016). Os valores típicos de condutividade térmica dos materiais listados encontram-se apresentado na Tabela 1 (JELLE, 2011; SCHIAVONI *et al.*, 2016). Cabe salientar que os valores típicos de condutividade

térmica relatados para cada material podem variar de acordo a sua densidade e temperatura e umidade do ambiente no qual estão inseridos (JELLE, 2011).

Tabela 1 - Condutividade térmica típicas de materiais isolantes

Material	Condutividade térmica W/(m·K)
Lãs minerais	0,03 a 0,04
Isopor (EPS)	0,03 a 0,04
Poliuretano (PU)	0,02 a 0,03
Celulose e cortiça	0,04 a 0,05

Fonte: Adaptado de Jelle (2011) e Schiavoni *et al.* (2016).

As matérias-primas utilizadas na produção dos materiais isolantes frequentemente empregados na construção civil geralmente tem como origem uma fonte natural não renovável. A lã de rocha, por exemplo, é produzida a partir da fusão de rochas, já a lã de vidro advém do vidro borossilicato, o qual utiliza a areia natural como fonte de sílica durante o seu processo de produção. Também pode-se citar com exemplo o isopor, no qual utiliza o petróleo bruto como sua principal matéria-prima e a celulose, originada a partir da madeira de algumas espécies de árvores (JELLE, 2011). Tendo em vista que os materiais mais utilizados como isolamento térmico advém de recursos naturais não renováveis, a implementação de materiais de origem reciclável e que possuam baixas condutividades térmicas em revestimentos de forros, telhados e/ou paredes pode apresentar-se como uma solução sustentável, prática e econômica para melhorar o conforto térmico no interior de uma edificação, considerando que a maior parte do calor é transferida através destas superfícies devido à sua exposição direta a incidência solar (AHMAD *et al.*, 2022). Dentre esses materiais, as espumas vítreas tem despertado grande interesse devido à utilização do vidro reciclado como principal matéria-prima para sua produção. Esse enfoque pode representar uma redução na demanda por matérias-primas naturais virgens e contribuir com o meio ambiente ao promover a implementação de um material sustentável na indústria da construção civil (LI *et al.*, 2018).

2.3 Transmitância térmica em edificações

No geral, a transmitância térmica em edificações ocorre devido à transferência de calor na forma de energia, resultante da diferença de temperatura

entre dois meios ou ambientes analisados. O calor é sempre transferido do meio ou ambiente de maior temperatura para outro de menor temperatura, cessando essa transferência quando ambos atingem o equilíbrio térmico, ou seja, temperaturas iguais (ÇENGEL e GHAJAR, 2012). Dessa forma, em uma edificação, a transferência de calor pode ocorrer tanto do ambiente externo para o interno quanto vice-versa. Em regiões de clima bem definido, no verão, é comum que a transferência de calor ocorra do meio externo para o interno, uma vez que as temperaturas no ambiente externo geralmente atingem níveis mais elevados, já no inverno, o ambiente interno normalmente atinge temperaturas mais elevadas, portanto a troca ocorre do meio interno para o externo.

A transferência por condução trata-se da transferência de energia na forma de calor em um material sólido ou em materiais em contato direto devido à movimentação de partículas (moléculas ou átomos) de áreas altamente energéticas para outras áreas com energia menor. Além dos sólidos, a transferência de calor por condução pode também ocorrer em líquidos e gases devido a colisões e difusões de moléculas em movimento aleatório, porém de forma menos eficiente do que nos materiais sólidos (ÇENGEL e GHAJAR, 2012; PELLEGRINI, 2019).

A transferência por convecção é uma forma de transferência de energia na forma de calor através da movimentação de um fluido, ou seja, ocorre em líquidos ou gases. Quanto maior à velocidade de movimentação do fluido, maior é a transferência de calor no meio: dessa forma, enquanto o fluido encontra-se em seu estado de repouso, a transferência de calor ocorre por condução, já quando o fluido começa a se mover, seja de forma natural (por diferenças de densidade causadas pela variação de temperatura) ou forçada (por ventiladores ou bombas), a transferência de calor passa a ser por convecção (ÇENGEL e GHAJAR, 2012; PELLEGRINI, 2019).

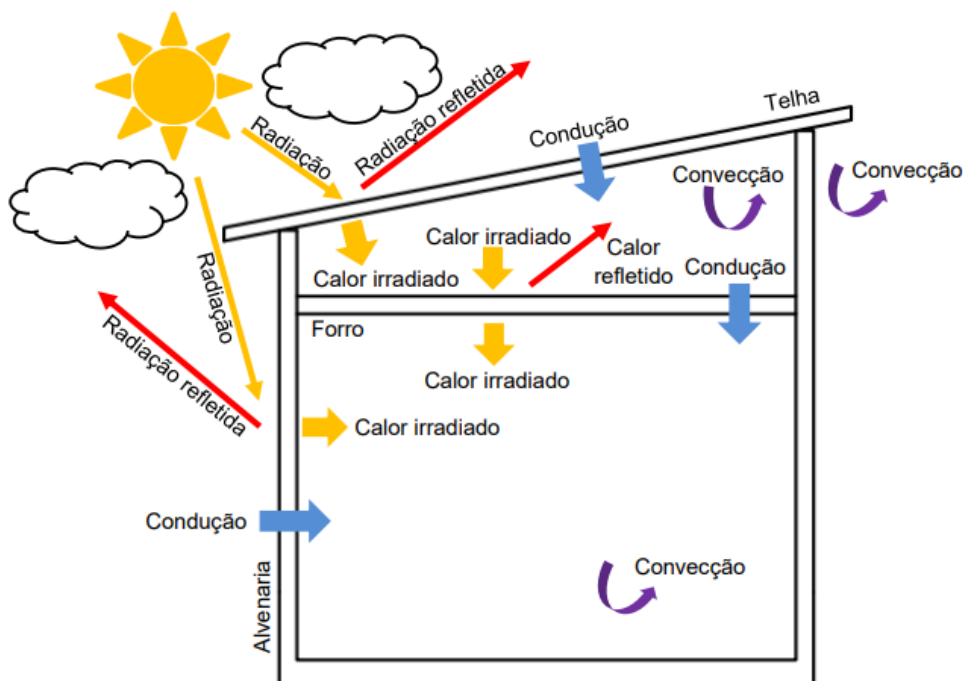
A transferência de calor por radiação está relacionada à transferência de energia na forma de ondas eletromagnéticas e não requer um meio material para ocorrer. Esse processo resulta de mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas, que emitem radiação térmica ao passar para estados de menor energia (ÇENGEL e GHAJAR, 2012; PELLEGRINI, 2019).

As edificações são compostas por um conjunto de elementos e materiais que, quando combinados, formam sua estrutura. Essa estrutura separa não apenas o ambiente externo do interno, mas também os diferentes ambientes internos da

edificação. Dentre esses elementos, podem-se citar as alvenarias, forros, telhas, lajes, entre outros. Esses elementos encontram-se sujeitos á ações do ambiente e são responsáveis por promover as transferências de calor através de seus modos fundamentais: condução, convecção e radiação (BALAJI, MANI e REDDY, 2014).

A Figura 2 ilustra como ocorre a transferência de calor entre os elementos de uma edificação, visto que no caso ilustrado está sendo considerado que o ambiente externo encontra-se com uma temperatura mais elevada que o ambiente interno, portanto a transferência está ocorrendo do ambiente externo para o interno. Nesse caso, a transferência de calor por condução ocorre na telha, forro e alvenaria, da superfície com maior energia (superfície externa da telha e alvenaria e parte superior do forro) em direção à parte vizinha com energia menor. A transferência de calor por radiação solar também pode ser evidenciada na telha e alvenaria da edificação, sendo que parte da radiação emitida é absorvida pelos elementos citados, parte é refletida para o ambiente e ainda, pode haver sua transmissão, caso os elementos sejam compostos por algum material transparente ou semitransparente, no caso das alvenarias, pode-se citar as janelas/portas de vidro transparente como componentes responsáveis por transmitir radiação solar. A parte da energia absorvida pelos elementos é então irradiada para parte interna da edificação, aquecendo outros componentes que também tendem a absorver, refletir e, no caso da presença de materiais transparentes ou semitransparentes, transferir parte da energia irradiada. A transferência de calor por convecção ocorre tanto na parte externa da telha, quanto da alvenaria, de forma natural, pois a temperatura desses elementos é inferior a do ar adjacente, sendo assim, a interação desses elementos com o ar faz com que a temperatura da telha e alvenaria aumente e a temperatura do ar adjacente diminua. No interior da cobertura (entre a telha e o forro) e na parte interna habitável de uma edificação, a transferência de calor por convecção também pode ser evidenciada como resultado da diferença de temperatura entre os elementos, o que promove variações de temperatura do ar adjacente confinado entre esses elementos. O fenômeno mencionado ocorre devido a mudanças na densidade do ar adjacente devido a variações na sua temperatura, sendo que quando o ar próximo a um determinado elemento aquece tende a deslocar-se pra cima, devido a sua menor densidade quando comparada com o ar mais frio próximo a outro elemento com menor temperatura (MISAKA, 2024).

Figura 2 - Transferência de calor nas edificações



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em análise aos modos de transferência de calor descritos, a utilização de materiais porosos para promover o isolamento térmico em edificações representa um método eficaz de redução na transferência de calor. Isso ocorre especialmente porque o ar ou gás presente nos poros do material possui uma condutividade térmica muito baixa, dificultando a transferência de energia na forma de calor por condução. Dessa forma, embora ainda haja transferência de calor por condução em materiais porosos, o processo é muito mais lento e menos intenso quando comparado aos materiais não porosos. Além disso, a presença de poros pequenos limita a movimentação de fluido (ar), o que dificulta e conseqüentemente reduz a transferência de calor por convecção (VIVALDINI *et al.*, 2014). Nesse sentido, as espumas vítreas emergem como materiais isolantes atraentes na indústria da construção, especialmente devido a sua estrutura altamente porosa.

2.4 Espumas vítreas

As espumas vítreas são materiais pertencentes à classe das cerâmicas porosas e possuem uma estrutura química inorgânica. A porosidade presente na estrutura do material proporciona uma baixa condutividade térmica às espumas, pois o ar contido nos poros dificulta a transferência de calor, o que torna o material

promissor para produção de painéis com boas propriedades de isolamento térmico (CARTER e NORTON, 2007; TEIXEIRA *et al.*, 2017). Assim, a porosidade final das espumas vítreas é um fator relevante quando relacionamos a capacidade de isolamento térmico ou acústico do material produzido. Em geral, estruturas de poros fechadas fornecem boas propriedades de isolamento térmico, enquanto a presença de poros abertos é favorável para a utilização em isolamentos acústicos (KÖNIG *et al.*, 2020).

Além da baixa condutividade térmica, as espumas vítreas possuem outras propriedades que favorecem a utilização do material no setor da construção civil: a não toxicidade, baixa densidade, rigidez, resistência à umidade e a água, boa resistência à compressão, inércia química, extensa vida útil e incombustibilidade são algumas das características que emergem o grande potencial de aplicabilidade do material (KETOV, 2001).

As matérias-primas e as condições de sinterização utilizadas na produção das espumas vítreas interferem significativamente nas propriedades finais do material acabado: O tipo e a quantidade de agente espumante, o tamanho das partículas de vidro, agente espumante e demais matérias-primas adicionadas, a temperatura de pico, a taxa de aquecimento e o tempo de permanência na temperatura de pico são os principais fatores que devem ser levados em consideração durante o processo de produção do material (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005; CHAKARTNARODOM e INEURE, 2014). Principalmente, uma distribuição não homogênea do tamanho dos poros na estrutura da espuma vítrea pode afetar as propriedades e a eficiência do material (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005).

De fato, a baixa densidade das espumas vítreas é alcançada devido ao aumento de volume ocasionado pelo surgimento de poros na estrutura do material durante o seu processo de produção. O volume de poros resultantes pode estar distribuído em menor número, quando os poros forem grandes ou em maior número, quando a composição predominante for de poros pequenos. Geralmente, quanto menor for a densidade do material, menor será a sua condutividade térmica e conseqüentemente, melhor será sua capacidade de isolamento térmico (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005). O tamanho dos poros parece não influenciar na propriedade de condutividade térmica, entretanto, quanto menor e mais homogêneos forem os poros da estrutura, maior é a resistência à compressão da espuma vítrea. A resistência à compressão também possui relação direta com a

densidade aparente do material, diminuindo conforme a densidade decai e aumentando conforme a densidade se eleva (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005; ZHU *et al.*, 2016). As propriedades de condutividade térmica, resistência a compressão, densidade aparente e porosidade das espumas vítreas comerciais geralmente apresentam valores típicos nos quais estão compreendidos entre as faixas de 0,04 – 0,08 W/(m·K), 0,4 - 6 MPa, 0,1 – 0,3 g/cm³ e 85 – 95%, respectivamente (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005, apud. FERNANDES, 2009).

Ainda cabe destacar que a coloração do vidro reciclado utilizado como matéria-prima principal na produção de espumas vítreas não tem grande influência nas propriedades finais do produto. Com isso, fragmentos de vidro reciclado de colorações mistas (Figura 3) podem ser empregados na produção do material, o que agrega uma simplificação de processos e uma consequente redução de custos relacionados à reciclagem do resíduo destinado a esse fim (KHAMIDULINA, NEKRASOVA e VORONIN, 2017; OWOEYE *et al.*, 2020).

Figura 3 - Fragmentos de vidro reciclado



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.1 Produção das espumas vítreas

As matérias-primas mais comuns empregadas na produção de espumas vítreas constituem-se em partículas de pó de vidro e agentes espumantes, que quando combinadas e aquecidas a uma designada temperatura tendem a formar um único material de estrutura porosa. O agente espumante empregado na mistura é o grande responsável pela estruturação porosa final da espuma. À medida que a mistura é sinterizada sob altas temperaturas, ocorre a decomposição do agente espumante, resultando na liberação de algumas substâncias gasosas ou na ativação

térmica de reações de oxidação que permitem a expansão da mistura, instigando a formação de poros (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005; ASSEFI *et al.*, 2021). Além do vidro e do agente espumante, a matriz das espumas vítreas permite a incorporação de alguns resíduos industriais como fonte de SiO_2 em sua composição, sem que haja danos e/ou prejuízos ao produto final (FERNANDES *et al.*, 2019; DA SILVA FERNANDES, DE OLIVEIRA COSTA, ROSSIGNOLO, 2022).

A expansão evidenciada durante o processo de sinterização dos materiais constituintes está associada com a decomposição ou reação de oxidação do(s) agente(s) espumante(s) (BERNARDO *et al.*, 2007; LLAUDIS *et al.*, 2009). Quando o agente espumante empregado atinge sua faixa de decomposição térmica, ao mesmo tempo em que o vidro já se encontra em seu estado amolecido, com uma baixa viscosidade, ocorre uma intensa liberação de gases que permitem a expansão e até mesmo a ruptura das paredes nas quais as partículas do agente espumante estão envoltas, favorecendo a formação e/ou interconexão de poros (LI *et al.*, 2018). Já a reação de oxidação está relacionada com a interação do agente espumante com o oxigênio existente no interior do forno de sinterização, promovendo a emissão de gases a partir da fusão do vidro (LI *et al.*, 2018). As reações de oxidação geralmente são evidenciadas com o uso de agentes espumantes contendo carbono, enquanto a decomposição ocorre com o emprego de carbonatos ou sulfatos (BERNARDO *et al.*, 2007; LLAUDIS *et al.*, 2009).

Dentre os resíduos industriais que podem ser utilizados em conjunto com os resíduos de vidro e agente(s) espumantes(s) para produção de espumas vítreas destaca-se a CCA. Estudos realizados por Fernandes *et al.* (2023) apontaram que espumas vítreas com boas propriedades de isolamento térmico podem ser produzidas utilizando resíduos de vidro de soda-cal, cinza da casca do arroz e carbonato de cálcio industrial como matéria-prima. A investigação foi realizada através da produção de amostras de espumas contendo 78% de resíduo de vidro moído em forma de pó, 16% de cinza da casca do arroz e 6% de carbonato de cálcio, em massa, as quais foram submetidas a distintas temperaturas de sinterização de 750 °C, 800 °C e 850 °C, sob uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, onde permaneceram expostas a temperatura de pico durante 30 minutos, no intuito de avaliar a influência da temperatura no produto final. Os autores relataram que os produtos finais apresentaram estruturas de poros fechadas e heterogêneas, apresentando não só baixas condutividades térmicas (0,0026 a 0,0029 W/(m·K)),

mas também baixas densidades aparentes (0,24 a 0,29 g/cm³) e excelentes resistências à compressão (0,7 a 2,5 MPa). A variação nas propriedades encontradas está relacionada com a modificação da temperatura de sinterização, onde foi possível concluir que quanto maior for a temperatura, menor será a condutividade térmica, densidade aparente e resistência à compressão do produto final. Já a porosidade apresenta comportamento oposto, aumentando com a elevação da temperatura.

Outro resíduo industrial que pode ser incorporado na composição das espumas vítreas sem comprometer o produto final é a cinza volante. Investigações experimentais relatadas por Li *et al.* (2018) evidenciaram que espumas vítreas com excelentes propriedades isolantes podem ser desenvolvidas utilizando cinza volante e vidro reciclado como matéria-prima principal, carbonato de sódio (Na₂CO₃) como agente fundente e carbetto de silício (SiC) como agente espumante. Amostras de espumas vítreas foram produzidas utilizando variadas combinações, em massa, de vidro reciclado (45,7% a 66,7%), cinza volante (33,3% a 43,3%) e carbonato de sódio (0% a 11%), com a finalidade de averiguar a concentração ideal de cada componente. O agente espumante foi mantido constante para todas as combinações, sendo adicionado na combinação, em massa, sob um teor de 0,5%. Todas as amostras foram homogeneizadas e prensadas com uma carga de 250 kg/cm² antes de serem submetidas ao tratamento térmico. As condições de tratamento térmico também foram investigadas, sendo as amostras submetidas a diferentes temperaturas de pico (variando de 800 a 1100 °C) e tempos de permanência na temperatura de pico (15 e 30 minutos). A taxa de aquecimento não variou, sendo mantida em 25 °C/min para todas as condições testadas. Após o resfriamento natural das amostras, as propriedades de densidade aparente, porosidade e resistência à compressão foram averiguadas. Os autores mencionaram que os melhores resultados foram obtidos para a combinação contendo 33,3% de cinza volante, 57,7% de vidro reciclado, 9% de carbonato de sódio e adição de 0,5% de carbetto de silício, a qual foi submetida a uma temperatura de sinterização de 875 °C e permaneceu exposta a temperatura de pico durante 15 minutos. Nas condições citadas foi possível obter espumas vítreas com densidades em torno de 0,6 g/cm³, resistência à compressão de 1,7 MPa e porosidade homogênea e bem distribuída. O teor ideal de cinza volante, assim como as condições de tratamento térmico foram determinados analisando as estruturas porosas finais dos materiais, sendo que

concentrações maiores de cinza volante implicaram maiores temperaturas para formação da espuma e originaram poros maiores e mais heterogêneos, o que é prejudicial às propriedades mecânicas do material. Por fim, os autores destacaram que a incorporação de carbetos de silício como agente fundente contribui satisfatoriamente para reduzir a temperatura de formação da espuma, tornando a sua produção mais economicamente e ambientalmente viável.

2.4.2 Agentes espumantes

Dentro do processo de produção de espumas vítreas, o agente espumante sem dúvidas assume o papel mais importante, já que provoca o aumento de volume que permite a formação do produto poroso final (KÖNIG, PETERSEN e YUE, 2014). Existem diversos agentes capazes de promover a espumação, os quais variam desde substâncias residuais como casca de ovo (BRYKALSKI *et al.*, 2023; FERNANDES *et al.*, 2014), sucata de bateria alcalina (ASSEFI *et al.*, 2021), pó de mármore (FERNANDES, TULYAGANOV e FERREIRA, 2009), escória de alumínio (EL-AMIR *et al.*, 2021), até substâncias de origem industrializada, como carbonato de cálcio (KÖNIG, PETERSEN e YUE, 2014; FERNANDES *et al.*, 2019; FERNANDES *et al.*, 2023; ZHU *et al.*, 2016), hidróxido de sódio (BENTO *et al.*, 2013; DA SILVA *et al.*, 2019), dentre outras.

O carbonato de cálcio (CaCO_3), um agente espumante comercial rico em CaO , vem sendo recorrentemente utilizado na produção de espumas vítreas (FERNANDES *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2016). A sua eficácia em formar estruturas porosas está relacionada com a capacidade que o material tem de se decompor ao atingir temperaturas em torno de $800\text{ }^\circ\text{C}$, gerando gás carbônico (CO_2). A temperatura em que este processo acontece é ótima, já que se encontra pouco abaixo da temperatura de fusão total dos vidros do tipo soda-cal (cerca de $1100\text{ }^\circ\text{C}$): nesta temperatura o vidro encontra-se amolecido, mas ainda mantendo certa viscosidade em sua estrutura, permitindo que bolhas sejam criadas, porém sem a possibilidade de ser eliminadas da matriz vítrea fundida. Assim, o gás gerado envolto na fase vítrea amolecida tende a gerar a expansão da mesma devido à pressão exercida, permitindo a emersão de poros na matriz (ZHU *et al.*, 2016).

Ainda cabe salientar que a incorporação da CCA como matéria-prima na produção de espumas vítreas, não só atua como uma fonte mineral de SiO_2 , mas

também pode contribuir com a formação porosa do material, pois além de SiO_2 , a CCA possui, mesmo que em concentrações menores do que o CaCO_3 , substâncias carbonáceas em sua composição, as quais tendem a ser liberadas na forma de gás (CO_2) conforme são decompostas durante o processo de sinterização do material, colaborando com a emergência de poros que formam o produto final (FERNANDES *et al.*, 2019).

2.4.3 Aplicações das espumas vítreas

As espumas vítreas são predominantemente aplicadas na indústria da construção civil como material de isolamento térmico e/ou acústico. Existem relatos da produção de espumas vítreas como agregados, especialmente para serem incorporados como substitutos parciais de agregados graúdos naturais na produção de concretos, como apresentado nos trabalhos de Fernandes *et al.* (2019) e Arriagada, Navarrete e Lopez (2020). A incorporação dos agregados de espuma promoveu melhorias na propriedade de densidade aparente do concreto produzido, de forma em que o concreto resultante apresentou-se mais leve em comparação ao convencional, favorecendo também a incorporação de matérias-primas oriundas de descarte, porém sacrificando parcialmente o desempenho mecânico referente ao suporte de carga do material (FERNANDES *et al.*, 2019). Sobretudo, Arriagada, Navarrete e Lopez (2020) relatam em seus estudos que a maior vantagem que essa incorporação pode promover, além da leveza, é a melhoria nas propriedades térmicas e acústicas dos concretos leves produzidos.

Na literatura, existem diversos estudos comprovando que é possível produzir espumas vítreas com excelentes propriedades térmicas, o que torna o produto ideal para aplicações no setor da construção civil como material de isolamento térmico em edificações, promovendo assim uma redução no consumo de energia (ASSEFI *et al.*, 2021).

El-Amir *et al.* (2021) relataram em seus estudos que espumas vítreas com excelentes propriedades para aplicações em isolamento térmico podem ser produzidas utilizando uma combinação contendo 95% de resíduos de vidro e 5% de escória de alumínio como agente espumante, em massa. As espumas vítreas produzidas apresentaram uma porosidade de até 86%, com uma estrutura composta por poros fechados e bem distribuídos, o que resultou na formação de um material

leve e com baixa condutividade térmica. As propriedades de densidade e de condutividade térmica do material produzido apresentaram valores de $0,43 \text{ g/cm}^3$ e $0,17 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, respectivamente.

Em pesquisa realizada por Assefi *et al.* (2021), espumas vítreas com condutividade térmica de $0,22 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ foram produzidas utilizando 97,5% de resíduo de vidro, 1,25% de carbonato de sódio e 1,25% de dióxido de manganês, em massa. De acordo com os autores, a baixa condutividade térmica encontrada esta associada com a presença de microporos (com diâmetros em média inferiores a $50 \text{ }\mu\text{m}$) bem distribuídos na estrutura do material, tornando o material promissor para aplicações como isolante térmico de paredes, forros ou pisos de edificações.

Em investigações experimentais lideradas por Konig, Petersen e Yue (2014) foi comprovado que espumas vítreas com condutividade térmica variando entre $0,05 - 0,053 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ podem ser produzidas através da sinterização de uma combinação contendo 96% resíduo de vidro e 4% carbonato de cálcio como agente espumante, em massa. As espumas resultantes apresentaram uma densidade aparente de $0,26 \text{ g/cm}^3$ e uma porosidade superior a 90%, composta por estrutura de poros fechada e homogênea, ideal para ser aplicada em isolamentos térmicos.

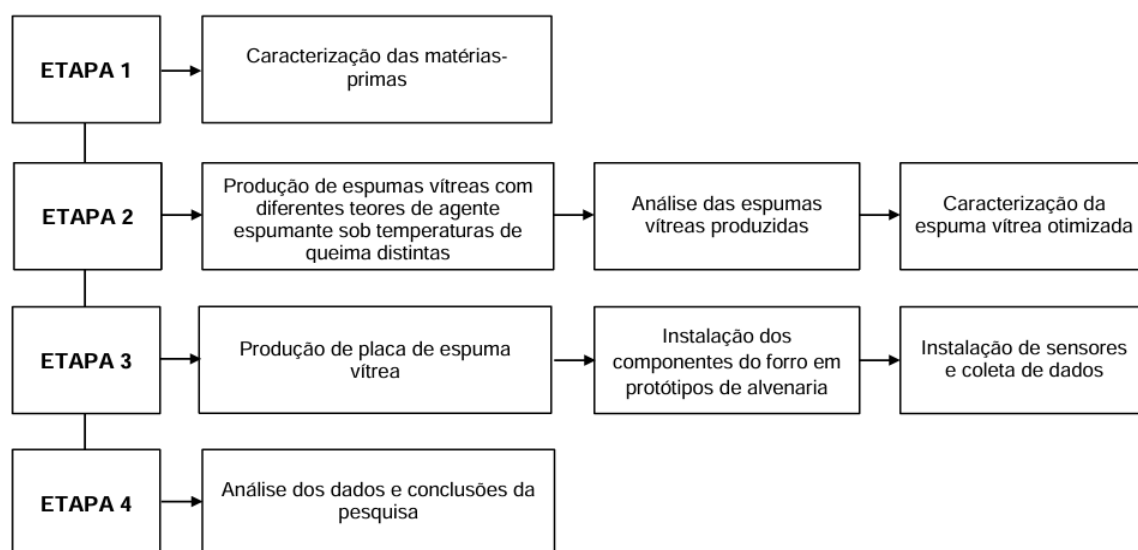
Por fim, de acordo com relatos de Zhu *et al.* (2016), espumas vítreas com condutividade térmica na ordem de $0,36 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ podem ser fabricadas através de uma combinação contendo 60% de resíduo de vidro e 40% de cinza volante, em massa. Nesse caso, houve a adição de carbonato de cálcio como agente espumante sob a combinação, em massa, na porcentagem de 0,5%. Com a finalidade de reduzir a temperatura de amolecimento das matérias primas principais e gerar uma economia de energia na produção das espumas, 30% de bórax, em massa, também foi adicionado à combinação. Além da baixa condutividade térmica encontrada, os autores relataram que as espumas apresentaram uma densidade em torno de $0,46 \text{ g/cm}^3$ e uma estrutura de poros homogênea, ou seja, como poros bem distribuídos e de tamanhos equivalentes. Devido às propriedades relatadas, conclui-se que as espumas vítreas têm potencial para serem aplicadas como material isolante térmico em construções, desencadeando não só vantagens econômicas associadas à redução do consumo de energia, mas também vantagens ambientais devido ao reaproveitamento de resíduos na produção de novos materiais, foco deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais, métodos e procedimentos que foram adotados para o desenvolvimento do trabalho.

O programa experimental foi organizado em quatro (4) etapas distintas, conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Etapa 1: Caracterização das matérias-primas

A etapa um (1) apresenta o conjunto de procedimentos e ensaios que foram realizados para determinar algumas das principais características das matérias-primas selecionadas para a produção das espumas vítreas.

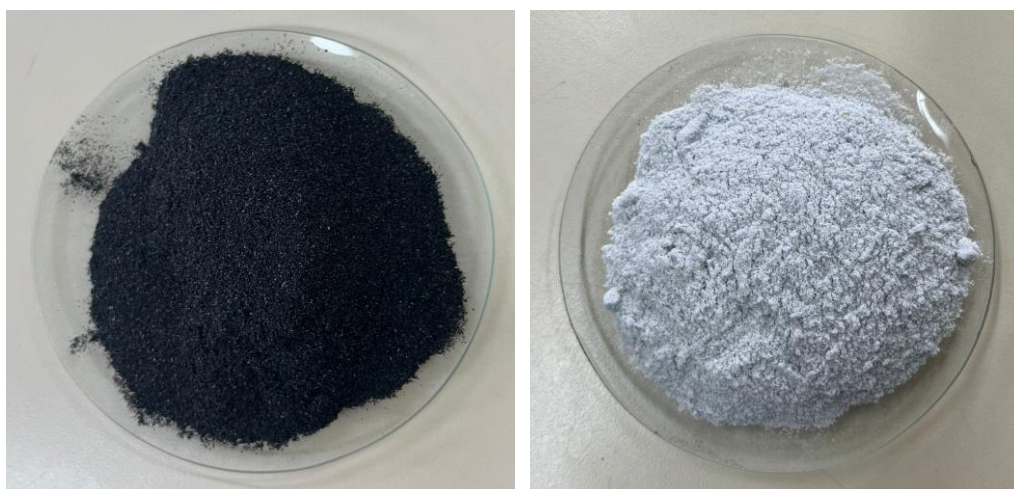
O carbonato de cálcio (CaCO_3) de grau analítico empregado na pesquisa, foi obtido pela marca Synth[®]. A CCA utilizada na produção das espumas vítreas foi adquirida com a empresa Urbano Ltda., localizada em São Gabriel-RS. A CCA foi gerada pela empresa através da queima da casca do arroz para geração de energia, sem controle detalhado de temperatura, a qual estima-se ser entre 750 e 900 °C. O tempo de permanência médio na caldeira é próximo de três (3) horas. Para eliminar os grãos mais grossos, foi necessário selecionar a CCA através de uma peneira com abertura da malha de 300 μm , onde somente foi utilizada a parcela de CCA passante pela peneira. A Figura 5-a exibe uma amostra da CCA empregada na

produção das espumas vítreas. O pó de vidro reciclado utilizado na produção das espumas vítreas foi recebido como doação da empresa Moínhos Viera, localizada em São Paulo-SP, a pedido da empresa Pilecco Nobre, localizada em Alegrete-RS. O vidro já se encontrava finamente moído, com uma granulometria abaixo de 300 μm , ou seja, em uma granulometria aparentemente adequada para sua utilização direta. Conforme informações fornecidas pela empresa, foi realizada uma separação prévia do vidro por cor antes do processo de moagem. Contudo, não houve uma distinção entre os diferentes tipos de vidro (como garrafas, frascos, etc.). Assim, o vidro reciclado utilizado no estudo apresenta uma única classificação em termos de cor, sendo predominantemente incolor. A Figura 5-b apresenta uma amostra do pó de vidro reciclado utilizado na produção das espumas vítreas.

Figura 5 - (a) amostra de CCA; (b) amostra de vidro reciclado

(a)

(b)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A CCA e o pó de vidro reciclado foram analisados referentes às suas granulometrias através de peneiramento manual (peneiras da marca Bronzinox[®]), utilizando como normativa base a NBR 17054 (ABNT, 2022), enquanto as suas composições químicas foram avaliadas através de Fluorescência de Raios X (PANalytical, Epsilon 1, $Z > 11$), sem tratamento prévio. O peneiramento manual e a análise por Fluorescência de Raios X foram realizados no laboratório do Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI), localizado na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Alegrete-RS.

A composição química do agente espumante (CaCO_3) foi obtida do fabricante através de informações extraídas da embalagem do produto e encontra-se apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do CaCO_3

Teor mínimo de CaCO_3	99,0%
Máximo de impurezas	
Ferro (Fe)	0,01%
Insolúveis em HCl	0,05%
Metais pesados	0,001%
Substâncias oxidantes	0,005%

Fonte: Embalagem do produto (2024).

3.2 Etapa 2: Produção, análise e caracterização da espuma vítrea otimizada

A etapa dois (2) não só detalha os processos de produção que foram utilizados para obtenção das espumas vítreas, mas também descreve a análise que estabeleceu a determinação do teor ideal de agente espumante e da melhor temperatura de sinterização entre as combinações estudadas e os métodos de caracterização que foram utilizados para determinação das principais propriedades da espuma selecionada como ideal.

3.2.1 Produção das espumas vítreas

O processo de produção das espumas vítreas foi baseado em sinterizar diferentes combinações contendo vidro reciclado em forma de pó, CCA e CaCO_3 como agente espumante, sob diferentes temperaturas, com a finalidade de encontrar a composição e a temperatura de sinterização que agregassem as melhores propriedades morfológicas, de densidade aparente, resistência à compressão e condutividade térmica ao produto final. As espumas foram preparadas no laboratório de Estruturas, Materiais e Construção (LEMAC) e sinterizadas no laboratório do Grupo de Óptica, Micro e Nanofabricação de Dispositivos (GOMNDI), ambos localizados na Universidade federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Alegrete-RS. Uma mistura contendo 20% de CCA e 80% de pó de vidro (em massa) foi preparada para integrar a maior parte (95%, 97,5%, 98% e 100%, em massa) das composições finais das amostras. Os teores de CCA e pó de vidro reciclado escolhidos para

compor a mistura basearam-se em estudo similar realizado por Fernandes, Tulyaganov e Ferreira (2009), onde as espumas vítreas estudadas pelos autores apresentam melhores propriedades quando implementou-se como matéria-prima para sua produção uma mistura contendo 20% de cinza volante e 80% de vidro reciclado. Entretanto, devido à ampla produção de arroz no Estado do Rio Grande do Sul, região onde o estudo está sendo desenvolvido, optou-se por utilizar a CCA como substituta da cinza volante, sob mesma taxa de adição. Como agente espumante foi empregado o carbonato de cálcio industrializado (CaCO_3), com teores de incorporação distintos de 0%, 2%, 2,5% e 5%, em massa. Sendo assim, foram investigadas a produção de quatro (4) combinações distintas, sendo a primeira composta por 100% da mistura (CCA+Vidro) e 0% de CaCO_3 (C0%), a segunda composta por 98% da mistura (CCA+Vidro) e 2% de CaCO_3 (C2%), a terceira composta por 97,5% da mistura (CCA+Vidro) e 2,5% de CaCO_3 (C2,5%) e a quarta composta por 95% da mistura (CCA+Vidro) e 5% de CaCO_3 (C5%). A Tabela 3 exibe em resumo as quatro (4) combinações testadas, com suas respectivas denominações e teores de cada material utilizado como matéria-prima na produção das espumas vítreas.

Tabela 3 - Resumo das combinações testadas

Denominação	Teor da mistura (%) (20% CCA + 80% vidro)	Teor de agente espumante (%) (CaCO_3)
C0%	100	0
C2%	98	2
C2,5%	97,5	2,5
C5%	95	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

As diferentes combinações foram homogeneizadas isoladamente de forma manual, com auxílio de almofariz (Figura 6), onde foi necessária a adição de um teor de 8% de água sob cada combinação, em massa, no intuito de umidificar o material para possibilitar a moldagem. O processo de moldagem (Figura 7) consistiu em compactar uniaxialmente a combinação homogeneizada, onde com o auxílio de um molde metálico com capacidade de formar duas (2) amostras retangulares (largura média - 39,70 mm; comprimento médio - 74,60 mm) simultaneamente (Figura 7-a) e, utilizando uma prensa hidráulica manual, da marca Bovenau®, com capacidade

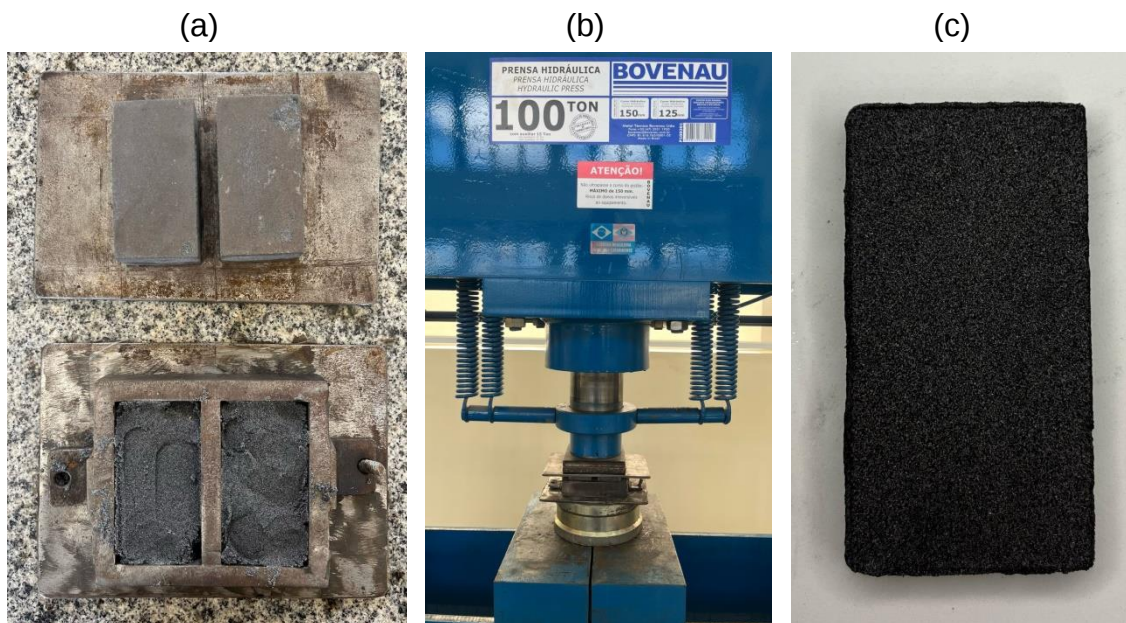
máxima de 100 toneladas (Figura 7-b), foi possível aplicar uma carga de 15 toneladas sobre o molde e originar amostras como a representada pela Figura 7-c.

Figura 6 - Homogeneização em almofariz



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Processo de moldagem, onde: (a) molde metálico; (b) prensa hidráulica; (c) amostras originadas antes da sinterização.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 55 ± 5 °C por aproximadamente 24 horas. Depois de submetidas ao processo de secagem, as amostras foram sinterizadas em forno mufla de alta temperatura, da marca INTI, com capacidade de aquecimento de até 1600 °C (Figura 8), sob diversas temperaturas (950 °C, 1000 °C, 1030 °C), com a finalidade de encontrar, além da combinação ideal, a temperatura ótima de formação da espuma vítrea. A temperatura inicial de

teste (950 °C) foi determinada a partir da literatura (FERNANDES, TULYAGANOV E FERREIRA, 2009), já as demais temperaturas testadas foram adaptadas de acordo com a necessidade, ou seja, para que houvesse a formação de uma estrutura porosa característica de espumas vítreas. A taxa de aquecimento e o tempo de permanência na temperatura de pico foram fixados em 5 °C/min e 30 minutos, respectivamente. Após atingir o tempo de permanência na temperatura de pico, o forno foi desligado e as amostras permaneceram em seu interior durante aproximadamente 12 horas. Esse processo garantiu que as amostras resfriassem naturalmente, contudo, de maneira lenta, evitando o possível surgimento de tensões residuais causadas devido a um resfriamento mais brusco, o que poderia causar danos às espumas.

Figura 8 - Forno mufla de alta temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Análise das espumas vítreas produzidas

Inicialmente, todas as espumas vítreas produzidas no estudo foram submetidas a análises morfológicas, bem como à avaliação da densidade aparente, propriedade física, e da resistência à compressão axial, propriedade mecânica, com o objetivo de determinar o teor de agente espumante e a temperatura de sinterização ideal (espuma vítrea otimizada), de modo a atender os objetivos iniciais e possibilitar o avanço do estudo. Posteriormente, a espuma vítrea otimizada foi submetida a análises mais detalhadas, abrangendo as propriedades físicas de

condutividade térmica, diâmetro médio dos poros e porosidade. A microestrutura e a composição das fases da espuma vítrea também foram alvos de avaliação.

3.2.2.1 Densidade aparente

A densidade aparente foi calculada de forma equivalente ao realizado por EL-AMIR *et al.* (2021), conforme determina a Equação 1.

$$D = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Onde:

D: densidade aparente (g/cm³)

M: massa da amostra (g)

V: volume da amostra (cm³)

O volume das amostras foi calculado após um processo de regularização da forma das espumas vítreas, pois as mesmas apresentaram uma forma não regular após produção. O processo de regularização baseou-se em cortar, de forma manual, pequenos retângulos da amostra original, sendo as faces do retângulo lixadas para eliminar as imperfeições. Com as amostras regularizadas, mediu-se as dimensões com auxílio de um paquímetro digital (marca Marberg®) e determinou-se o volume de cada amostra. A massa de cada amostra foi obtida através de uma balança analítica (marca SHIMADZU®). Com os dados de volume e massa obtidos determinou-se a densidade aparente conforme a Equação 1. Para cada combinação testada foram preparadas e avaliadas três (3) amostras, sendo o resultado final de densidade aparente determinado a partir do valor médio entre as três (3) medições realizadas.

3.2.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica foi medida com auxílio do instrumento da marca LaserComp, modelo FOX 200 (Figura 9), disponível no Laboratório de Estruturas, Materiais e Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, campus Alegrete-RS. O instrumento utilizado mede a condutividade térmica do material de acordo com as prescrições de ensaio dispostas na Norma Internacional

ASTM C518-04 (ASTM, 2021) e determina os valores de condutividade térmica de acordo com modelos matemáticos fornecidos Norma Internacional ASTM C1045-01 (ASTM, 2019). O ensaio foi realizado em triplicata, ou seja, foram ensaiadas três (3) placas de espuma vítrea, cada uma com dimensões médias de 16 x 17 cm e espessura média de 20 mm. Cada placa foi ensaiada em dois intervalos distintos de temperatura, um compreendido entre 10 °C a 35 °C e outro entre 35 °C e 60 °C. As faixas de temperatura foram escolhidas com a finalidade de simular temperaturas reais no qual o material possa vir a ser exposto, com ênfase nos períodos mais quentes (verão). O equipamento utilizado não tolera diferenças de temperaturas superiores a 30 °C, por este motivo optou-se por realizar o ensaio utilizando as duas (2) faixas de temperatura descritas, variando 25 °C em cada faixa. O resultado final da propriedade foi expresso a partir do valor médio entre os valores obtidos após a realização do ensaio em cada uma das três (3) placas distintas.

Figura 9 - Equipamento LaserComp



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.3 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi determinada com auxílio de uma prensa modelo AGS-X, da marca SHIMADZU® (Figura 10), disponível no laboratório de metalografia, tratamentos térmicos e ensaios mecânicos, da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, Campus Alegrete-RS, a qual possui uma capacidade de carregamento compreendida entre 10 N e 10 kN, sendo que a carga foi aplicada na amostra de espuma com uma velocidade de 1 mm/min. O ensaio para determinação da resistência à compressão axial seguiu prescrições descritas na Norma

Internacional ASTM C165 (ASTM, 2012). A resistência à compressão axial das espumas vítreas foi obtida pela divisão entre a força compressiva máxima que levou a ruptura da amostra pela área da seção transversal da amostra, conforme expressa a Equação 2. O ensaio foi realizado em triplicata, ou seja, para cada combinação foram ensaiadas três (3) amostras retangulares distintas, sendo o resultado final da propriedade determinado a partir do valor médio entre as três (3) medições realizadas.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

σ_c : resistência à compressão axial (MPa)

F: Força máxima (N)

A: Área da seção transversal da amostra (mm²)

Figura 10 - Prensa SHIMADZU



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2.4 Diâmetro médio dos poros e porosidade

O diâmetro médio dos poros foi determinado por meio de análise de imagens utilizando o software ImageJ[®]. Para que o programa reconhecesse as dimensões reais dos poros, foi necessário calibrar a escala da imagem. Para isso, a estrutura da espuma vítrea foi fotografada ao lado de uma régua, permitindo que uma distância

conhecida fosse fornecida ao software e a escala de medição fosse ajustada. A análise dos poros foi conduzida de forma manual, consistindo na identificação e medição de 50 poros aleatórios na imagem. Cada poro foi medido em duas (2) direções perpendiculares, resultando em um total de 100 medições. Esse procedimento foi adotado com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados, visto que os poros apresentam formas irregulares e não são perfeitamente esféricos. A média das 100 medições realizadas foi calculada, definindo o diâmetro médio dos poros. A análise descrita foi realizada em triplicata, ou seja, três (3) amostras distintas de espuma vítrea foram fotografadas e analisadas. O diâmetro médio final dos poros foi determinado a partir da média dos três (3) resultados obtidos.

A porosidade foi determinada a partir da densidade aparente média da espuma vítrea após o processo de sinterização e da densidade teórica da combinação preparada (vidro + CCA + CaCO_3), ainda em forma de pó, antes da compactação. Autores como Fernandes *et al.* (2019) e König *et al.* (2020) utilizaram em seus estudos metodologia equivalente para determinação da porosidade do material. A Equação 3 expressa o cálculo realizado.

$$P = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r}\right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

P : Porosidade (%)

ρ_a : Densidade aparente média da espuma vítrea (g/cm^3)

ρ_r : Densidade teórica (g/cm^3)

A densidade média foi obtida de acordo com os procedimentos descritos no subitem 3.2.2.1, enquanto a densidade teórica foi determinada conforme prescreve a NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.2.2.5 Microestrutura e composição das fases

A microestrutura e a composição de fases da espuma vítrea foram investigadas por Difração de Raios X (Rigaku, ULTIMA IV), com geometria Bragg-Brentano. Os padrões de DRX foram registrados em uma faixa de 2° a 60° ,

utilizando um tubo de cobre e filtro de níquel no detector. As condições de operação foram de 40 kV e 20 mA, com passo angular de $0,05^\circ$ e tempo de integração de um (1) segundo. A investigação por Difração de Raios X foi realizada no PPCEM - Grupo Nanoestruturados, localizado na UNIPAMPA, Campus Bagé-RS.

3.3 Etapa 3: Produção da placa, instalação dos componentes do forro e coleta dos dados

A etapa três (3) descreve os processos que foram adotados para produção da placa de espuma vítrea, assim como detalha os procedimentos que foram utilizados para instalação dos componentes do forro em protótipos de alvenaria (incluindo a placa produzida) e apresenta o método aplicado para coleta de dados necessários.

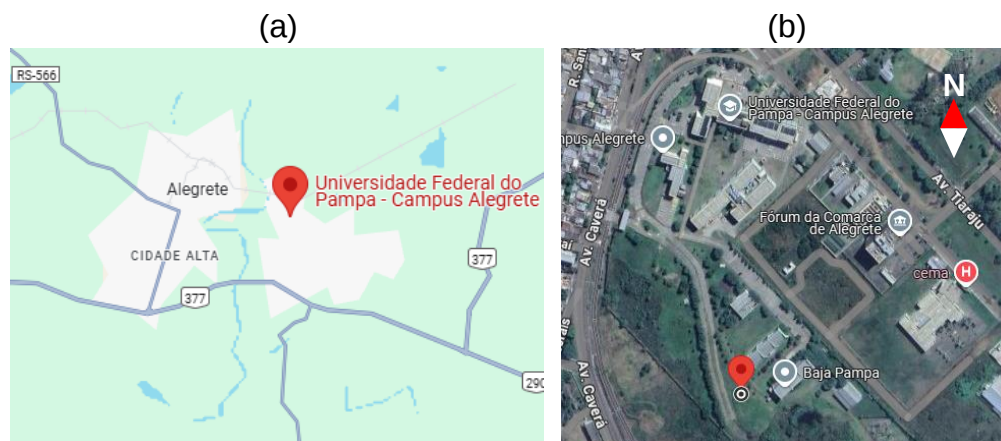
3.3.1 Produção da placa de espuma vítrea

A produção da placa de espuma vítrea consistiu em produzir quantas espumas fossem necessárias para que, uma vez regularizadas e unidas, formassem uma placa de dimensões de um metro e trinta e dois centímetros (1,32 m) por um metro e trinta e dois centímetros (1,32 m), com uma espessura média de 20 mm. As espumas vítreas que compõem a placa foram produzidas com base na composição e temperatura de sinterização determinada como ideal após a análise descrita no subitem 3.2.2. Não foi possível produzir espumas com maiores dimensões devido à limitação das dimensões do forno utilizado para produção, sendo assim, as espumas, antes de sinterizadas, seguiram sendo moldadas utilizando o mesmo molde metálico apresentado na Figura 7-a, apresentando assim as mesmas dimensões descritas no subitem 3.2.1 (largura média - 39,70 mm; comprimento médio - 74,60 mm). Após o processo de produção, todas as espumas foram regularizadas até atingirem espessura de aproximadamente 20 mm e unidas, com auxílio de uma cola específica, até formar uma placa de um metro e trinta e dois centímetros (1,32 m) por um metro e trinta e dois centímetros (1,32 m). A cola utilizada para unir as espumas foi adquirida com a empresa TAPCAMP® soluções industriais, denominada como cola adesivo de alta temperatura, resistindo, de acordo com o fabricante, até 1300°C e possuindo características próprias para aplicações em colagens de materiais cerâmicos.

3.3.2 Instalação dos componentes do forro em protótipos de alvenaria

A placa de espuma vítrea foi instalada como revestimento de forro de gesso em um (1) protótipo em alvenaria de tijolos cerâmicos previamente construído nas dependências da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Alegrete-RS. Os protótipos foram desenvolvidos como parte da pesquisa de dissertação de Mestrado de Misaka (2024), cujas especificações construtivas detalhadas encontram-se disponíveis no estudo publicado no repositório institucional de teses e dissertações da referida Universidade. Cabe ressaltar que existe mais de um (1) protótipo construído, idênticos em termos de materiais e dimensões, portanto, foi possível realizar a análise e comparação de resultados entre dois (2) protótipos, sendo um (1) composto por forro de gesso revestido com a placa de espuma vítrea e outro composto apenas pelo forro de gesso, sem nenhum tipo de revestimento (referência). Essa comparação permitiu identificar o real efeito do material produzido (espuma vítrea) quando empregado para fins de isolamento térmico de forros de gesso em protótipos de alvenaria de tijolos cerâmicos. Ambos os protótipos estudados estão localizados em campo aberto, em uma área localizada dentro da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), no município de Alegrete-RS (Figura 11). As coordenadas do local onde os protótipos estudados estão instalados possuem latitude 29° 47' 31" Sul e longitude 55° 46' 7" Oeste. Cada protótipo possui dimensões totais externas de um metro e cinquenta centímetros (1,50 m) por um metro e cinquenta centímetros (1,50 m), o que confere uma área ocupada de 2,25 m² para cada protótipo. Já as dimensões internas de cada protótipo, ou seja, excluindo as alvenarias compostas por tijolos cerâmicos de seis (6) furos, são de um metro e trinta e dois centímetros (1,32 m) por um metro e trinta e dois centímetros (1,32 m), o que resulta em uma área útil de 1,7424 m² para cada protótipo e o que justifica a dimensão da placa de espuma vítrea produzida. A altura total de cada protótipo é de um metro e sessenta centímetros (1,60 m). A Figura 12 apresenta os protótipos em alvenaria descritos.

Figura 11 - Localização dos protótipos, onde: (a) Mapa de Alegrete-RS com a localização da UNIPAMPA; (b) Local exato onde os protótipos encontram-se nas dependências da UNIPAMPA.



Fonte: Retirado do Google Maps (2025).

Figura 12 - Protótipos em alvenaria



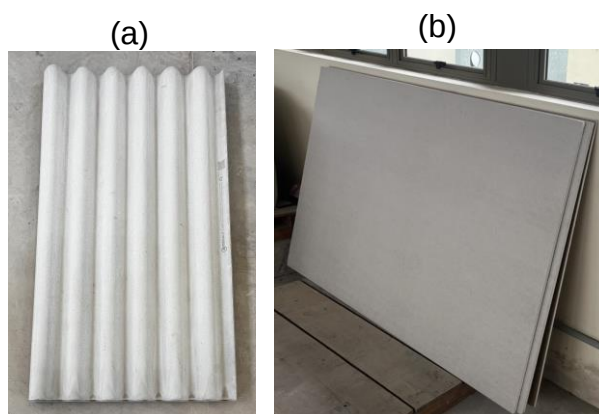
Fonte: Elaborado pelo autor.

O tipo de cobertura utilizada no estudo foi composto por telhas de fibrocimento sem amianto, da marca Imbralit®, em forma de chapas onduladas, produzidas e classificadas de acordo com as especificações descritas na NBR 15210-1 (ABNT, 2023), com espessura de seis milímetros (6 mm), comprimento total de dois metros e treze centímetros (2,13 m) e largura total de um metro e dez centímetros (1,10 m) (Figura 13-a). Não foram fornecidos dados relativos às propriedades térmicas da telha Imbralit® na ficha técnica do material, entretanto, de acordo com redação publicada em AECweb (2016), as telhas de fibrocimento possuem condutividade térmica compreendida entre 0,3 e 0,4 W/m.K. Além disso, em catálogo técnico de produto equivalente, da marca Brasilit® Saint-Gobain (2021), as telhas onduladas de fibrocimento sem amianto com espessura de seis milímetros

(6 mm) apresentam uma condutividade térmica de 0,35 W/m.K. Como justificativa da escolha do tipo de telha, tem-se que as telhas de fibrocimento são um dos tipos de coberturas mais utilizados pela indústria da construção civil, especialmente devido ao baixo custo associado ao material em relação a outros tipos de telhas, de acordo com Zini e Campos (2022), na atualidade, cerca de 35% a 40% das residências são constituídas por coberturas compostas por telhas de fibrocimento. As telhas foram instaladas de acordo com as informações fornecidas na ficha técnica da telha ondulada fornecida pela marca, atendendo a inclinação mínima de cinco graus (5°) ou 8,7%, vão livre máximo entre as terças de um metro e setenta e três centímetros (1,73 m), respeitando o número de apoio mínimo formado por três (3) terças e recobrimento mínimo lateral de uma onda e meia (1 e 1/2) (IMBRALIT, 2022).

O forro de gesso foi adquirido e instalado em forma de placas industriais (Figura 13-b), fabricadas pela empresa Placo® do Brasil, seguindo as prescrições de produção descritas na NBR 14715-1 (ABNT, 2021). As placas de gesso utilizadas possuem uma espessura de 12,5 mm e propriedades físicas e mecânicas conforme descrito na Tabela 4. O forro de gesso foi empregado na pesquisa por fins de estética, pois as espumas vítreas produzidas não apresentaram um acabamento visual enquadrado dentro dos padrões normalmente requeridos pelos consumidores. A Figura 14 ilustra como foi efetuada a ordem de instalação dos componentes em cada protótipo estudado, sendo que a Figura 14-a representa o protótipo denominado como referência, composto apenas pelo forro de gesso, sem nenhum revestimento; já a Figura 14-b representa o protótipo no qual além do forro de gesso, foi implementado a placa de espuma vítrea como revestimento.

Figura 13 - (a) Telhas de fibrocimento; (b) Placas de gesso.



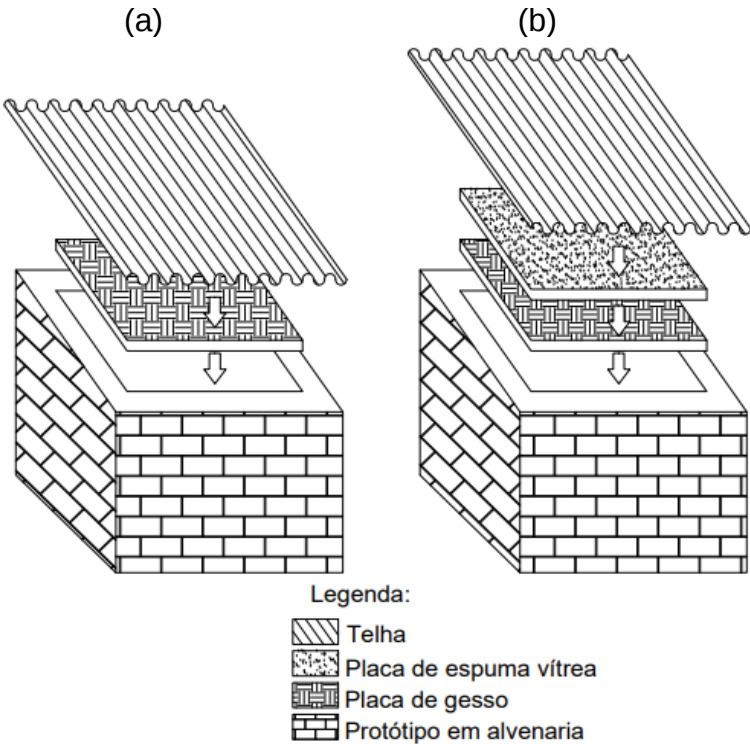
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Propriedades das placas de gesso

Propriedades físicas e mecânicas	Valor nominal
Densidade superficial (kg/m ²)	8,0 -12,0
Resistência à ruptura na flexão longitudinal (N)	≥ 550
Resistência à ruptura na flexão transversal (N)	≥ 210
Condutividade térmica (W/m.k)	0,25

Fonte: Adaptado de Placo Saint-Gobain (2024).

Figura 14 - Ilustração da ordem de instalação dos componentes, onde: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo de forro revestido com espuma vítrea.



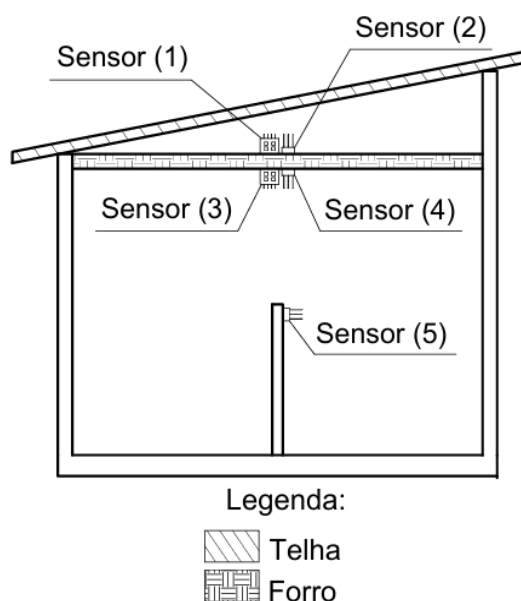
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Instalação de sensores e coleta de dados

A coleta de dados foi realizada através da instalação de cinco (5) sensores de temperatura e umidade em cada protótipo estudado. Dois (2) dos sensores foram instalados na parte superior do forro (sensor 1 e 2), sendo o sensor 1 responsável por coletar os dados de umidade e o sensor 2 responsável por coletar os dados relativos à temperatura. Outros dois (2) sensores foram instalados na parte inferior do forro (sensor 3 e 4), sendo o sensor 3 responsável por coletar os dados de umidade e o sensor 4 os dados relativos à temperatura. Ainda foi instalado um (1) sensor responsável por coletar dados de temperatura no centro interno dos protótipos (sensor 5), com a finalidade de averiguar a temperatura no ambiente. A

Figura 15 ilustra como os sensores foram dispostos nos protótipos de alvenaria, tanto para o protótipo com forro revestido por espuma vítrea, quanto para o protótipo referência (sem o revestimento do forro com espuma vítrea).

Figura 15 - Ilustração da disposição dos sensores de temperatura e umidade



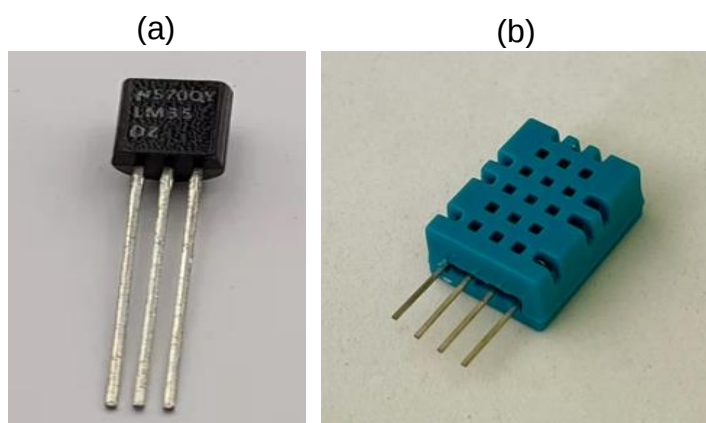
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sensores de temperatura utilizados foram do tipo LM35 (Figura 16-a), enquanto os sensores adotados para capturar os dados relativos à umidade foram do tipo DHT11 (Figura 16-b). Todos os dez (10) sensores utilizados na coleta dos dados de ambos os protótipos foram conectados a um Arduino UNO (Figura 17), montado em uma placa protoboard, o qual foi utilizado para programar e gerenciar a captura e armazenamento de todos os dados coletados em um cartão de memória SD. O intervalo de tempo em que o Arduino UNO foi programado para realizar a captura de dados relativos à temperatura e umidade foi a cada 30 minutos, ou seja, a cada 30 minutos o equipamento realizou a captura dos dados de todos os dez (10) sensores instalados, durante todo o período de coleta predeterminado. Os dados coletados a cada 30 minutos eram gravados no cartão de memória SD em formato .txt, possibilitando assim que os dados salvos no cartão fossem posteriormente transferidos o Excel para serem analisados. O sistema montado necessitava de um cabo de alimentação para seu correto funcionamento, sendo assim, um cabo foi conectado a uma tomada de uso comum e utilizado como forma de alimentação. Para medida de segurança em caso de queda de energia por curtos intervalos de

tempo, foram utilizados uma bateria e um relé interligados ao sistema, com a finalidade de dar continuidade à captura dos dados mesmo durante períodos de queda de energia que se estendam por um período de até 20 horas, garantindo assim tempo suficiente para que o sistema não perdesse os dados coletados e continuasse em funcionamento mesmo durante eventuais períodos de queda de energia.

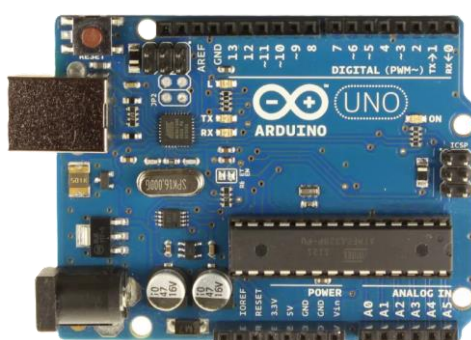
Para viabilizar a coleta de dados, foi necessário desenvolver um código para programar o Arduino UNO, responsável pelo controle de todo o sistema de coleta de dados. O código completo utilizado encontra-se no Apêndice A deste estudo.

Figura 16 - Sensores, onde: (a) LM35; (b) DHT11.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Arduino UNO



Fonte: Elaborado pelo autor.

A coleta de dados foi realizada no período de 10 a 12 de fevereiro de 2025 (10/02/2025 a 12/02/2025), totalizando 48 horas consecutivas. A escolha do mês em que a coleta foi realizada deve-se ao fato de que, por coincidir com a estação do ano denominada verão na região estudada (Alegrete-RS), fevereiro geralmente apresenta temperaturas elevadas, contribuindo com a intensificação do desconforto térmico no interior das edificações.

3.4 Etapa 4: Análise de dados e conclusões da pesquisa

A etapa quatro (4) descreve como os dados coletados foram analisados para que fosse possível obter as conclusões referentes à pesquisa.

Antecedentemente a análise, foi efetivado um processo de calibração dos dados obtidos através dos sensores. A correção tornou-se necessária para validação de resultados porque, embora os sensores utilizados fossem do mesmo modelo para uma mesma finalidade (medir temperatura ou umidade), os dados capturados apresentaram pequenas variações entre si, mesmo quando expostos às mesmas condições de temperatura e umidade. O processo de calibração consistiu na coleta de dados de todos os sensores em um ambiente de temperatura controlada, durante um período de uma (1) hora, sendo que a cada dois (2) minutos foi realizada uma captura dos dados em todos os sensores, permitindo a identificação das variações entre um sensor e outro. O sensor cujos valores médios relativos à temperatura e umidade mostraram-se mais aproximados das condições reais do ambiente de análise (extraídas de um termo-higrômetro da marca ThermoPro) foi utilizado como parâmetro de correção, sendo que a diferença entre os valores registrados pelo respectivo sensor e os demais foi empregada para definir um fator de correção específico para cada sensor utilizado na coleta, fator este que posteriormente foi aplicado para corrigir os dados coletados em ambos os protótipos envolvidos no estudo. Cabe ainda salientar que, os dados de temperatura e umidade foram salvos em um cartão de memória SD durante a coleta nos protótipos, em formato .txt, e sucessivamente transferidos para planilhas do Excel, ferramenta na qual os dados foram organizados e corrigidos de acordo com o processo de calibração descrito.

Após a correção, os dados foram analisados e comparados entre si e com dados obtidos de estação meteorológica automática localizada no Instituto Federal Farroupilha, campus Alegrete-RS. As coordenadas do local onde a estação meteorológica está instalada possuem latitude 29° 42' 36" Sul e longitude 55° 31' 48" Oeste. Os dados referentes à estação meteorológica descrita foram extraídos do site do INMET.

Com base nas análises e comparações realizadas, foi possível identificar, discutir e concluir a capacidade de isolamento térmico das espumas vítreas quando aplicadas como revestimento de forro de gesso em protótipos de alvenaria de tijolos cerâmicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados alcançados após a realização das etapas descritas no capítulo três (3) deste trabalho, o qual compreende os materiais e métodos empregados na pesquisa.

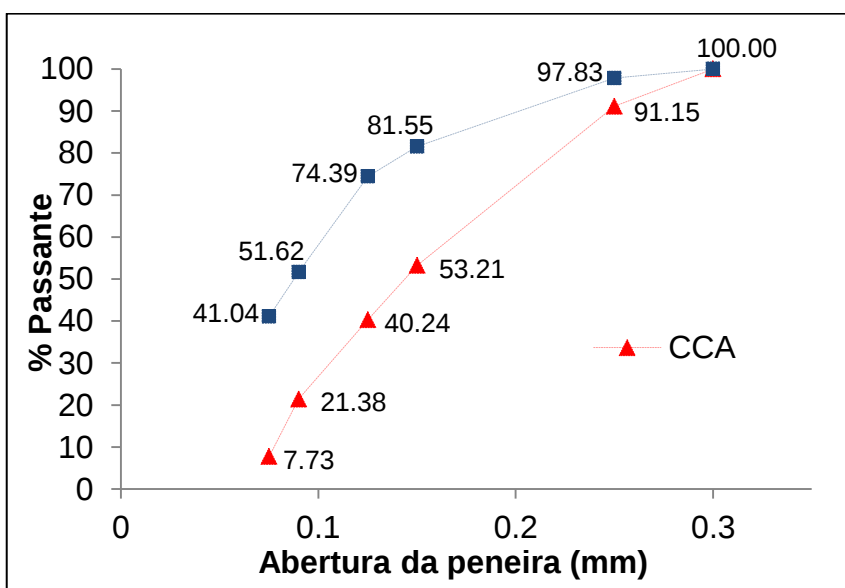
4.1 Caracterização das matérias-primas

Os resultados obtidos após a caracterização das matérias-primas utilizadas na produção das espumas vítreas estão apresentados nos subitens 4.1.1 à 4.1.2.

4.1.1 Granulometria

A composição granulométrica das matérias-primas foi determinada através de peneiramento manual. Cabe ressaltar que a normativa base utilizada para realização do ensaio foi a NBR 17054 (ABNT, 2022), conforme descrito no item 3.1. O gráfico da Figura 18 exibe os resultados obtidos após a análise da composição granulométrica das matérias-primas (CCA e vidro reciclado) utilizadas na produção das espumas vítreas. O gráfico exibe as porcentagens de material passante em relação à abertura de cada peneira. As peneiras utilizadas na análise foram de 0,075 mm, 0,09 mm, 0,125 mm, 0,15 mm, 0,25 mm e 0,30 mm.

Figura 18 - Análise granulométrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado no gráfico da Figura 18, ambas as matérias-primas utilizadas na produção das espumas vítreas apresentaram, em sua totalidade, grãos com tamanhos inferiores a 0,3 mm. Em particular, verificou-se que a maior parte dos grãos do vidro reciclado (51,62%) utilizado possuem tamanhos inferiores a 0,09 mm, enquanto apenas 21,38% dos grãos de CAA apresentam granulometria abaixo de 0,09 mm. Ademais, observa-se que a maior parte dos grãos de CAA (53,21%) apresentam tamanhos inferiores a 0,15 mm. De acordo com Konig, Petersen e Yue (2014), a granulometria das partículas utilizadas na produção das espumas vítreas é crucial e influencia diretamente na temperatura e no tempo necessário para formação da estrutura porosa, pois partículas mais finas tendem a se decompor mais rapidamente, o que pode afetar a formação de poros caso parte do agente espumante empregado na composição se decomponha antes da fase vítrea estar em seu estado amolecido.

4.1.2 Composição química

A composição química das matérias-primas (CCA e vidro reciclado) utilizadas na produção das espumas vítreas foi avaliada através da análise de fluorescência de raios-X (FRX), conforme descrito no item 3.1. É importante destacar que o equipamento utilizado apresenta a limitação de detectar apenas elementos da tabela periódica com número atômico maior que 11 ($Z > 11$). Assim, elementos como carbono e sódio, entre outros, não são identificados por essa técnica. Na CCA, observa-se a presença de carbono residual (C*) não completamente combusto, assim como, na composição do vidro soda-cal reciclado utilizado neste estudo, destaca-se o óxido de sódio como um dos componentes de maior concentração. Para estimar o teor de carbono residual (C*) na cinza, foi realizada uma análise CHN, que revelou um conteúdo de 5,06%, em massa. Após descontar esse valor do total, foi possível determinar a presença de sílica (SiO_2), em cerca de 89,5%, em massa. Além disso, foram identificadas outras impurezas, como óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de alumínio (Al_2O_3), que estão presentes em menores proporções. A Tabela 5 apresenta as concentrações dos elementos encontrados, em massa, para a CCA.

Tabela 5 - Composição química da CCA

Matéria-prima	Composição química (%)								
CCA	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	C*
	89,45	1,41	0,02	3,14	0,05	0,27	0,03	0,50	5,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do vidro reciclado, baseado em receitas de composição comercial, foi estimada uma presença de óxido de sódio e óxido de boro (B₂O₃ + Na₂O*) de 20%, em massa, permitindo assim determinar uma concentração de sílica (SiO₂) de 67,8%, em massa, no vidro reciclado, além de outros componentes como óxido de cálcio (CaO) e óxido de alumínio (Al₂O₃), principalmente. A Tabela 6 exibe a composição química do vidro reciclado utilizado no estudo.

Tabela 6 - Composição química do vidro reciclado

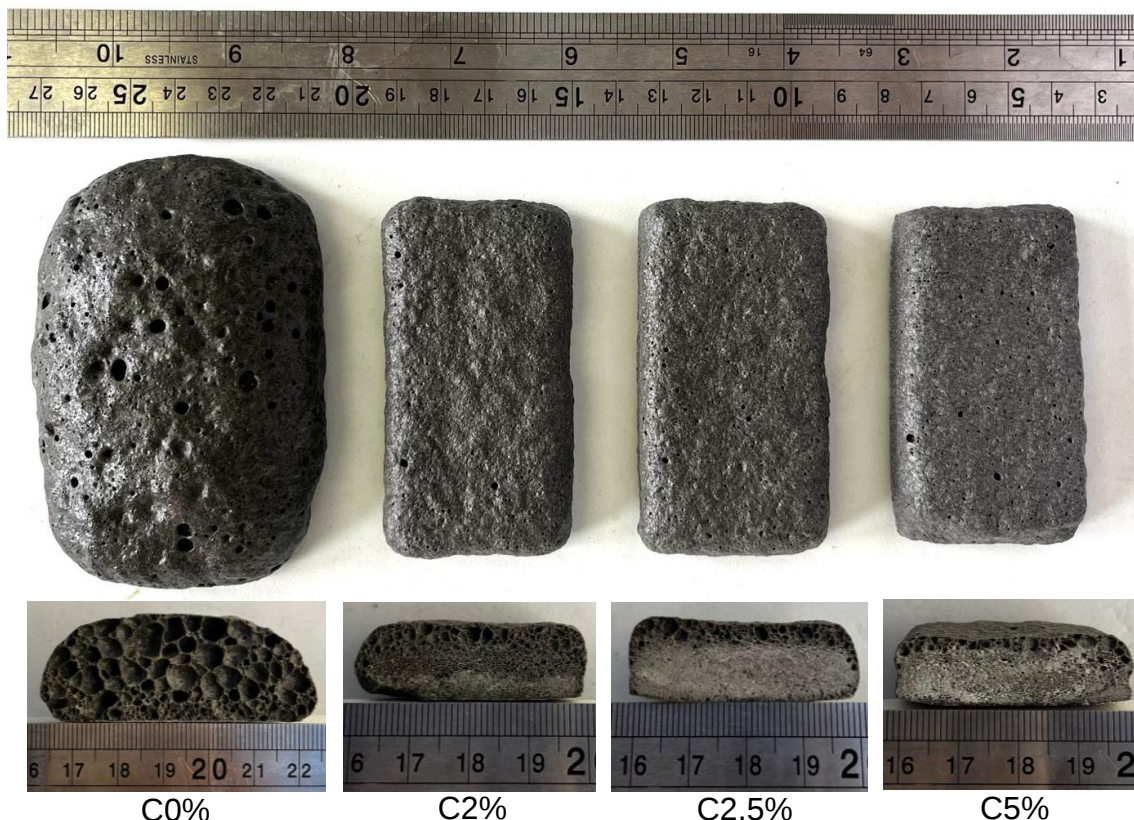
Matéria-prima	Composição química (%)							
Vidro reciclado	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	SnO ₂	K ₂ O	B ₂ O ₃ + Na ₂ O*
	67,69	9,86	1,66	0,10	0,22	0,04	0,43	20

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Determinação do teor de agente espumante e da temperatura de sinterização ideal

A morfologia de cada amostra de espuma vítrea produzida pode ser visualizada nas Figuras 19 a 22. As amostras de espumas vítreas C2%, C2,5% e C5%, sinterizadas sob temperatura de 950 °C, não apresentaram o aumento de volume esperado, ou seja, não foi evidenciada a formação de poros em toda a matriz do material, havendo uma pequena formação porosa apenas na parte superior das amostras. Já a amostra C0% apresentou um aumento de volume mais expressivo quando sinterizada a temperatura de 950 °C. Inicialmente, todas as amostras apresentavam espessura média em torno de 8,76 mm. Após a sinterização sob temperatura de 950 °C, a espessura média observada na parte central das amostras C0%, C2%, C2,5% e C5% foi de 24,26 mm, 13,81 mm, 13,59 mm e 13,55 mm, respectivamente. A Figura 19 mostra a matriz das espumas C0%, C2%, C2,5% e C5%, respectivamente, sinterizadas sob a temperatura de 950°C.

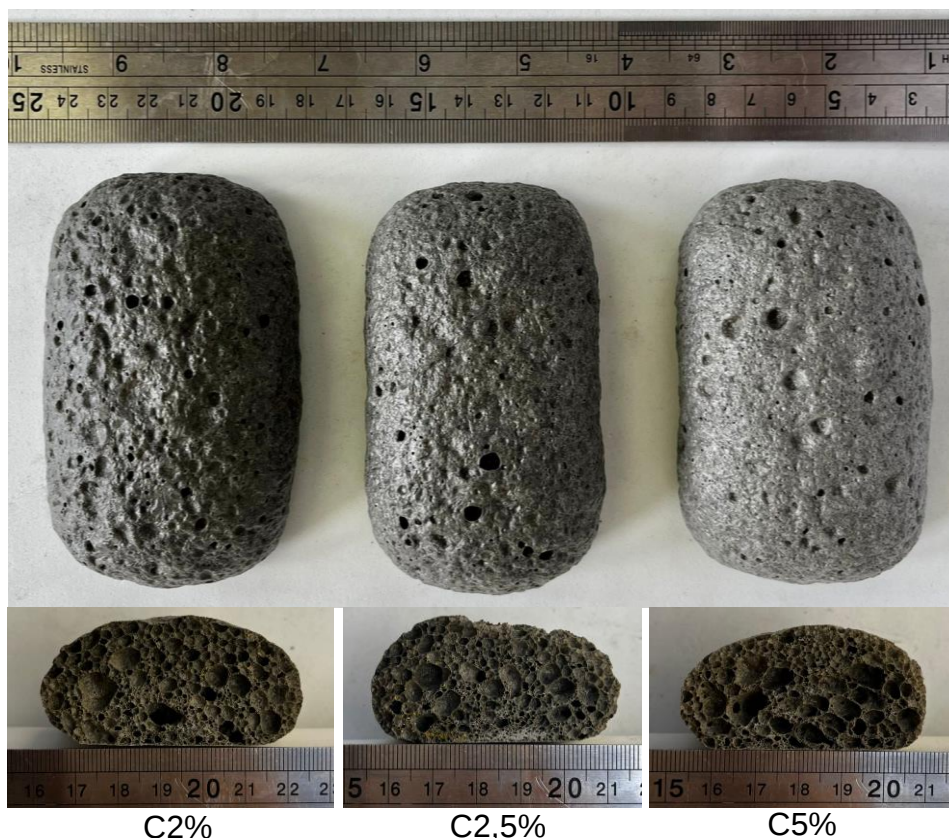
Figura 19 - Estrutura das espumas sinterizadas a 950 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao elevar a temperatura de sinterização para faixa dos 1000 °C, as amostras de espumas vítreas C2%, C2,5%, C5% apresentaram aumento de volume, o que levou uma formação porosa ao longo de toda a matriz do material. A amostra C0% vitrificou (fundiu) completamente, não sendo possível identificar a sua matriz. Inicialmente, todas as amostras apresentavam espessura média em torno de 8,76 mm. Após a sinterização sob temperatura de 1000 °C, a espessura média observada na parte central das amostras C2%, C2,5% e C5% foi de 30,49 mm, 30,32 mm e 32,42 mm, respectivamente. A Figura 20 mostra a matriz das espumas C2%, C2,5%, C5%, respectivamente, sinterizadas sob a temperatura de 1000 °C. Já a Figura 21 exhibe a espuma C0%, a qual fundiu por completo após a sinterização a 1000 °C.

Figura 20 - Estrutura das espumas sinterizadas a 1000 °C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Espuma C0% sinterizada a 1000 °C

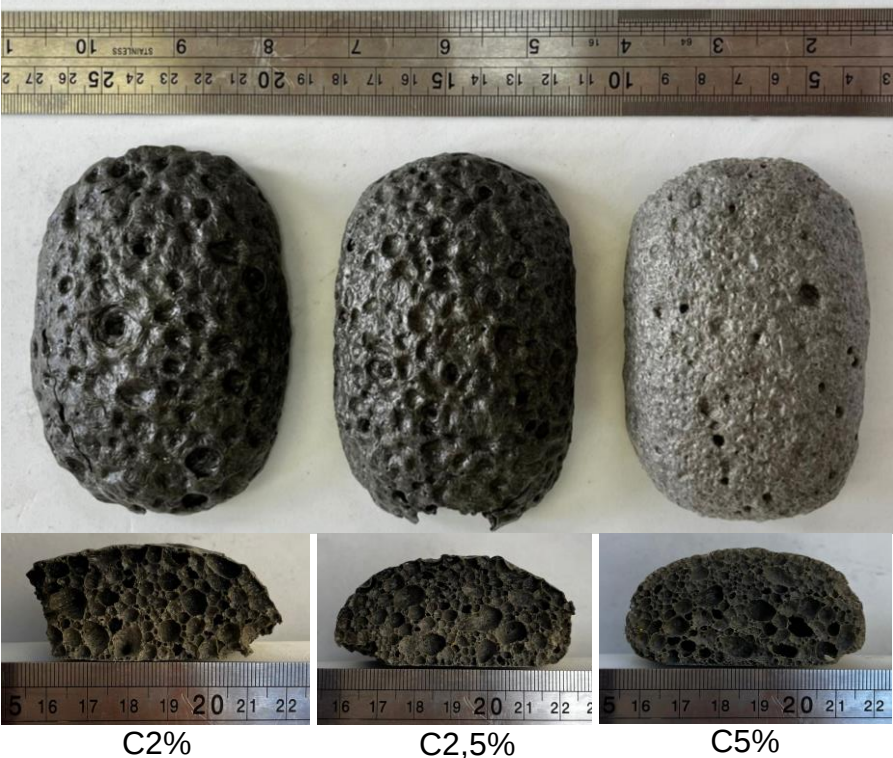


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando as amostras de espuma vítrea foram submetidas à sinterização sob uma faixa de temperatura ainda maior (1030 °C), além de ser notório o aumento de volume nas amostras C2%, C2,5%, C5%, também foi possível identificar, de forma visual, um aumento no tamanho de poros e um aspecto mais vitrificado (frágil) das matrizes, em comparação com as amostras sinterizadas a 1000 °C. Como a amostra C0% fundiu logo sob temperaturas mais baixas (1000 °C), considerou-se que comportamento semelhante aconteceria a 1030 °C, portanto a amostra não foi reproduzida. Inicialmente, todas as amostras apresentavam espessura média em torno de 8,76 mm. Após a sinterização sob temperatura de 1030 °C, a espessura média observada na parte central das amostras C2%, C2,5% e C5% foi de 26,48

mm, 30,73 mm e 33,31 mm, respectivamente. A Figura 22 mostra a matriz das espumas C2%, C2,5%, C5%, respectivamente, sinterizadas sob a temperatura de 1030 °C.

Figura 22 - Estrutura das espumas sinterizadas a 1030 °C.



C2%
Fonte: Elaborado pelo autor.

C2,5%

C5%

O Quadro 1 exibe, em resumo, a estrutura de todas as espumas vítreas produzidas, em relação ao teor de CaCO₃ e da temperatura de sinterização.

Quadro 1- Estrutura das espumas vítreas

CaCO₃ Temp.	0%	2%	2,5%	5%
950 °C				
1000 °C				
1030 °C	Não foi reproduzida			

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise morfológica revelou que as amostras de espumas vítreas C2%, C2,5% e C5% sinterizadas a 950 °C, não apresentaram as características estruturais desejadas, uma vez que não foi observada a formação de poros distribuídos ao longo de toda a matriz do material. De maneira semelhante, as espumas vítreas sem a adição de CaCO_3 (C0%), sinterizadas a 1000 °C e 1030 °C, também não atingiram a estruturação porosa final almejada, pois houve à fusão completa das amostras durante o processo de sinterização.

Portanto, para as análises subsequentes, foram excluídas as amostras de espumas vítreas que não apresentaram uma estruturação porosa final satisfatória do ponto de vista morfológico. Dessa forma, somente as espumas C0% sinterizada a 950 °C, C2%, C2,5% e C5% sinterizadas a 1000 °C e C2%, C2,5% e C5% sinterizadas a 1030 °C foram selecionadas para as avaliações nas propriedades físicas (densidade aparente) e mecânicas (resistência à compressão axial).

A densidade aparente das espumas vítreas, cuja estrutura porosa foi considerada satisfatória, foi determinada experimentalmente. Os valores médios e seus respectivos desvios-padrão, obtidos para a propriedade física de densidade aparente de cada uma das amostras analisadas, estão apresentados na Tabela 7.

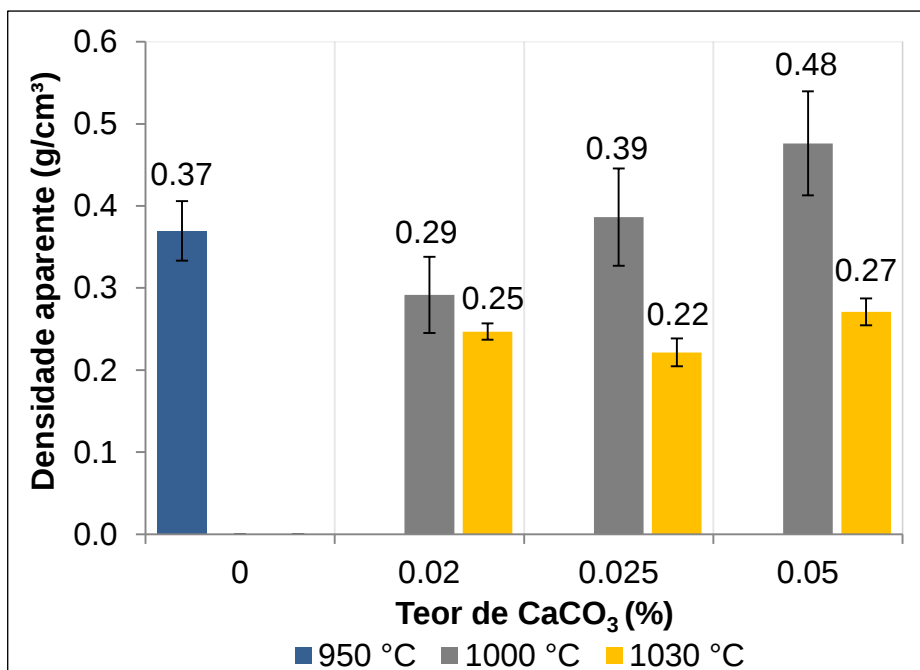
Tabela 7 - Densidade aparente média

Espuma	Temperatura (°C)	Densidade aparente (g/cm³)
C0%	950	0,37 ± 0,04
C2%	1000	0,29 ± 0,05
	1030	0,25 ± 0,01
C2,5%	1000	0,39 ± 0,06
	1030	0,22 ± 0,02
C5%	1000	0,48 ± 0,06
	1030	0,27 ± 0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de facilitar a interpretação dos resultados obtidos para a propriedade de densidade aparente, foi elaborado um gráfico (Figura 23) representando os valores médios dessa propriedade em função do teor de CaCO_3 e das temperaturas de sinterização avaliadas.

Figura 23 - Densidade aparente média das espumas vítreas



Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico exposto na Figura 23 é possível identificar que o aumento de temperatura de 1000 °C para 1030 °C proporcionou queda nos valores da propriedade de densidade aparente das espumas vítreas com qualquer um dos teores de CaCO_3 incorporados na composição; particularmente, é possível identificar que a propriedade decaiu cerca de 13,79%, 43,59% e 43,75% para as espumas C2%, C2,5% e C5%, respectivamente. De acordo com Scheffler e Colombo (2005), as espumas vítreas comerciais apresentam valores típicos de densidade aparente na faixa de 0,1 a 0,3 g/cm³. Os autores relatam, ainda, que geralmente quanto menos denso for o material, menor será sua condutividade térmica, o que se traduz em uma melhor capacidade de isolamento térmico. Seguindo a lógica descrita pelos autores, seria coerente escolhermos uma temperatura de sinterização mais alta (1030 °C) para produção da espuma vítrea ideal para aplicação como isolante térmico no qual se refere o estudo, entretanto, a análise na morfologia das espumas C2%, C2,5% e C5% sinterizadas em 1030°C permitiu identificar que as mesmas não só apresentaram um aspecto mais vitrificado, mas também uma matriz formada por poros maiores do que as espumas sinterizadas a 1000°C, o que possivelmente confere baixas resistências à compressão axial ao material, tornando as espumas mais frágeis e quebradiças. Conforme relatado na literatura, matrizes formadas por poros maiores e baixas densidades prejudicam a resistência à compressão das

espumas vítreas, tornando-as materiais mecanicamente frágeis e, em alguns casos, inviabilizando seu manuseio e aplicação (SCHEFFLER e COLOMBO, 2005; ZHU *et al.*, 2016).

A resistência à compressão axial das espumas vítreas foi determinada experimentalmente. Os valores médios e seus respectivos desvios-padrão, referentes a essa propriedade mecânica, estão apresentados na Tabela 8.

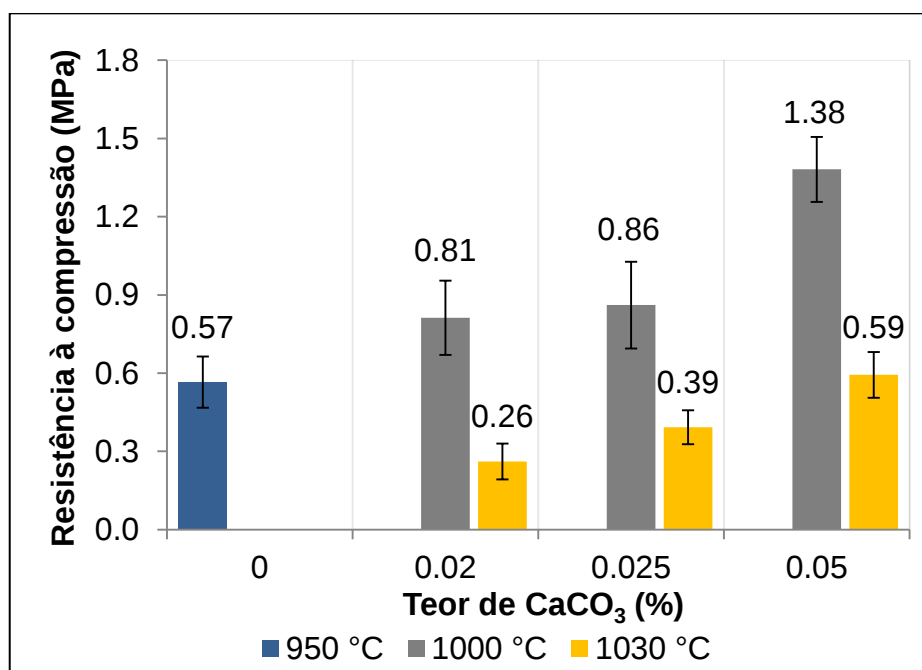
Tabela 8 - Resistência à compressão axial média

Espuma	Temperatura (°C)	Resistência à compressão (MPa)
C0%	950	$0,57 \pm 0,10$
C2%	1000	$0,81 \pm 0,14$
	1030	$0,26 \pm 0,07$
C2,5%	1000	$0,86 \pm 0,17$
	1030	$0,39 \pm 0,07$
C5%	1000	$1,38 \pm 0,12$
	1030	$0,59 \pm 0,09$

Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico (Figura 24) contendo os valores médios da propriedade mecânica de resistência à compressão axial em função do teor de CaCO_3 e das temperaturas de sinterização avaliadas foi plotado com objetivo de facilitar a interpretação de resultados.

Figura 24 - Resistência à compressão axial média das espumas vítreas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme exhibe o gráfico da Figura 24, a elevação da temperatura de sinterização de 1000 °C para 1030 °C promoveu queda na propriedade mecânica de resistência à compressão axial para as espumas vítreas com qualquer um dos teores de CaCO_3 incorporados na composição; particularmente, observou-se que a propriedade mecânica decaiu aproximadamente 67,9%, 54,65% e 57,25% para as espumas vítreas C2%, C2,5% e C5%, respectivamente. Conforme Scheffler e Colombo (2005), a resistência à compressão axial das espumas vítreas comerciais possuem valores compreendidos entre 0,4 a 6 MPa, dependendo do nível de porosidade. Sendo assim, a análise na propriedade mecânica mostrou que as espumas C2% e C2,5% sinterizadas a 1030 °C não atingiram a faixa de valores das espumas comerciais, o que inviabiliza sua aplicação. Embora a espuma C5% sinterizada a 1030 °C tenha apresentado resistência à compressão axial e densidade aparente dentro da faixa de valores das espumas vítreas comerciais, o material apresentou-se menos resistente e com densidade aparente semelhante quando comparado com a espuma C2% sinterizada a 1000 °C, além de conter um maior teor de CaCO_3 (5%) e necessitar uma maior temperatura de sinterização para sua produção (1030 °C), o que torna o material menos atrativo economicamente quando comparado com a espuma C2%, sinterizada a 1000 °C.

A espuma sem incorporação de CaCO_3 (C0%), sinterizada a 950 °C, além de apresentar densidade aparente em desacordo com a faixa de valores típicos para espumas vítreas comerciais (0,1 a 0,3 g/cm³), também apresentou resistência à compressão axial inferior a espuma C2% sinterizada a 1000 °C. Nesse sentido, foi definido que temperatura ótima de sinterização para produção da espuma vítrea foi a de 1000 °C. Quanto ao teor ideal de CaCO_3 , optou-se por 2%, uma vez que a espuma vítrea C2% apresentou densidade aparente (0,29 g/cm³) e resistência à compressão axial (0,81 MPa) em conformidade com os valores típicos encontrados na literatura para aplicações comerciais, enquanto as espumas com maior concentração de CaCO_3 (2,5% e 5%), também sinterizadas a 1000 °C, não apresentaram valores de densidade aparente dentro do intervalo das espumas comerciais.

Os valores das propriedades de densidade aparente e resistência à compressão axial encontrados para a espuma vítrea C2% sinterizada a 1000 °C estão em um patamar aceitável entre aqueles já relatados na literatura: Fernandes *et al.* (2023) encontraram valores de densidade aparente variando de 0,24 a 0,29 g/cm³

e resistência à compressão axial entre 0,7 a 2,5 MPa para espumas de vidro produzidas utilizando CaCO_3 como agente espumante (6%), CCA (16%) e vidro soda-cal (78%). A temperatura de sinterização foi a responsável pelas alternâncias de valores nas propriedades avaliadas; Wu *et al.* (2006) relataram em seus estudos densidades variando de 0,2 a 0,4 g/cm³ e resistência à compressão axial de 1,5 MPa para espumas vítreas produzidas utilizando SiC (2%) como agente espumante, cinzas de carvão (20%) e cacos de vidro soda-cal moídos (80%). Os autores relataram que a temperatura de sinterização ideal, que forneceu as melhores propriedades ao material, foi encontrada na faixa entre 1000 a 1050 °C; Por fim, Owoeye *et al.* (2020) encontraram densidades entre 0,34 e 0,46 g/cm³ e resistência à compressão axial de 0,9 a 2,7 MPa para espumas vítreas produzidas utilizando silicato de sódio (vidro de água, 15%) como agente espumante e pó de vidro reciclado (85%) em diferentes granulometrias. Os autores concluíram que as alternâncias de valores encontrados são resultantes das diferentes granulometrias do pó de vidro incorporado e das diferentes temperaturas de sinterização testadas. O Quadro 2 exibe, em resumo, as propriedades de densidade aparente e resistência à compressão encontradas pelos autores relatados no parágrafo.

Quadro 2 - Resumo das propriedades de densidade aparente e resistência à compressão axial relatadas na literatura

Autores	Densidade aparente (g/cm³)	Resistência à compressão (MPa)	Composição
Fernandes <i>et al.</i> (2023)	0,24 a 0,29	0,7 a 2,5	6% de CaCO_3 16% de CCA 78% de vidro soda-cal
Wu <i>et al.</i> (2006)	0,2 a 0,4	1,5	2% de SiC 20% de cinza de carvão 80% de vidro soda-cal
Owoeye <i>et al.</i> (2020)	0,34 e 0,46	0,9 a 2,7	15% de silicato de sódio 85% de vidro reciclado

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse sentido, observou-se que todas as espumas produzidas neste estudo, submetidas à avaliação da propriedade física de densidade aparente e à propriedade mecânica de resistência à compressão axial, apresentaram resultados

compatíveis com os relatados na literatura. A densidade aparente variou entre 0,22 g/cm³ e 0,48 g/cm³, enquanto a resistência à compressão variou de 0,26 MPa a 1,38 MPa, dependendo do teor de CaCO₃ incorporado e da temperatura de sinterização utilizada. No entanto, considerando uma série de fatores já descritos, a espuma C2%, sinterizada a 1000 °C mostrou-se a mais eficaz para dar continuidade ao estudo. Além dos motivos previamente mencionados, o uso de apenas 2% de CaCO₃ representa um menor custo de produção em comparação com os teores de 2,5% e 5%, também explorados nesse estudo, visto que o agente espumante (CaCO₃) é adquirido industrialmente, enquanto as demais matérias-primas são provenientes de resíduos agroindustriais. Ademais, ao comparar com o estudo realizado por Fernandes *et al.* (2023), observa-se que a espuma C2%, sinterizada a 1000 °C, apresenta vantagens econômicas e ambientais em termos de matérias-primas, pois, com uma menor concentração de CaCO₃ (2%) e maior quantidade de CCA (20%), foi possível obter espumas com propriedades de densidade aparente e resistência à compressão equivalentes.

4.3 Caracterização da espuma vítrea ideal

Conforme definido no item 4.2, a espuma vítrea C2%, sinterizada a 1000 °C, foi considerada ideal para dar seguimento ao estudo. Visando um aprofundamento na sua caracterização, foram investigadas as propriedades físicas de condutividade térmica, diâmetro médio dos poros e porosidade do material. Além disso, a microestrutura e composição das fases do material também foram alvos de avaliação. Os resultados encontrados estão apresentados no subitem 4.3.1 a 4.3.3.

4.3.1 Condutividade térmica

As placas utilizadas para a análise dessa propriedade estão representadas na Figura 25. Os valores médios e seus respectivos desvios-padrão, obtidos para a condutividade térmica em cada intervalo de temperatura avaliado (10 °C a 35 °C e 35 °C a 60 °C), estão apresentados na Tabela 9.

Figura 25 - Placas utilizadas na determinação da condutividade térmica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Condutividade térmica média

Intervalo de temperatura avaliado (°C)	Condutividade térmica (W/(m·K))
10 - 35	0,1195 ± 0,01
35 - 60	0,1270 ± 0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados de condutividade térmica apresentados na Tabela 8, referentes a ambos os intervalos de temperatura analisados, encontram-se dentro do limite para aplicações em isolamento térmico, considerando que de acordo com Owoeye *et al.* (2020), o requisito padrão para utilização de um material com essa finalidade é não ultrapassar o valor de 0,25 W/(m·K). Além disso, os valores de condutividades térmica obtidos estão em um patamar aceitável entre os diversos já relatados na literatura para espumas vítreas similares: El-Amir *et al.* (2021) relataram condutividade térmica de 0,17 W/(m·K) para espumas vítreas produzidas utilizando escória de alumínio (5%) como agente espumante e vidro reciclado do tipo soda-cal (95%); Teixeira *et al.* (2017) encontraram valores de condutividade térmica variando de 0,057 a 0,077 W/(m·K) para espumas vítreas produzidas a partir de conchas de ostras moídas (9%) como agente espumante e vidro reciclado proveniente de garrafas de vidro de múltiplas colorações (91%); Por sua vez, König, Petersen e Yue (2014) registraram condutividade térmica em torno de 0,050 a 0,053 W/(m·K) para espumas vítreas produzidas a partir de vidro reciclado (96%) e CaCO₃ (4%) como agente espumante. O Quadro 3 apresenta, em resumo, as condutividades térmicas encontradas pelos autores citados no parágrafo, com a finalidade de facilitar a visualização e comparação com os resultados obtidos no presente estudo.

Quadro 3 - Resumo das condutividades térmicas relatadas na literatura

Autores	Condutividade térmica (W/(m·K))	Composição
El-Amir <i>et al.</i> (2021)	0,17	5% de escória de alumínio 95% de vidro soda-cal
Teixeira <i>et al.</i> (2017)	0,057 a 0,077	9% de conchas 91% de vidro soda-cal
Konig, Petersen e Yue (2014)	0,050 a 0,053	4% de CaCO_3 96% de vidro reciclado

Fonte: Elaborado pelo autor.

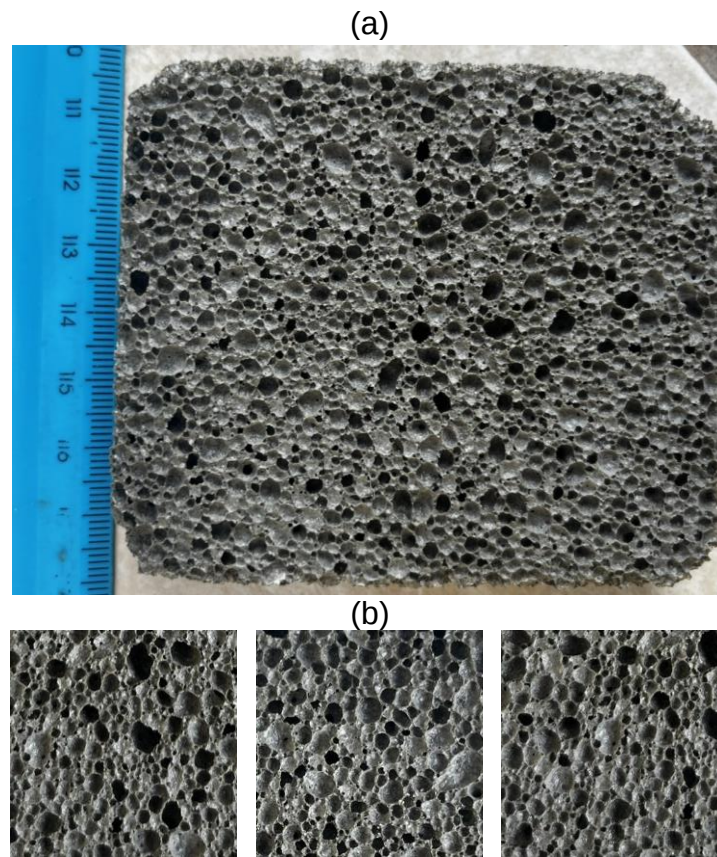
Dessa forma, os valores de condutividade térmica observados para a espuma vítrea C2%, sinterizada a 1000 °C, de 0,1195 W/(m·K) para faixa a térmica de 10 °C a 35 °C e de 0,1270 W/(m·K) para a faixa térmica de 35 °C a 60 °C, além de tornarem o material adequado para aplicações em isolamento térmico, conforme indicado por Owoeye *et al.* (2020), apresentaram-se semelhantes e, em alguns casos, até mesmo mais eficientes, quando comparados com algumas condutividades relatadas na literatura. Quando comparamos os resultados de condutividade térmica obtidos (0,1195 e 0,1270 W/(m·K)) com o valor registrado por El-Amir *et al.* (2021) (0,17 W/(m·K)), por exemplo, temos que a espuma produzida nesse estudo é mais eficiente na promoção do isolamento térmico, pois possui uma condutividade térmica menor.

4.3.2 Diâmetro médio dos poros e porosidade

Para a análise do diâmetro médio dos poros, a imagem da espuma vítrea apresentada na Figura 26-a foi utilizada para a calibração da escala no software ImageJ®. A Figura 26-b mostra as capturas das três amostras através das quais foi realizada a identificação e medição dos poros.

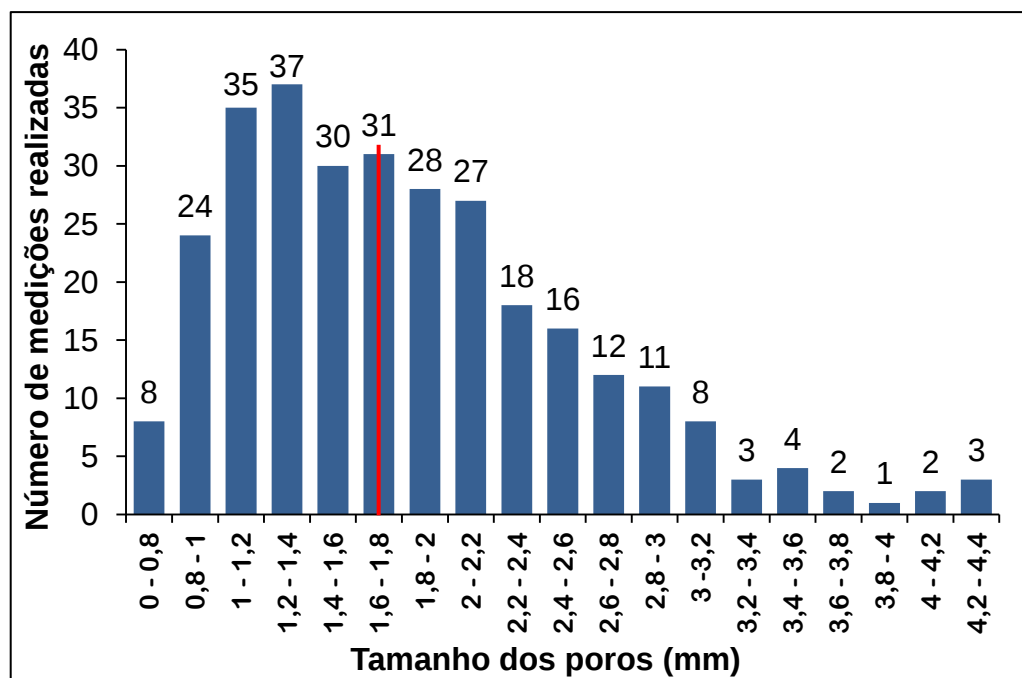
Após a análise, foi criado um histograma de distribuição de frequência do tamanho dos poros, em relação ao número de medições realizadas, com a finalidade de melhorar a interpretação dos resultados (Figura 27). A linha representada em vermelho no histograma expressa o valor mediano entre todas as medições, enquanto os números acima de cada coluna representam a incidência de poros com aquele intervalo de diâmetro.

Figura 26 - (a) imagem utilizada para calibração no ImageJ®; (b) Capturas utilizadas para medição dos poros



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Histograma da distribuição de tamanho dos poros



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o histograma apresentado na Figura 27, constatou-se que a distribuição de tamanho dos poros é assimétrica, com tendência para poros menores, onde há uma ocorrência mais acentuada de poros com diâmetros entre 0,8 a 2,2 mm. O valor do diâmetro médio dos poros encontrados para a espuma C2%, sinterizada a 1000°C, foi de $1,827 \pm 0,749$ mm. Contudo, por se tratar de uma distribuição assimétrica, torna-se mais interessante avaliar o diâmetro dos poros a partir do valor mediano entre as medições realizadas, o que indica 50% das ocorrências. No caso da análise realizada, a mediana encontra-se em 1,7 mm, o que representa que 50% dos poros do material estudado apresentam diâmetros inferiores a 1,7 mm.

Partindo para a análise da porosidade do material, tornou-se necessária, além da densidade aparente já apresentada no item 4.2 (0,29 g/cm³), a determinação da densidade teórica da combinação preparada para produção da espuma C2%, a qual nada mais é do que a combinação de matérias-primas (vidro + CCA + CaCO₃), nas proporções fixadas, que originaram o produto final. O valor da densidade teórica encontrado foi de 2,44 g/cm³. A porosidade da espuma C2% foi então estimada conforme descreve o subitem 3.2.2.4, sendo que o valor encontrado apontou uma porosidade aproximada de 88,1%, significando que 88,1% do volume total da espuma vítrea C2% é composta por espaços vazios (poros), enquanto apenas os 11,9% restantes são ocupados por material sólido. Alguns estudos observados na literatura mostram resultados semelhantes ao encontrado: Fernandes *et al.* (2019) relataram porosidade variando de 87% a 93% para espumas vítreas fabricadas com vidro soda-cal (78%), CCA (16%) e CaCO₃ (6%) como agente espumante; Da Silva *et al.* (2019) apontaram que espumas vítreas com porosidade de 86% podem ser obtidas quando vidro reciclado (90%), bórax (5%) e NaOH (5%) como agente espumante são combinados para sua produção; König, Petersen e Yue (2014) encontraram porosidade total em torno de 90% para espumas vítreas produzidas utilizando vidro reciclado (96%) e CaCO₃ (4%) como agente espumante; Por sua vez, El-Amir *et al.* (2021) mostraram que espumas com porosidade na ordem de 86% podem ser obtidas utilizando vidro reciclado do tipo soda-cal (95%) e escória de alumínio (5%) como agente espumante. O Quadro 4 expressa, em resumo, as porosidades relatadas pelos autores citados no parágrafo.

Quadro 4 - Resumo das porosidades relatadas na literatura

Autores	Porosidade (%)	Composição
Fernandes <i>et al.</i> (2019)	87 a 93	6% de CaCO_3 16% de CCA 78% de vidro soda-cal
Da Silva <i>et al.</i> (2019)	86	5% de bórax 5% de NaOH 90% de vidro reciclado
Konig, Petersen e Yue (2014)	90	4% de CaCO_3 96% de vidro reciclado
El-Amir <i>et al.</i> (2021)	86	5% de escória de alumínio 95% de vidro soda-cal

Fonte: Elaborado pelo autor.

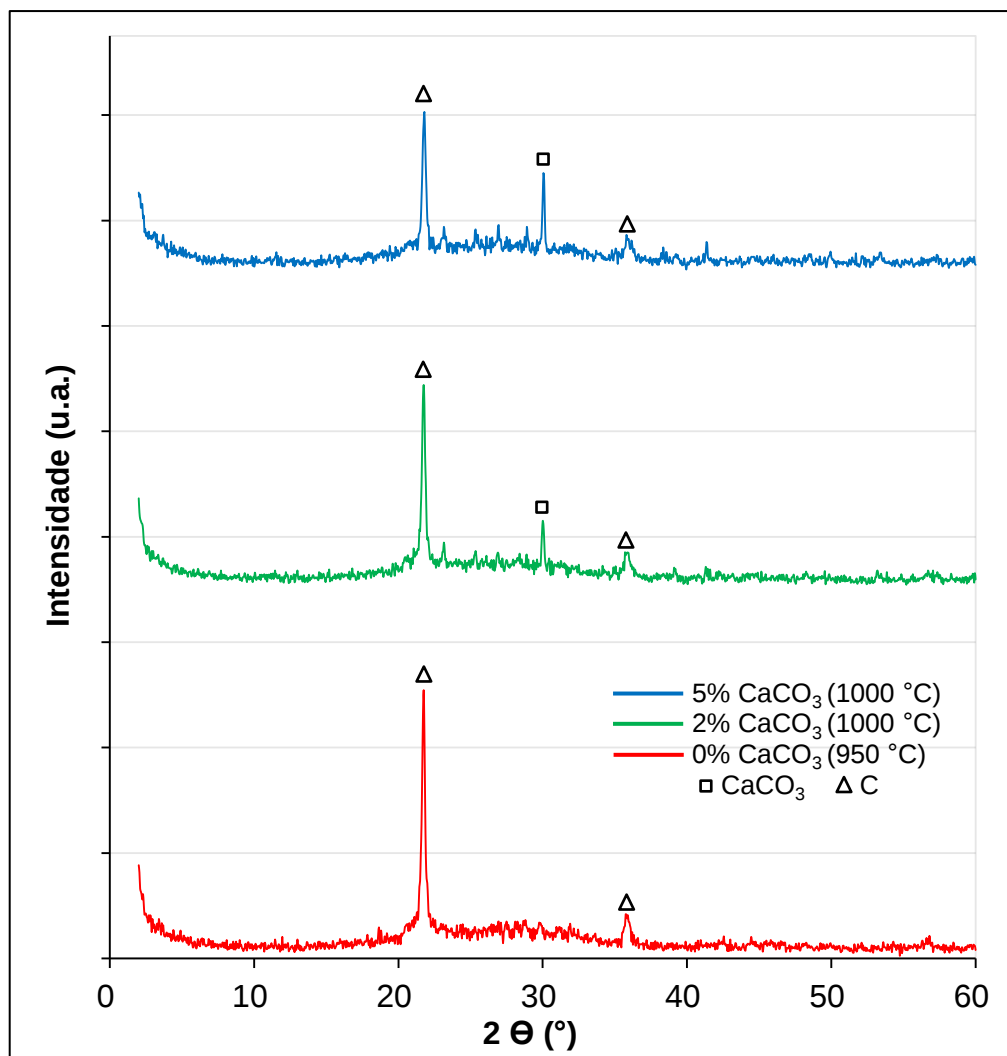
Sendo assim, a porosidade observada para a espuma C2%, sinterizada a 1000 °C, que apresentou o valor de 88,1%, está muito próxima aos resultados relatados na literatura. Quando se compara o resultado obtido com os valores típicos comerciais descritos por Scheffler e Colombo (2005), os quais indicam que o material deve apresentar uma porosidade compreendida entre 85% e 95%, percebe-se que a porosidade obtida encontra-se dentro do intervalo registrado pelos autores para a mesma propriedade. Tais fatores comprovam que a porosidade da espuma vítrea produzida neste estudo está de acordo com a literatura, evidenciando seu potencial para aplicação como isolante térmico.

4.3.3 Microestrutura e composição das fases

Para a análise DRX sobre a microestrutura e composição de fases das espumas vítreas, foram selecionadas três (3) amostras de espumas vítreas representativas, para fins de comparação. Em detalhes, a espuma C2%, sinterizada a 1000 °C, a espuma C5%, sinterizada a 1000 °C, e a espuma sem CaCO_3 , (C0%), sinterizada a 950 °C, foram analisadas. Os difratogramas correspondentes estão

representados na Figura 28. Avaliando os difratogramas, é possível perceber que as espumas vítreas produzidas são materiais predominantemente amorfos, conforme o esperado, devido ao pico largo e abrangente entre os ângulos de 20° e 40°. Contudo, é interessante destacar a existência de alguns picos bem definidos: principalmente, todas as amostras analisadas apresentam os picos relacionados com a cristobalita (C) em 21,8° e 36°, uma fase cristalina da sílica, principal componente da CCA (SHINOHARA e KOHYAMA, 2004). A cristalização parcial da CCA quando sinterizada sob altas temperaturas (acima de 800°C), é um fenômeno conhecido, conforme já relatado por Shinohara e Kohyama (2004). Ademais, é notório que quanto maior a concentração de CCA nas espumas, maior a formação desta fase cristalina. Além disso, é possível perceber nos gráficos das amostras C2% e C5% um pico em 30°, ausente na amostra C0%: este pico está relacionado com o CaCO_3 , o qual não deve ter sido transformado completamente em óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO_2) durante o processo de sinterização. De acordo com o estudo desenvolvido por Alencar *et al.* (2022), também foram encontrados picos de CaCO_3 residual após uma sinterização com tempo de permanência à temperatura de pico de duas (2) horas a 700 °C. Neste estudo, apesar da temperatura de sinterização ser muito maior (1000 °C), o tempo de permanência a temperatura de pico durante o processo de sinterização é bastante inferior (30 minutos). Além disso, as amostras neste trabalho foram compactadas, o que pode influenciar na completa decomposição do agente espumante (CaCO_3). É importante também ressaltar que, baseado na intensidade dos picos, a amostra C5% apresenta um teor de CaCO_3 residual maior, conforme esperado.

Figura 28 - Análise DRX

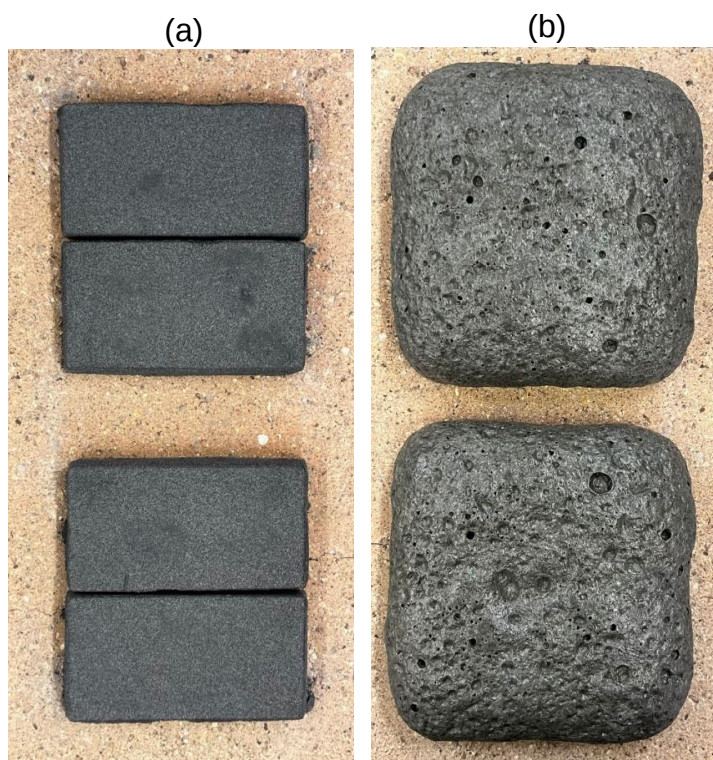


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Produção da placa de espuma vítrea

Uma placa de 1,32 m x 1,32 m foi produzida tendo como base a composição da espuma vítrea definida como ideal para dar seguimento ao estudo (C2% sinterizada a 1000 °C). Visando a simplificação do processo de colagem necessário para a estruturação final da placa, os espécimes que deram origem as espumas vítreas foram posicionados em pares, isto é, dispostos lado a lado no interior do forno (Figura 29-a). Dessa forma, durante o processo de sinterização, ocorreu sua união natural, resultando em espumas vítreas de maiores dimensões (Figura 29-b).

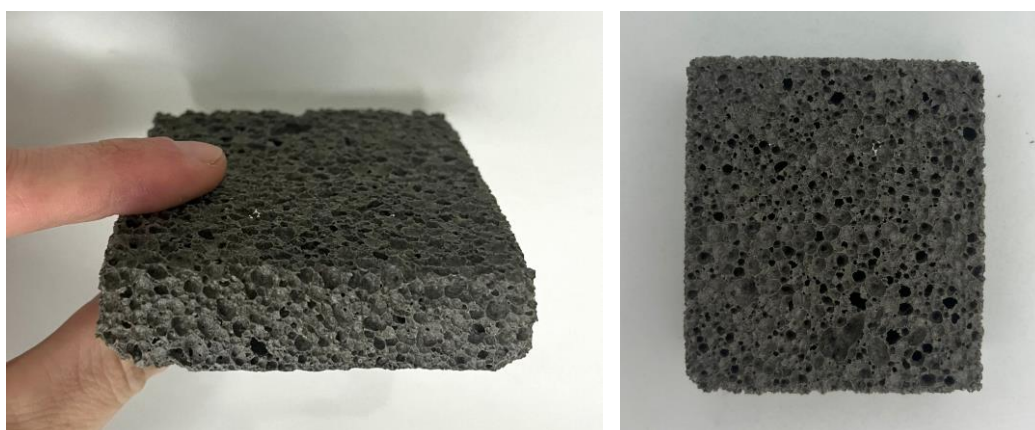
Figura 29 - (a) Espécimes que originaram as espumas vítreas; (b) Espumas vítreas resultantes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As espumas vítreas resultantes foram, então, regularizadas até atingirem espessura de aproximadamente 20 mm, conforme representado na Figura 30.

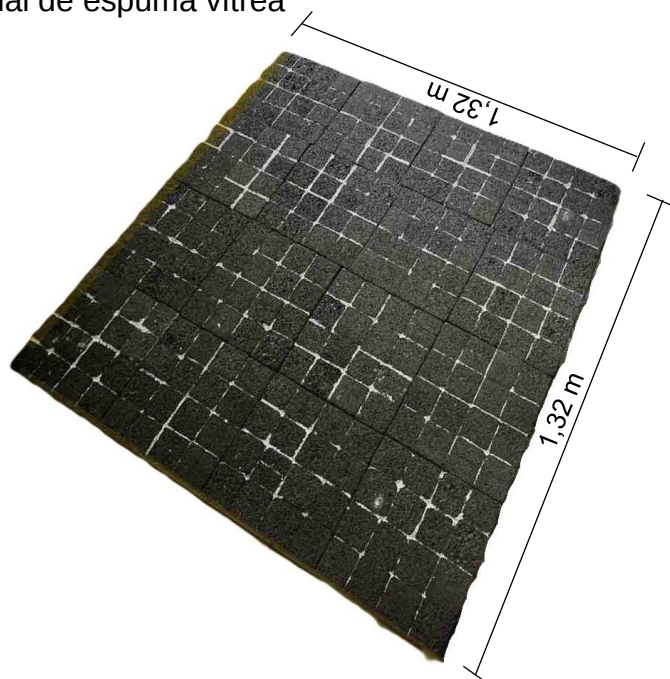
Figura 30 - Espumas vítreas regularizadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, todas as espumas foram unidas, de maneira a formar a placa final destinada à aplicação como revestimento de forro (Figura 31).

Figura 31 - Placa final de espuma vítrea



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Instalação dos componentes do forro e dos sensores responsáveis pela coleta de dados

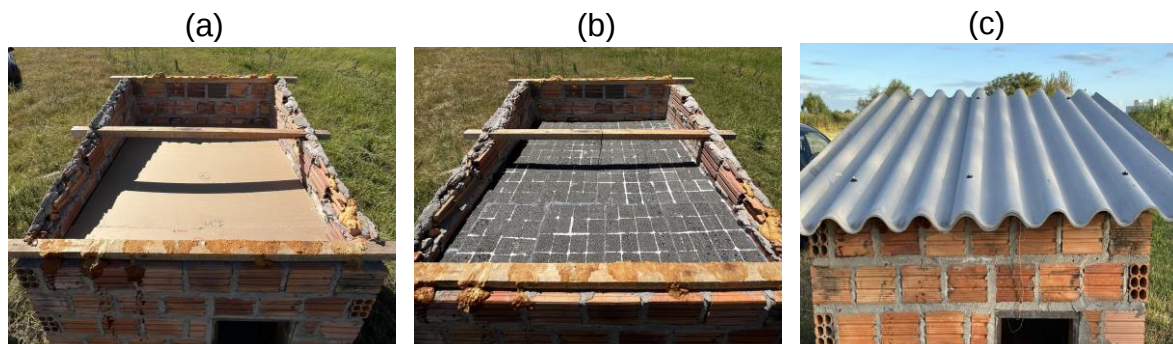
A placa de espuma vítrea, assim como o forro de gesso e as telhas de fibrocimento foram instaladas nos protótipos de alvenaria estudados. A Figura 32 mostra a sequência de instalação dos componentes: forro de gesso (Figura 32-a) e telhas de fibrocimento (Figura 32-b) no protótipo referência. A Figura 33 exibe a sequência de instalação dos componentes: forro de gesso (Figura 33-a), placa de espuma vítrea (Figura 33-b) e telhas de fibrocimento (Figura 33-c) no protótipo de forro revestido com espuma vítrea.

Figura 32 – Sequência de instalação no protótipo referência, onde: (a) Forro de gesso; (b) Telha de fibrocimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Sequência de instalação no protótipo de forro revestido com espuma vítrea, onde: (a) Forro de gesso; (b) Placa de espuma vítrea; (c) Telha de fibrocimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 exibe o forro de gesso após instalação, visto da parte interna de um (1) dos protótipos. Em relação à perspectiva interna, tanto o protótipo referência, quanto o protótipo de forro revestido com espuma vítrea apresentam-se equivalentes. A altura do pé-direito, medida da superfície do piso até a superfície do forro, foi de um metro e dez centímetros (1,10 cm) em ambos os protótipos.

Figura 34 - Vista interna do forro de gesso

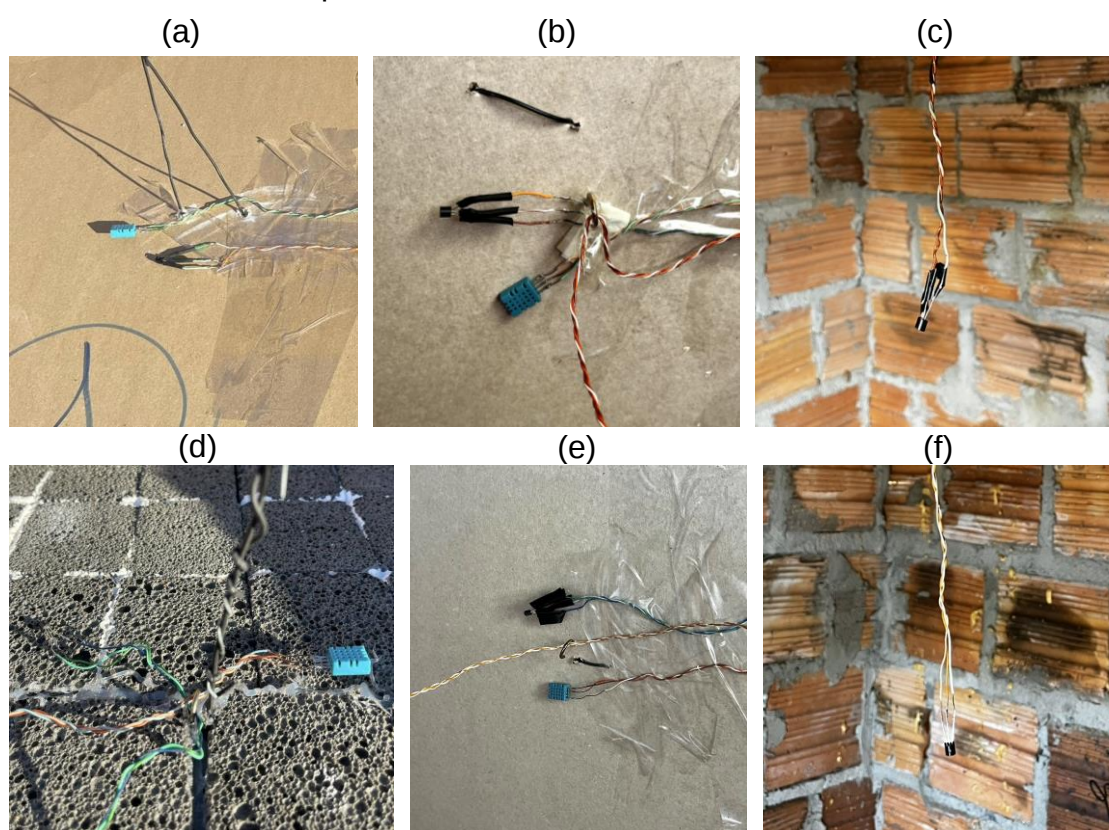


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os componentes do forro já instalados, os sensores responsáveis pela coleta de dados foram posicionados. A Figura 35 exibe os sensores posicionados nos protótipos, sendo que a Figura 35-a, 35-b e 35-c mostra os sensores instalados no protótipo referência (sem revestimento de espuma vítrea), na parte superior do

forro (temperatura e umidade), inferior do forro (temperatura e umidade) e no centro interno (temperatura), respectivamente, enquanto a Figura 35-d, 35-e e 35-f exibe os sensores instalados no protótipo de forro revestido com espuma vítrea, na parte superior do forro (temperatura e umidade), inferior do forro (temperatura e umidade) e no centro interno (temperatura), respectivamente.

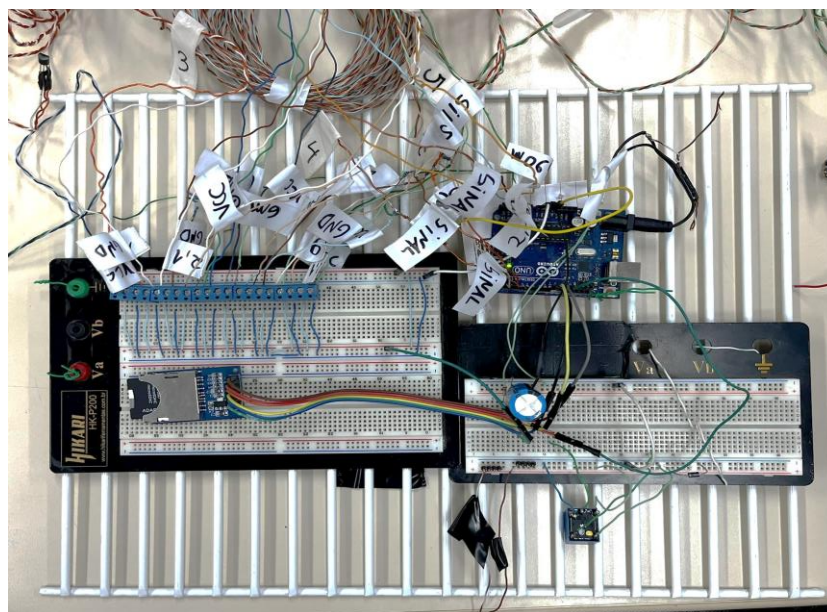
Figura 35 - Sensores posicionados nos protótipos, onde: (a), (b) e (c) sensores posicionados no protótipo referência; (d), (e) e (f) sensores posicionados no protótipo de forro revestido com espuma vítrea.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os sensores apresentados na Figura 35 foram interligados ao sistema desenvolvido e programado para a coleta de dados referentes à temperatura e umidade. O sistema, projetado para receber os sinais dos sensores, bem como para coletar e armazenar os dados em um cartão de memória SD, está apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Sistema projetado para coletar os dados de temperatura e umidade



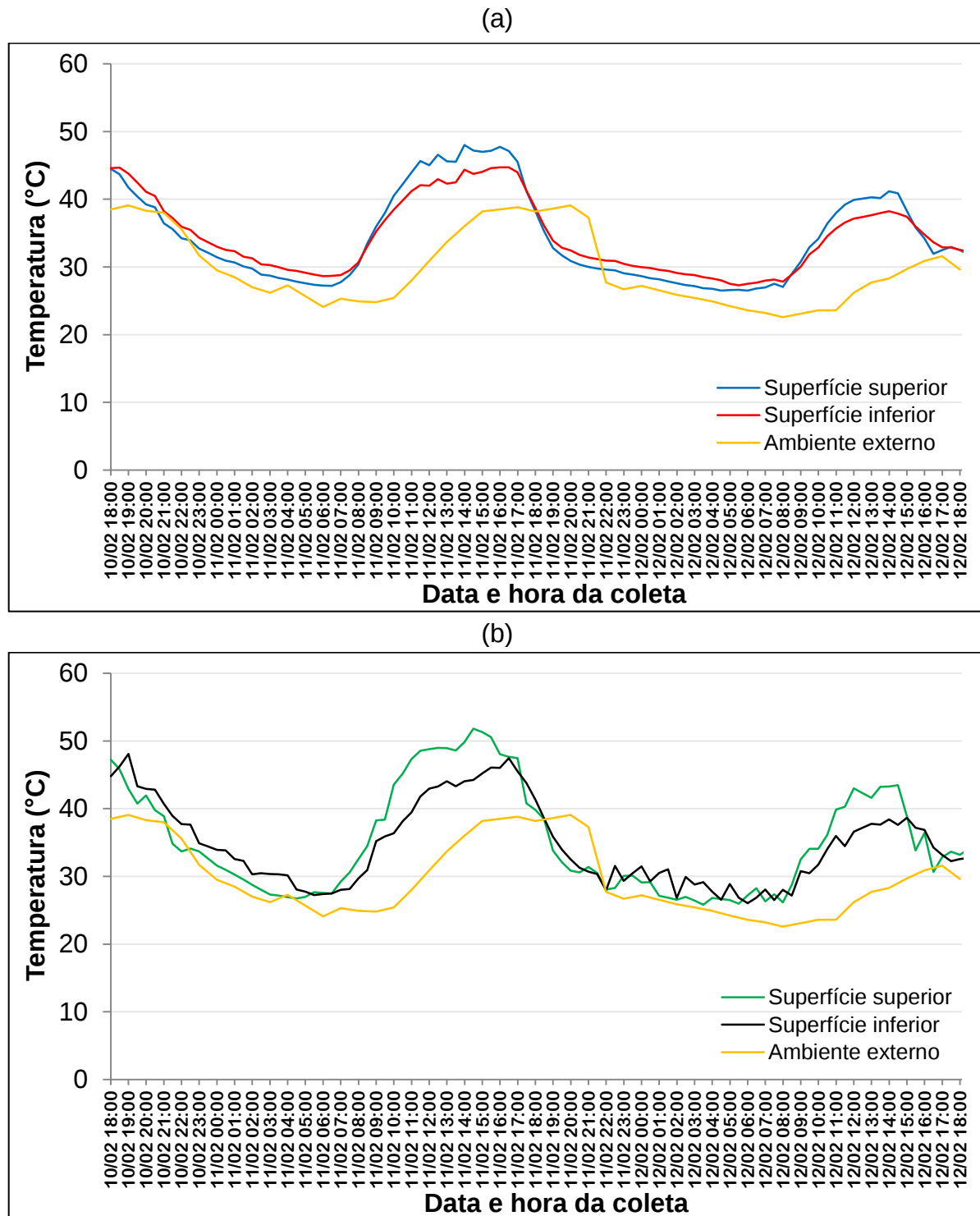
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Análise da capacidade de isolamento térmico da espuma vítrea aplicada

A análise na qual se refere esse subitem foi realizada posteriormente ao processo de correção dos dados coletados referentes à temperatura e umidade.

Os gráficos apresentados na Figura 37 exibem os resultados observados referentes à variação da temperatura ao longo do tempo (dia e hora) em que a coleta foi realizada. A Figura 37-a exibe as temperaturas observadas, tanto na superfície superior, quanto na inferior, relacionadas ao protótipo referência (sem o forro revestido com espuma vítrea), enquanto a Figura 37-b exibe as temperaturas observadas, também em ambas as superfícies superior e inferior, referentes ao protótipo de forro revestido com espuma vítrea. Além disso, ambos os gráficos apresentam a variação da temperatura externa em relação ao tempo, ou seja, do ambiente no qual os protótipos estão inseridos, de acordo com dados obtidos da estação meteorológica utilizada como referência, localizada no Instituto Federal Farroupilha, campus Alegrete-RS.

Figura 37 - Variação da temperatura ao longo do tempo, onde: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo de forno revestido com espuma vítrea.

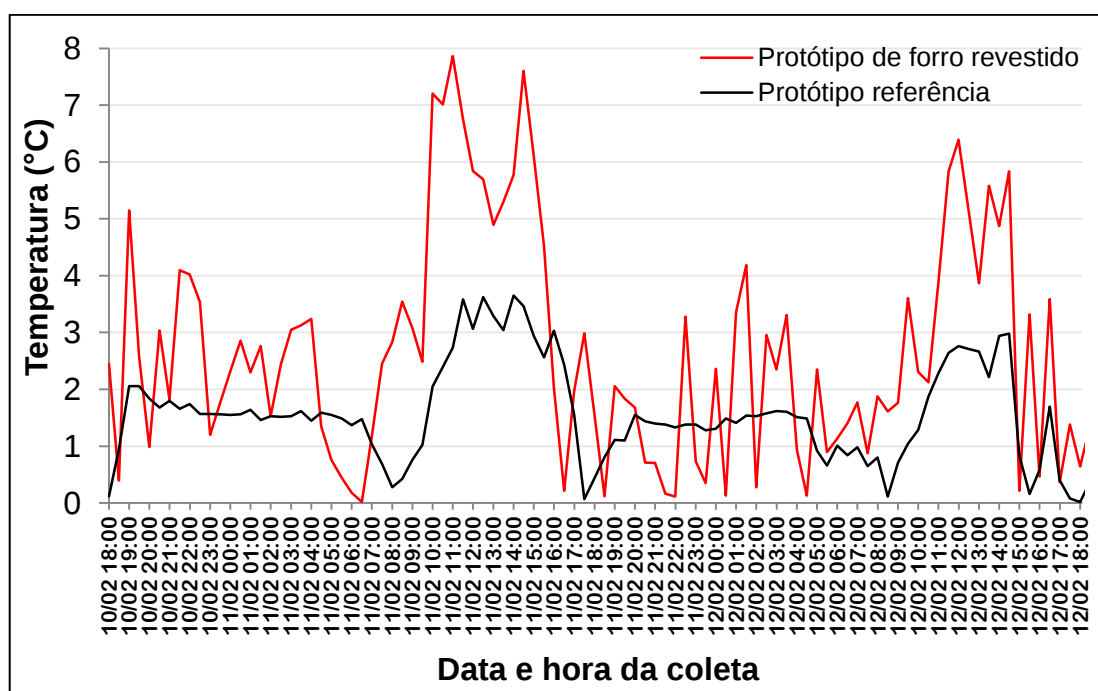


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os gráficos da Figura 37, constatou-se que, a superfície superior do forno revestido com espuma vítrea apresentou temperaturas mais elevadas em comparação a do forno referência, evidenciado especialmente nos

horários do dia em que a temperatura é mais elevada (durante o dia), enquanto a temperatura inferior do forro revestido apresentou-se, na maior parte do tempo, igual ou menor a temperatura do forro referência. O comportamento observado pode estar associado ao fato de a espuma vítrea atuar como material de isolamento térmico, dificultando a transferência de calor para o interior. Sendo assim, as trocas de calor ocorreram de forma mais lenta no forro revestido com espuma vítrea em comparação ao forro de referência, o que fez com que o calor retido entre a telha e o forro revestido permanecesse enclausurado por um período mais longo, elevando a temperatura nessa região. Já quando olhamos para o forro sem o revestimento (referência), a troca de calor tende a ocorrer forma mais rápida, devido à ausência de um material que dificulte a transferência de calor para superfície inferior do forro, o que reduz a temperatura compreendida entre os elementos (telha e forro). Ademais, é perceptível nos gráficos expostos na Figura 37-a e 37-b que, a diferença de temperaturas entre a superfície superior e inferior do forro revestido com espuma vítrea é mais expressiva em comparação a do forro sem o revestimento (referência). O gráfico apresentado na Figura 38 exhibe, de forma particular, as diferenças de temperaturas entre as superfícies superior e inferior dos forros envolvidos na análise.

Figura 38 - Diferenças de temperatura entre superfícies do forro



Fonte: Elaborado pelo autor.

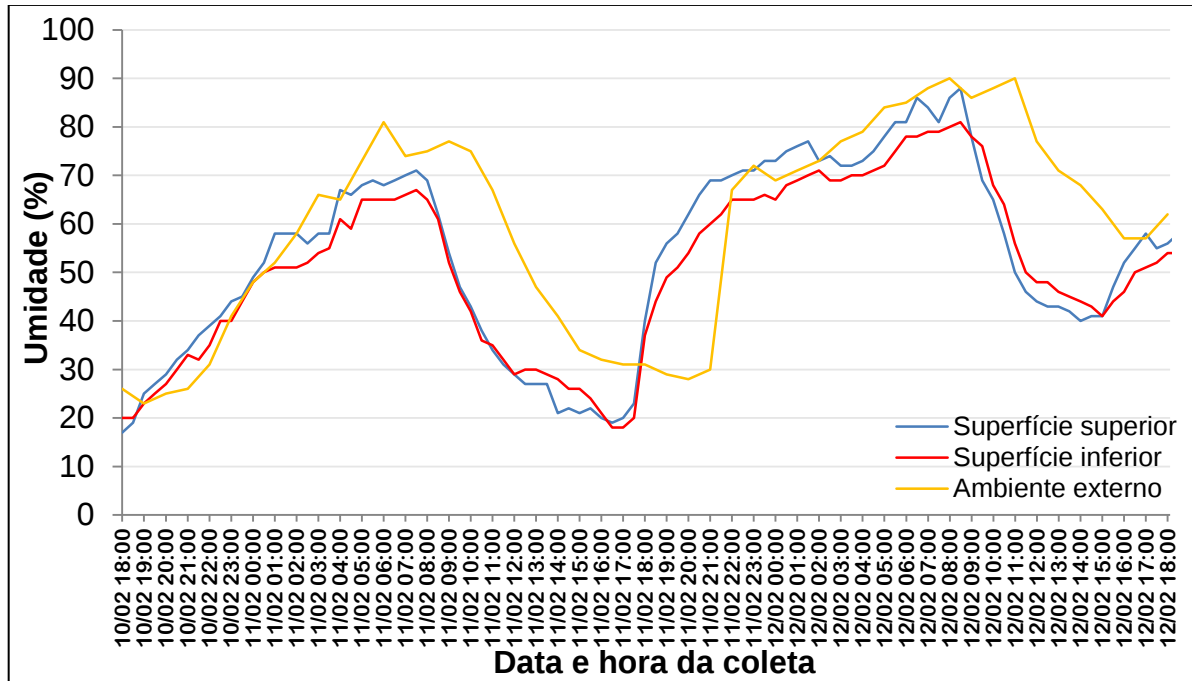
Conforme observado no gráfico da Figura 38, as diferenças de temperatura entre a superfície superior e inferior do forro revestido com espuma vítrea apresentaram-se maiores em comparação com o forro referência, durante a maior parte do intervalo de tempo analisado. A diferença mencionada torna-se ainda mais evidente nos períodos de temperatura mais elevada (durante o dia). Analisando a linha do gráfico referente ao forro revestido com espuma vítrea, tem-se que a maior diferença de temperatura foi registrada no dia 11/02, às 11h00min, sendo essa em torno de 7,9 °C. Agora, olhando para a linha referente ao forro referência, tem-se que a diferença de temperatura no dia 11/02 às 11h00min foi cerca de 2,7 °C, o que indica que o forro revestido com espuma vítrea apresentou uma diferença de temperatura entre a superfície superior e inferior cerca de 192,59% (5,2 °C) maior do que a registrada no forro referência. Aplicando a mesma análise à maior temperatura registrada no protótipo de forro referência, tem-se que a maior diferença de temperatura registrada entre a superfície superior e inferior do forro foi no dia 11/02 às 14h00min (3,7 °C), enquanto no dia e horário equivalente foi registrada uma diferença de temperatura em torno de 5,8 °C no forro revestido com espuma vítrea. Nesse caso, o forro revestido com espuma vítrea apresentou uma diferença de temperatura cerca de 56,76% (2,1 °C) superior à do forro referência. Nesse sentido, a análise descrita comprova que a espuma vítrea aplicada como revestimento do forro de gesso nesse estudo está atuando como material de isolamento térmico, uma vez que, de acordo com ADITYA *et al.* (2017), a efetividade de isolamento térmico de um material depende, sobretudo, da sua capacidade de retardar a transferência de calor, fazendo com que a diferença de temperatura entre os ambientes sejam maiores. Nesse caso, as diferenças de temperaturas registradas entre as superfícies superior e inferior foram maiores no forro revestido com espuma vítrea em comparação com o forro referência, o que indica que o material desempenhou um papel eficaz no retardamento da transferência de calor entre as superfícies.

Os gráficos apresentados na Figura 39 exibem os resultados observados referentes à variação da umidade ao longo do tempo (dia e hora) em que a coleta foi realizada. A Figura 39-a exibe as umidades, tanto na superfície superior, quanto na inferior, relacionadas ao protótipo referência (sem o forro revestido com espuma vítrea), enquanto a Figura 39-b exibe as temperaturas observadas, também em ambas as superfícies superior e inferior, referentes ao protótipo de forro revestido com espuma vítrea. Além disso, ambos os gráficos apresentam a variação da

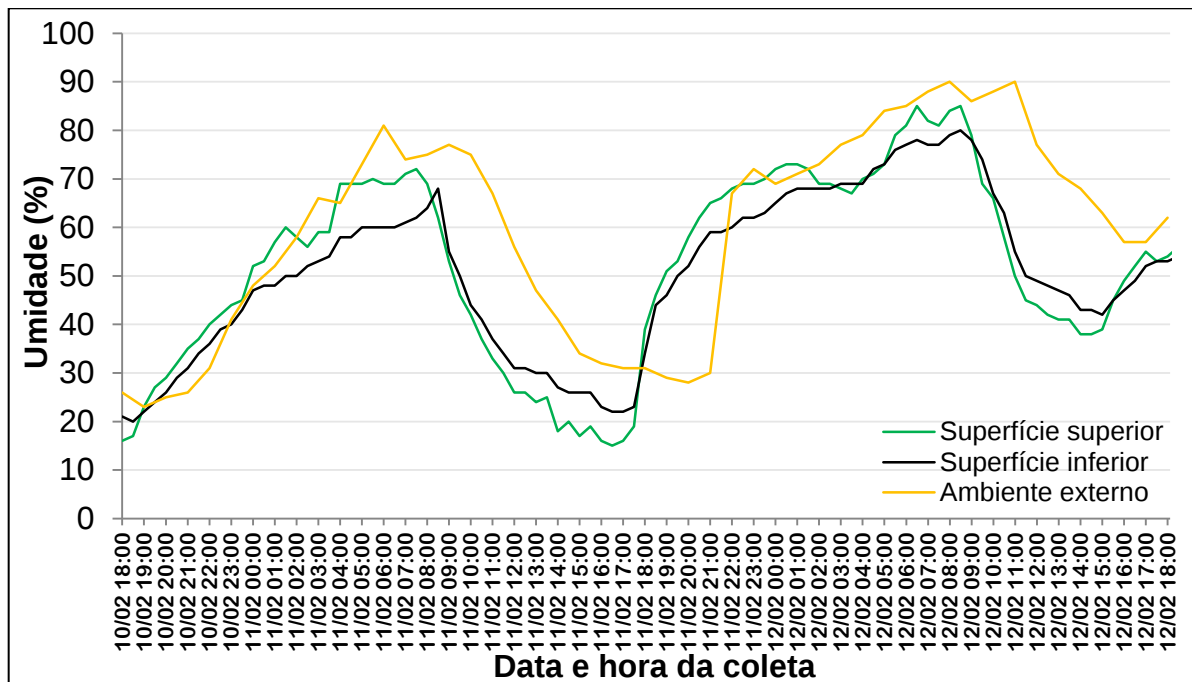
umidade externa em relação ao tempo, ou seja, do ambiente no qual os protótipos estão inseridos, de acordo com dados obtidos da estação meteorológica utilizada como referência, localizada no Instituto Federal Farroupilha, campus Alegrete-RS.

Figura 39 - Variação da umidade em função do tempo, onde: (a) Protótipo referência; (b) Protótipo de forro revestido com espuma vítrea.

(a)



(b)

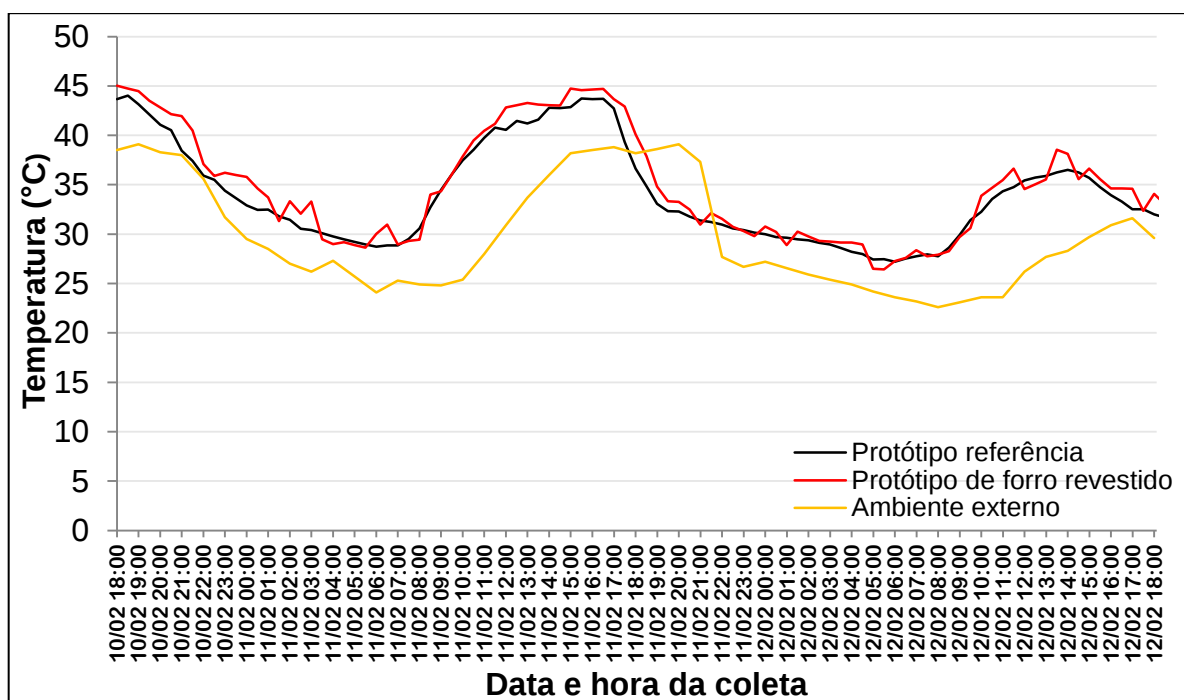


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os gráficos da Figura 39, observou-se que a umidade na superfície superior e inferior, tanto do protótipo referência, quanto do protótipo revestido com espuma vítrea não apresentou grandes variações ao longo do período de coleta, mostrando comportamento semelhante. Para analisar a umidade com maior precisão, estima-se que a coleta de dados deva ser realizada por um período mais longo, especialmente abrangendo dias de precipitação chuvosa.

Por fim, foi realizada a análise das temperaturas coletadas no centro de cada protótipo envolvido no estudo. A Figura 40 exibe o gráfico da variação das temperaturas obtidas no centro interno de ambos os protótipos ao longo do período em que a coleta foi realizada. Além disso, o gráfico apresenta a variação da temperatura externa em relação ao tempo, ou seja, do ambiente no qual os protótipos estão inseridos, de acordo com dados obtidos da estação meteorológica utilizada como referência, localizada no Instituto Federal Farroupilha, campus Alegrete-RS.

Figura 40 - Variação da temperatura no centro interno ao longo do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico da Figura 40, constatou-se que não houve variações expressivas na temperatura coletada no centro de ambos os protótipos. Entretanto, observou-se que as temperaturas coletadas são, na maior parte do período em que a coleta foi realizada, superiores às temperaturas do ambiente externo de acordo

com os dados coletados da estação meteorológica. O fato descrito pode estar associado às dimensões dos protótipos estudados, os quais embora foram construídos para simular uma situação real, possuem dimensões muito menores do que uma edificação real, além de possuir portas e janelas vedadas ao ambiente externo, o que contribui para o abafamento interno e consequente aumento de temperatura. Além disso, convém adicionar que no período em que a coleta foi realizada, as temperaturas chegaram à marca dos 40 °C na região do estudo, o que contribuiu ainda mais para o abafamento e consequente aumento da temperatura interna nos protótipos estudados. Para fins de análise mais detalhada, novas coletas devem ser realizadas, abrangendo não só períodos maiores, mas também diferentes estações do ano, com finalidade de averiguar o comportamento do forro revestido conforme as variações climáticas.

Contudo, os resultados preliminares apresentados, particularmente expressos nos gráficos da Figura 37 e Figura 38, evidenciam que as espumas vítreas produzidas neste estudo possuem potencial prático como materiais isolantes térmicos, apresentando desempenho satisfatório quando aplicadas em edificações e contribuindo para a melhoria do conforto térmico de seus usuários.

5 CONCLUSÃO

Este estudo investigou a produção de espumas vítreas sustentáveis a partir de combinações contendo, em massa, 80% de resíduos de vidro reciclado, 20% de CCA como aditivo e diferentes teores de CaCO_3 como agente espumante. Além disso, o estudo avaliou a capacidade de isolamento térmico da espuma vítrea definida como mais eficiente, quando aplicada como revestimento de forro de gesso em protótipos construídos em alvenaria de tijolos cerâmicos, utilizando telha de fibrocimento na cobertura.

A caracterização do vidro reciclado e da CCA utilizados na produção das espumas mostrou que as partículas de ambos os materiais apresentavam granulometrias inferiores a 0,3 mm, entretanto, o vidro reciclado possuía maior porcentagem de finos do que a CCA. Enquanto 51,62% dos grãos do vidro reciclado possuíam granulometrias inferiores a 0,09 mm, apenas 21,38% dos grãos da CCA apresentava granulometrias menores do que a citada. A composição química dos materiais empregado na produção das espumas mostrou que tanto o vidro reciclado, quanto a CCA são compostos, em sua maior parte, por sílica. A CCA apresentou uma concentração, em massa, de 89,454% de sílica, enquanto o vidro reciclado 67,69%.

Dentre as diversas combinações investigadas para a produção das espumas vítreas neste estudo, a mais eficiente na formação do produto final foi a composta por 98% de vidro reciclado e CCA, nas proporções de 80% e 20%, respectivamente, com 2% de CaCO_3 como agente espumante. As condições ótimas para a produção do material foram alcançadas com uma temperatura de sinterização de 1000 °C, uma taxa de aquecimento de 5 °C/min e um tempo de permanência de 30 minutos na temperatura de pico.

As propriedades físicas da espuma vítrea definida como mais eficiente neste estudo apresentaram valores de densidade aparente de $0,29 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, condutividade térmica variando de $0,1195 \pm 0,0069 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a $0,1270 \pm 0,0101 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, diâmetro médio dos poros de $1,827 \pm 0,749 \text{ mm}$ e porosidade de 88,1%. No que diz respeito à propriedade mecânica, a resistência à compressão axial do material apresentou valor de $0,81 \pm 0,14 \text{ MPa}$. Os resultados relatados para as propriedades investigadas estão de acordo com a faixa de valores típicos de espumas vítreas comerciais conforme a literatura consultada.

A espuma vítrea definida como mais eficiente foi reproduzida de forma a otimizar a construção de uma placa na qual foi aplicada como revestimento de forro de gesso em um protótipo construído em alvenaria de tijolos cerâmicos, com a finalidade de promover isolamento térmico. Um segundo protótipo, com características equivalentes, foi utilizado como referência, para a avaliação de dados relativos à temperatura e umidade. Constatou-se que a espuma vítrea aplicada como revestimento de forro de gesso contribuiu para o retardamento da transferência de calor entre as superfícies superior e inferior do forro aplicado, de modo que as diferenças de temperaturas entre as superfícies do forro revestido apresentaram-se mais expressivas ao longo da maior parte do período analisado quando equiparadas ao forro referência. A umidade, pelo fato de apresentar menores variações em relação à temperatura, não apresentou variações expressivas entre as superfícies do forro revestido com espuma vítrea e as superfícies do forro utilizado como referência no período de análise.

Nesse sentido, conclui-se que espumas vítreas com boas propriedades para aplicações em isolamento térmico podem ser produzidas através de resíduos de vidro reciclado, CCA como aditivo e CaCO_3 industrial como agente espumante, contribuindo com o reaproveitamento e a consequente redução do descarte desses resíduos em aterros. Além disso, a aplicação desse material em isolamentos térmicos visa reduzir o consumo de energia elétrica para atingir o conforto térmico no interior das edificações, uma vez que o material aplicado tende a retardar a transferência de calor entre os ambientes, mitigando assim a demanda por energia elétrica. Os fatores relacionados à produção e aplicação das espumas vítreas descritos acarretam na redução de danos ambientais, fomentando construções mais sustentáveis e colaborando para a preservação dos recursos naturais, ao mesmo tempo em que promovem a eficiência energética e melhoram o conforto térmico nas edificações.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do estudo realizado, verificou-se algumas lacunas que necessitam serem preenchidas. Assim, como sugestões para trabalhos futuros, podem-se citar:

- Aumentar o período de coleta de dados para obter um maior número de informações, abrangendo diferentes estações do ano e permitindo a avaliação da capacidade de isolamento térmico do forro revestido ao longo desse período.
- Avaliar as espumas vítreas produzidas nesse estudo, quando aplicadas com a finalidade de promover isolamento acústico.
- Avaliar a capacidade de isolamento térmico das espumas vítreas produzidas neste estudo, quando aplicadas como revestimento de outros tipos de forro, como PVC, madeira, etc.
- Avaliar a capacidade de isolamento térmico das espumas vítreas produzidas neste estudo, quando aplicadas como revestimento de forro de gesso, utilizando outros tipos de telhas como cobertura do protótipo, como de aluzinco, cerâmica, ecológica, etc.
- Avaliar as espumas vítreas produzidas nesse estudo, quando aplicada como painéis de isolamento interno (de divisória).
- Otimizar a produção das espuma vítreas, de forma a produzir placas de maiores dimensões, sem a necessidade de realizar emendas.

REFERÊNCIAS

- ADAWAY, Matthew; WANG, YJEJOSE. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 14, n. 1, p. 116-122, 2015.
- ADESINA, Adeyemi. Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. **Environmental Challenges**, v. 1, p. 100004, 2020.
- ADITYA, Lisa *et al.* A review on insulation materials for energy conservation in buildings. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 73, p. 1352-1365, 2017.
- AECweb. **Telha de fibrocimento reduz a condutividade térmica e oferece conforto**. 2016. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/telha-de-fibrocimento-reduz-a-condutividade-termica-e-oferece-conforto/13099>. Acesso em: 15 de dez. de 2024.
- AHMAD, Mushtaq *et al.* Potential use of recycled materials on rooftops to improve thermal comfort in sustainable building construction projects. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, p. 1014473, 2022.
- AHMAD, Mushtaq *et al.* State of the art compendium of macro and micro energies. **Advances in Science and Technology. Research Journal**, v. 13, n. 1, p. 88-109, 2019.
- ALENCAR, Angélica Oliveira *et al.* Síntese e Caracterização Físico-Química do Biomaterial CaO Obtido de Cascas de Ovos de Galinha. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e45311830807-e45311830807, 2022.
- AL-HOMOUD, Mohammad S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and environment**, v. 40, n. 3, p. 353-366, 2005.
- AMIN, Muhammad Nasir *et al.* Prediction model for rice husk ash concrete using AI approach: Boosting and bagging algorithms. In: **Structures**. Elsevier, p. 745-757, 2023.
- ANTÓNIO, Julieta *et al.* Application of rice husk in the development of new composite boards. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 432-439, 2018.
- ARRIAGADA, Cristina; NAVARRETE, Ivan; LOPEZ, Mauricio. Understanding the effect of porosity on the mechanical and thermal performance of glass foam lightweight aggregates and the influence of production factors. **Construction and Building Materials**, v. 228, p. 116746, 2019.
- ASSEFI, Mohammad *et al.* High strength glass foams recycled from LCD waste screens for insulation application. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, p. 124311, 2021.
- Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (ABIVIDRO). **Vidro: O resíduo infinitamente reciclável**, 2019. Disponível em: [vidro: o resíduo infinitamente reciclável - ABIVIDRO](https://www.abividro.org.br/). Acesso em: 22 de jan. de 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14715-1: Chapas de gesso para drywall – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- _____. **NBR 15210-1: Telhas onduladas e peças complementares de fibrocimento sem amianto - parte 1: classificação e requisitos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2023.

_____. **NBR 16605**: *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

_____. **NBR 17054**: *Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C518-04**. *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021.

_____. **ASTM C1045-01**. *Standard Practice for Calculating Thermal Transmission Properties Under Steady-State Conditions*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019.

_____. **ASTM C165**. *Standard Test Method for Measuring Compressive Properties of Thermal Insulations*. Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2012.

BALAJI, N. C.; MANI, Monto; REDDY, BV Venkatarama. Discerning heat transfer in building materials. **Energy Procedia**, v. 54, p. 654-668, 2014.

BEHERA, Monalisa *et al.* Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete– A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and building materials**, v. 68, p. 501-516, 2014.

BENTO, André C. *et al.* Glass foam of macroporosity using glass waste and sodium hydroxide as the foaming agent. **Ceramics International**, v. 39, n. 3, p. 2423-2430, 2013.

BERARDI, Umberto; JAFARPUR, Pouriya. Assessing the impact of climate change on building heating and cooling energy demand in Canada. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 121, p. 109681, 2020.

BERNARDO, Enrico *et al.* Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. **Ceramics International**, v. 33, n. 6, p. 963-968, 2007.

BERTOLO, Carlos *et al.* Estudo de concretos fabricados com agregado reciclado e fibras de polipropileno em situação de incêndio. *In*: Congresso Brasileiro do Concreto, 64. 2023, Florianópolis - SC. **Anais [...]**. Florianópolis – SC: IBRACON, 2023.

BOLDEN, Johnny; ABU-LEBDEH, Taher; FINI, Ellie. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. **American Journal of Environmental Science**, v. 9, n. 1, p. 14-24, 2013.

BRASIL, **Lei nº 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em 28 de jan. de 2024.

BRASILEIRO, Luzana Leite; MATOS, José Milton Elias de. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

Brasilit Saint-Gobain. **Ficha técnica do produto**. 2021. Disponível em: <https://www.brasilit.com.br/sites/brasilit.com.br/files/produto/arquivos/Ficha%20Técnica%20-%20Ondulada%205%2C%206%20e%208mm.pdf>. Acesso em: 15 de dez. de 2024.

BRYKALSKI, Marília *et al.* Glass foam of high compressive strength produced from photovoltaic module waste glass, eggshell, and clay. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, 2023.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2012.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. **Ceramic materials: science and engineering**. New York: springer, 2007.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de Calor e Massa**. 4. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, Bookman, AMGH Editora Ltda., 2012.

CETINER, Ikbal; SHEA, Andrew D. Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. **Energy and Buildings**, v. 168, p. 374-384, 2018.

CHAKARTNARODOM, Parinya; INEURE, Pitcharat. Foam glass development using glass cullet and fly ash or rice husk ash as the raw materials. **Key Engineering Materials**, v. 608, p. 73-78, 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Arroz – Brasil: Série Histórica de Produção**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>. Acesso em: 28 de jan. de 2024.

DA SILVA FERNANDES, Fernando Antonio; DE OLIVEIRA COSTA, Dayriane do Socorro; ROSSIGNOLO, João Adriano. Influence of Sintering on Thermal, Mechanical and Technological Properties of Glass Foams Produced from Agro-Industrial Residues. **Materials**, v. 15, n. 19, p. 6669, 2022.

DA SILVA, Robson Couto *et al.* Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 511, p. 177-182, 2019.

DÁVALOS, Julián *et al.* Preparation of glass–ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 60, n. 3, p. 183-193, 2021.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química nova**, v. 24, p. 778-782, 2001.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA, Dachamir. Reciclagem de resíduos agro-industriais: Cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 2, p. 22-25, 2005.

DONG, Wenkui; LI, Wengui; TAO, Zhong. A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 172, p. 105664, 2021.

DU, Hongjian; TAN, Kiang Hwee. Concrete with recycled glass as fine aggregates. **ACI Mater. J**, v. 111, n. 1, p. 47-58, 2014.

DUAN, Zhenhua *et al.* Study on the essential properties of recycled powders from construction and demolition waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, p. 119865, 2020.

EL-AMIR, Ahmed AM *et al.* Aluminium dross/soda lime glass waste-derived high-quality glass foam. **journal of materials research and technology**, v. 15, p. 4940-4948, 2021.

FERNANDES, Fernando Antonio da Silva *et al.* Vitreous Foam with Thermal Insulating Property Produced with the Addition of Waste Glass Powder and Rice Husk Ash. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 796, 2023.

FERNANDES, Fernando Antonio da Silva. **Espumas vítreas produzidas a partir da reciclagem de vidro sodocálcico e cinzas de casca de arroz aplicadas em substituição parcial de agregados em concreto leve**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre-RS, 2019.

FERNANDES, Fernando Antonio *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**, v. 128, p. 77-84, 2019.

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**, v. 35, n. 1, p. 229-235, 2009.

FERNANDES, Hugo R. *et al.* Environmental friendly management of CRT glass by foaming with waste egg shells, calcite or dolomite. **Ceramics International**, v. 40, n. 8, p. 13371-13379, 2014.

FOLETTTO, Edson Luiz *et al.* Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**, v. 28, p. 1055-1060, 2005.

FONSECA, Lúcia Helena Araújo. Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental. **Rev. Científica Semana Acadêmica**, v. 1, p. 36, 2013.

GAUR, Vivek Kumar *et al.* Assessing the impact of industrial waste on environment and mitigation strategies: A comprehensive review. **Journal of hazardous materials**, v. 398, p. 123019, 2020.

HASSID, S. *et al.* The effect of the Athens heat island on air conditioning load. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 2, p. 131-141, 2000.

HOSSAIN, SK S.; MATHUR, Lakshya; ROY, P. K. Rice husk/rice husk ash as an alternative source of silica in ceramics: A review. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 6, n. 4, p. 299-313, 2018.

Imbralit. **Catálogo técnico da telha ondulada**. 2022. Disponível em: <https://www.imbralit.com.br/media/downloads/catalogo-tecnico-telha-ondulada-doc-8.pdf>. Acesso em: 18 de jan. de 2025.

ISAIA, Geraldo Cechella *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 233-252, 2017.

JELLE, Bjørn Petter. Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. **Energy and buildings**, v. 43, n. 10, p. 2549-2563, 2011.

KETOV, A. A. An experience of reuse of a glass cullet for production of foam structure material. In: **International Symposium. Recycling and reuse of glass cullet**. University of Dundee. Russia, 2001. Disponível em: <https://www.penosytal.com/pub2.html>. Acesso em 20 de mar. de 2024.

KHAMIDULINA, D. D.; NEKRASOVA, S. A.; VORONIN, K. M. Foam glass production from waste glass by compression. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, p. 012008, 2017.

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

KÖNIG, Jakob; PETERSEN, Rasmus R.; YUE, Yuanzheng. Influence of the glass–calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 34, n. 6, p. 1591-1598, 2014.

KUFFNER, Bruna *et al.* Avaliação da resistência mecânica de concretos com substituição parcial da areia por resíduo de vidro industrial. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 64. 2023, Florianópolis - SC. **Anais [...]**. Florianópolis – SC: IBRACON, 2023.

KURI, Jhutan Chandra *et al.* The Effect of Recycled Waste Glass as a Coarse Aggregate on the Properties of Portland Cement Concrete and Geopolymer Concrete. **Buildings**, v. 13, n. 3, p. 586, 2023.

LARUCCIA, Mauro Maia. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Revista ENIAC pesquisa**, v. 3, n. 1, p. 69-84, 2014.

LEIVA, C. *et al.* Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties. **Waste Management**, v. 46, p. 298-303, 2015.

LI, Jing *et al.* Utilization of coal fly ash from a Chinese power plant for manufacturing highly insulating foam glass: Implications of physical, mechanical properties and environmental features. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 64-76, 2018.

LIOTTO, Pedro Felix; SANTANA, Genilson Pereira. O uso do vidro em concreto: revisão. **Scientific Amazonia**, v. 9, n. 2, p. C1-C12, 2020.

LIU, Junli *et al.* 3D-printed concrete with recycled glass: Effect of glass gradation on flexural strength and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 314, p. 125561, 2022.

LLAUDIS, Alejandro Saburit *et al.* Foaming of flat glass cullet using Si₃N₄ and MnO₂ powders. **Ceramics international**, v. 35, n. 5, p. 1953-1959, 2009.

MA, Li; ZHANG, Lu. Evolutionary game analysis of construction waste recycling management in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104863, 2020.

MARQUES, Henrique Fernandes *et al.* Reaproveitamento de resíduos da construção civil: a prática de uma usina de reciclagem no estado do Paraná/Reuse of construction waste: the practice of a recycling plant in the state of Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 21912-21930, 2020.

MEHRZAD, Shahrzad *et al.* Sugarcane bagasse waste fibers as novel thermal insulation and sound-absorbing materials for application in sustainable buildings. **Building and Environment**, v. 211, p. 108753, 2022.

MESQUITA, Atila da Silva Gomes de. Análise da geração de resíduos sólidos da construção civil em Teresina, Piauí. **Holos**, v. 2, p. 58-65, 2012.

MISAKA, Bernardo Lyoh Sugawara. **Desempenho térmico de telhado verde e convencionais: estudo de caso para temperaturas do oeste do estado do Rio Grande do Sul**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Alegrete-RS, 2024.

MUGONI, Consuelo *et al.* Design of glass foams with low environmental impact. **Ceramics International**, v. 41, n. 3, p. 3400-3408, 2015.

NASKAR, Milan K.; KUNDU, Debtosh; CHATTERJEE, Minati. A facile hydrothermal conversion of rice husk ash to ZSM-5 zeolite powders. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 95, n. 3, p. 925-930, 2012.

OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, Mohammad Ali. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112111, 2022.

ORTIZ, Alba Cristina; PEÑA, Jair Zapata. Implicaciones históricas y biológicas del cambio climático. **Nova**, v. 8, n. 13, 2010.

OWOEYE, Seun Samuel *et al.* Preparation and characterization of foam glass from waste container glasses and water glass for application in thermal insulations. **Ceramics International**, v. 46, n. 8, p. 11770-11775, 2020.

PELLEGRINI, Cláudio de Castro. A busca pelo copo ideal: um estudo de otimização em transferência de calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, p. e20180234, 2019.

PENG, Ligang *et al.* Enhancing the corrosion resistance of recycled aggregate concrete by incorporating waste glass powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 137, p. 104909, 2023.

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**, v. 67, p. 388-398, 2021.

PLACO SAINT-GOBAIN. **Placa Standard (ST) – 12,5 mm – Dados técnicos**, sd. Disponível em: <https://www.placo.com.br/produtos/flex/placa-standard-st-125-mm#characteristic>. Acesso em: 10 de dez. 2024.

PODE, Ramchandra. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1468-1485, 2016.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamentos da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre-RS, 2006.

QIAN, Xin; ZHOU, Jiawei; CHEN, Gang. Phonon-engineered extreme thermal conductivity materials. **Nature Materials**, v. 20, n. 9, p. 1188-1202, 2021.

QUEVEDO, Juliana Calage *et al.* Avaliação das propriedades físicas e térmicas de cerâmicas refratárias produzidas com cinza da casca de arroz e alumina calcinada. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e13127, 2022.

RIGHI, Débora *et al.* Efeitos da Substituição de Areia por Vidro Moído no Comportamento de Concretos em Elevadas Temperaturas. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 11, n. 2, p. 28-35, 2011.

RIOS, Fernanda Cruz; GRAU, David; CHONG, Wai K. Reusing exterior wall framing systems: A cradle-to-cradle comparative life cycle assessment. **Waste management**, v. 94, p. 120-135, 2019.

ROBERT, Dilan; BAEZ, Edwin; SETUNGE, Sujeeva. A new technology of transforming recycled glass waste to construction components. **Construction and Building Materials**, v. 313, p. 125539, 2021.

SAAD, Siti Asmahani *et al.* Pozzolan reaction mechanism of rice husk ash in concrete—a review. **Applied mechanics and materials**, v. 773, p. 1143-1147, 2015.

SALVADOR, PAULO. **Construção civil busca soluções sustentáveis: Monitor Mercantil**, 2022. Disponível em: <https://monitormercantil.com.br/construcao-civil-busca-solucoes-sustentaveis/>. Acesso em: 19 de jan. de 2024.

SANTAMOURIS, Matheos *et al.* On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings — A review. **Energy and buildings**, v. 98, p. 119-124, 2015.

SCHEFFLER, Michael; COLOMBO, Paolo. **Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications**. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., 2005.

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

SHINOHARA, Yasushi; KOHYAMA, Norihiko. Quantitative analysis of tridymite and cristobalite crystallized in rice husk ash by heating. **Industrial health**, v. 42, n. 2, p. 277-285, 2004.

SIDDIQUE, Rafat *et al.* Utilization of industrial by-products and natural ashes in mortar and concrete development of sustainable construction materials. In: **Nonconventional and vernacular construction materials**. Woodhead Publishing, p. 247-303, 2020.

SILVA, Jayne Araújo *et al.* Comportamento geotécnico de um solo expansivo estabilizado com cinza de casca de arroz e cal hidratada. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 2, p. 232-256, 2020.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 201-217, 2014.

SOBUZ, Md Habibur Rahman *et al.* Performance evaluation of high-performance self-compacting concrete with waste glass aggregate and metakaolin. **Journal of Building Engineering**, v. 67, p. 105976, 2023.

STOCHERO, N. P. *et al.* Green glass foams from wastes designed for thermal insulation. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 1609-1620, 2021.

STRACKE, Marcelo Paulo *et al.* Cinza de casca de arroz como reservatório molecular de água para a produção de soja. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 949-962, 2020.

TAMANNA, Nafisa; TULADHAR, Rabin; SIVAKUGAN, Nagarathnam. Performance of recycled waste glass sand as partial replacement of sand in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117804, 2020.

TANWAR, Vinod *et al.* Experimental investigation of mechanical properties and resistance to acid and sulphate attack of GGBS based concrete mixes with beverage glass waste as fine aggregate. **Journal of Building Engineering**, v. 41, p. 102372, 2021.

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

VIVALDINI, D. O. *et al.* Revisão: Fundamentos e materiais para o projeto da microestrutura de isolantes térmicos refratários de alto desempenho. **Cerâmica**, v. 60, p. 297-309, 2014.

WALTER, Melissa; MARCHEZAN, Enio; AVILA, Luis Antonio de. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, p. 1184-1192, 2008.

WANG, Li Pang *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**, v. 383, p. 131344, 2023.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**, 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>. Acesso em 20 de fev. de 2024.

WU, J. P. *et al.* Glass ceramic foams from coal ash and waste glass: production and characterisation. **Advances in Applied Ceramics**, v. 105, n. 1, p. 32-39, 2006.

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

ZINI, Dionatan; DE CAMPOS, Roger Francisco Ferreira. Análise avaliativa e comparativa entre telha ondulada ecológica, telha ondulada de fibrocimento e telha ecológica de tubos de pasta de dente. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**, v. 11, n. 01, p. 12-31, 2022.

APÊNDICE A - CÓDIGO ARDUÍNO

```
#include <dht.h>
#include <SPI.h>
#include <SdFat.h>
#define SD_CS_PIN 10
dht DHT;
int dhtpin[] = {2,3,4,5};
int currentDay = 1;
SdFat sd;
File dataFile;
float sensorValue, avgTemperature, humidity;
unsigned long lastMeasurementTime, startTime, startOfDay;
String dataString;
const int lm35Pins[] = {A0, A1, A2, A3, A4, A5};

void setup(){
  Serial.begin(9600);

  if(!sd.begin(SD_CS_PIN, SPI_HALF_SPEED)){
    Serial.println("Falha ao inicializar o cartão SD!");
    while (1);
  }
  Serial.println("Cartão SD inicializado com sucesso!");
  createLogFile();
}

void loop(){
  for(int i = 0; i<6; i++){
    Serial.println("arquivo carregado");
    delay(600000);
    collectData();
    saveToLogFile();
  }
```

```

currentDay++;
Serial.println("novo arquivo");
createLogFile();
}

void collectData(){
dataString = "";

for(int i = 0; i < 6; i++){
avgTemperature = 0;
for(int j = 0; j < 100; j++){
sensorValue = analogRead(lm35Pins[i]);
avgTemperature += (sensorValue * (5.0 / 1023.0)) * 100.0;
delay(10);
}
avgTemperature /= 100.0;
dataString += "LM35-" + String(i + 1) + ", " + String(avgTemperature) + ", ";
delay(10);
}

for(int i = 0; i < 4; i++){
DHT.read11(dhtpin[i]);
humidity = DHT.humidity;
dataString += "DHT11-" + String(i + 1) + ", " + String(humidity) + ", ";
delay(10);
}
dataString.remove(dataString.length() - 2);
}

void createLogFile(){
String fileName = "dia" + String(currentDay) + ".txt";

if(dataFile.open(fileName.c_str(), O_WRITE | O_CREAT | O_APPEND)){
dataFile.close();
}
}

```

```
Serial.println("Arquivo criado ou aberto: " + fileName);
}else{
Serial.println("Erro ao criar ou abrir o arquivo: " + fileName);
}
}

void saveToLogFile(){
String fileName = "dia" + String(currentDay) + ".txt";

if(dataFile.open(fileName.c_str(), O_WRITE | O_APPEND)){
Serial.println(dataString);
dataFile.println(dataString);
dataFile.close();
Serial.println("Dados salvos em " + fileName + ": " + dataString);
}else{
Serial.println("Erro ao abrir o arquivo: " + fileName);
}
}
```