

UFSCar – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CCET – CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DQ – DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Mariana Martinussi de Godoy

**Isolamento Térmico Sustentável: Potencial dos Materiais Renováveis na
Construção Civil**

Junho - 2026

São Carlos

Mariana Martinussi de Godoy

**Isolamento Térmico Sustentável: Potencial dos Materiais Renováveis na
Construção Civil**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento de Química
da Universidade Federal de São Carlos,
para obtenção do título de Bacharel em
Química

Orientador: Prof. Dr. Emerson Rodrigues
de Camargo

Coorientadora: Dra. Elisa Silva Ferreira

Junho – 2026

São Carlos



**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA (DQ)**

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33518206 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 6/2026/DQ/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIANA MARTINUSSI DE GODOY

ISOLAMENTO TÉRMICO SUSTENTÁVEL: POTENCIAL DOS MATERIAIS RENOVÁVEIS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 24 de junho de 2026

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Co-orientador	Dra Elisa Silva Ferreira
Membro da Banca 1	Profa. Dra. Sandra Cruz
Membro da Banca 2	Dra. Polianna da Silva Ferreira



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Samuel Schwab, Professor(a)**, em 25/06/2026, às 08:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **2330346** e o código CRC **9618031F**.

Referência: Caso responda a este documento, indicar expressamente o Processo nº 23112.001933/2024-38

SEI nº 2330346

Aos meus pais, que me ensinaram a acreditar nos meus sonhos e me deram força para torná-los possíveis.

Agradecimentos

A conclusão deste trabalho não representa apenas o encerramento de uma etapa acadêmica, mas também o fim de um ciclo marcado por aprendizados, desafios e muito crescimento. Ao longo dessa trajetória, carreguei comigo não apenas o meu esforço, mas também o carinho, o apoio e a dedicação de tantas pessoas que tornaram este momento possível. A todos que fizeram parte dessa caminhada, deixo o meu mais sincero agradecimento.

À minha família, agradeço pelo apoio constante, pela compreensão e por todo o suporte oferecido ao longo desses anos. Foram vocês que me deram segurança, incentivo e confiança para seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao meu namorado, Gabriel, pelo companheirismo, pela paciência e por estar presente de forma tão especial durante esse tempo.

Aos meus amigos, agradeço por terem tornado essa caminhada muito mais leve e feliz. Foram as conversas, as risadas, o apoio e todos os momentos juntos que transformaram essa experiência em algo repleto de afeto e memórias que levarei comigo para sempre. Cada amizade, com sua presença e singularidade, tornou-se uma parte essencial da minha história.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Emerson Rodrigues de Camargo e Dra. Elisa Silva Ferreira, meu agradecimento vai muito além da orientação deste trabalho. Tive a alegria de fazer parte de seus grupos, tanto como aluna de iniciação científica quanto como estagiária, e em todos esses momentos fui sempre acolhida com paciência, incentivo e atenção. Mais do que ensinar, vocês me orientaram nos desafios do dia a dia e tornaram cada aprendizado especial. Sou profundamente grata por terem tornado esta jornada tão significativa para mim.

Por fim, agradeço aos membros da banca examinadora pela gentileza em aceitar o convite e dedicar seu tempo à leitura e avaliação deste trabalho.

Resumo

O setor da construção civil exerce papel central no desenvolvimento urbano, mas também se destaca pelo elevado consumo de recursos naturais e pela significativa contribuição para as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida das edificações, associadas tanto ao carbono operacional, relacionado ao consumo energético durante o uso, quanto ao carbono incorporado, decorrente da extração de matérias-primas, produção de materiais, transporte, construção e demolição. Nesse cenário, os materiais isolantes térmicos são fundamentais para reduzir o consumo energético das edificações, uma vez que minimizam a transferência de calor entre os ambientes interno e externo, diminuindo a demanda por sistemas de climatização artificial. Seu desempenho está diretamente relacionado à presença de estruturas porosas capazes de aprisionar ar e limitar os mecanismos de transferência de calor, sendo influenciado por parâmetros como porosidade, densidade e conectividade dos poros. Materiais isolantes convencionais apresentam baixa condutividade térmica devido à formação controlada dessas estruturas por processos industriais frequentemente intensivos em energia e associados ao uso de matérias-primas fósseis ou minerais. Em contrapartida, materiais de base renovável empregam fibras vegetais e resíduos agroindustriais que já apresentam características naturalmente favoráveis ao aprisionamento de ar, permitindo a obtenção de estruturas porosas por reorganização e consolidação, com menor demanda de processamento. Além do potencial de biodegradabilidade, esses materiais apresentam densidade ajustável em função da arquitetura estrutural, podendo atingir valores reduzidos comparáveis aos de isolantes convencionais. Dessa forma, materiais de origem biológica constituem alternativas tecnicamente promissoras para isolamento térmico, ao aliarem desempenho funcional e maior eficiência no uso de recursos ao longo do ciclo de vida.

Palavras-chave: condutividade térmica; materiais isolantes; materiais de base renovável; estrutura porosa; construção sustentável.

Abstract

The construction sector plays a central role in urban development, but it is also characterized by high consumption of natural resources and a significant contribution to greenhouse gas emissions throughout the life cycle of buildings, associated with both operational carbon, related to energy consumption during use, and embodied carbon, resulting from raw material extraction, material production, transportation, construction, and demolition. In this context, thermal insulation materials are essential for reducing the energy consumption of buildings, as they minimize heat transfer between indoor and outdoor environments, thereby decreasing the demand for artificial climate control systems. Their performance is directly related to the presence of porous structures capable of trapping air and limiting heat transfer mechanisms, being influenced by parameters such as porosity, density, and pore connectivity. Conventional insulation materials exhibit low thermal conductivity due to the controlled formation of these structures through industrial processes that are often energy-intensive and associated with fossil- or mineral-based raw materials. In contrast, renewable-based materials employ plant fibers and agro-industrial residues that already possess naturally favorable characteristics for air entrapment, enabling the formation of porous structures through reorganization and consolidation with lower processing demands. In addition to their biodegradability potential, these materials exhibit tunable density depending on structural architecture, reaching low values comparable to those of conventional insulators. Therefore, bio-based materials represent technically promising alternatives for thermal insulation, combining functional performance with greater resource-use efficiency throughout the life cycle.

Keywords: thermal conductivity; insulation materials; renewable-based materials; porous structure; sustainable construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição global das emissões de CO ₂ por setor. Dados de Lockhart, 2023.	14
Figura 2. Classificação de materiais de isolamento por origem da matéria prima. Durakovic, 2020 (Adaptado).	16
Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas adotadas na revisão bibliográfica.	18
Figura 4. Ilustração dos três mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação, exemplificados em um sistema de aquecimento por chama. Gu, 2020 (Adaptado).	19
Figura 5. Processo de síntese de xerogéis, criogéis e aerogéis. Esquivel-Castrol, 2018 (Adaptado).	29
Figura 6. Classificação da estrutura dos poros. Kaneco, 1994.	34
Figura 7. Representação esquemática dos diferentes tipos de poros quanto à conectividade: (a) poro fechado; (b) e (f) poros cegos; (c) e (d) poros abertos; (e) poro passante. IUPAC, 1994.	36
Figura 8. Esquema ilustrativo do transporte em meio poroso. da Silva, 2022 (Adaptado).	37
Figura 9. Esquema representativo da evolução da formação celular em espumas poliméricas durante o processo de expansão. Verdolotti, 2017.	40
Figura 10. Representação esquemática da geometria poliédrica das células em espumas de poliuretano. À esquerda, modelo individual de célula; à direita, arranjo resultante do empacotamento celular durante a expansão da espuma. Beckerdite, 1991.	41
Figura 11. MEV de espuma de poliuretano flexível evidenciando morfologia de células abertas e interconectadas. Verdolotti, 2017 (Adaptado).	42
Figura 12. MEV de espuma de poliuretano rígida evidenciando morfologia de células fechadas e preservação das paredes celulares. Verdolotti, 2017 (Adaptado).	43
Figura 13. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de (a) poliestireno expandido (EPS) (Ogam, 2016); (b) poliestireno extrudado (XPS) (Torre, 2024) e (c) polietileno (Rezaei, 2014).	43

Figura 14. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de um xerogel de lignina obtido por secagem evaporativa. Al-Hamamre, 2025.	47
Figura 15. Influência da temperatura de congelamento na morfologia e estrutura porosa de criogéis de nanocelulose obtidas por congelamento homogêneo: (a) $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ e (b) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando alterações no tamanho e organização dos poros. Lavoine, 2017.	48
Figura 16. Influência do método de congelamento na morfologia porosa de criogéis de nanocelulose: estruturas obtidas por congelamento convencional (A) e congelamento direcional (B), evidenciando diferenças no alinhamento dos poros. Lavoine, 2017.....	49
Figura 17. Morfologia porosa de criogel de CHC obtido por liofilização observada por MEV: (A) superfície e (B) seção transversal interna. Chen, 2025.	49
Figura 18. Microscopias MEV-FEG de aerogéis de quitosana obtidos por secagem supercrítica: (a) quitosana; (b) quitosana:glutaraldeído; (c) quitosana:glutaraldeído; (d) quitosana:glutaraldeído. Baldino, 2015.	51
Figura 19. MEV de cerâmicas porosas reforçadas com fibras submetidas a diferentes tempos de moagem: (a) 10 s; (b) 20 s; (c) e (d) 30 s, evidenciando a redução do comprimento das fibras com o aumento do tempo de moagem. Song, 2026.....	53
Figura 20. Microscopias eletrônicas de varredura (MEV) da (a) lã de rocha (Lemougna, 2020) e (b) lã de vidro (Öztürk, 2013).....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação entre estrutura celular e condutividade térmica em espumas poliméricas comerciais utilizadas como materiais isolantes. Dados de Comite, 2015.	44
Tabela 2. Influência da estrutura fibrosa na condutividade térmica de lãs minerais isolantes. Dados de Karnick, 2026.	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ADC	Azodicarbonamida
CMC	Carboximetil Celulose
EC	Carbono Incorporado (<i>Embodied Carbon</i>)
EPE	Polietileno Expandido
EPS	Poliestireno Expandido
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>)
OC	Carbono Operacional (<i>Operation Carbon</i>)
PUR	Poliuretano
XPS	Poliestireno Extrudado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVO	17
3	METODOLOGIA	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	Mecanismos de Transferência de Calor	19
4.1.1	Portadores de Energia	19
4.1.2	Condução.....	20
4.1.3	Convecção	21
4.1.4	Radiação	21
4.2	Transferência de Calor em Materiais Isolantes.....	22
4.3	Estrutura de Materiais Isolantes	23
4.3.1	Mecanismo de formação de poros.....	24
4.3.1.1	<i>Formação de poros por desprendimento de gás em sistemas poliméricos</i>	<i>24</i>
4.3.1.2	<i>Formação de poros por processos de secagem.....</i>	<i>28</i>
4.3.1.3	<i>Formação de poros por deposição de fibras</i>	<i>31</i>
4.3.2	Classificação dos poros em materiais sólidos	32
4.3.2.1	<i>Classificação quanto à origem</i>	<i>32</i>
4.3.2.2	<i>Classificação quanto à localização na estrutura</i>	<i>33</i>
4.3.2.3	<i>Classificação quanto ao tamanho</i>	<i>33</i>
4.3.2.4	<i>Classificação quanto à geometria dos poros.....</i>	<i>34</i>
4.3.2.5	<i>Classificação quanto à conectividade dos poros</i>	<i>35</i>
4.3.3	Tortuosidade.....	36
4.3.4	Efeitos da morfologia na condutividade térmica de materiais isolantes	37
4.4	Análise morfológica de materiais isolantes.....	40
4.5	Materiais isolantes renováveis	55
4.5.1	Bagaço de cana-de-açúcar.....	55
4.5.2	Cânhamo	56
4.5.3	Taboa	57
4.5.4	Linho.....	57
4.5.5	Lã de ovelha.....	58
4.5.6	Fibra de coco	59
4.5.7	Fibra de juta.....	60

4.6	Rotas de produção e desempenho térmico de isolantes convencionais e alternativos.....	60
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
6	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades modernas e a complexidade do cotidiano refletem séculos de transformações sociais, econômicas e tecnológicas, especialmente desde a Revolução Industrial, quando a expansão das fábricas e dos comércios reorganizou a rotina das pessoas e o espaço urbano (Mehdipour; Nia, 2013). Nesse contexto, a construção civil ocupa papel central, fornecendo edificações, redes de transporte, sistemas de energia e saneamento, estruturando o ambiente necessário para que a vida funcione de forma contínua e eficiente (Álvarez *et al.*, 2021). Contudo, essa infraestrutura está em constante desgaste, e sua manutenção e expansão exigem grandes quantidades de recursos naturais e energia (Alblas; Peters; Wortmann, 2014), revelando os desafios de conciliar crescimento com sustentabilidade.

Dentro desse cenário, o impacto do setor da construção sobre as emissões de carbono em nível global torna-se particularmente evidente quando se considera tanto o consumo de energia necessário à operação das edificações quanto a energia demandada para a produção, transporte e instalação dos materiais de construção (Cavalett *et al.*, 2024). Estima-se que os edifícios sejam responsáveis por cerca de 39% das emissões globais de gases de efeito estufa, das quais 28% estão associadas à fase de operação, incluindo aquecimento, resfriamento, iluminação e funcionamento de equipamentos, enquanto que os 11% restantes dizem respeito aos materiais e às etapas construtivas ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a extração e processamento das matérias-primas até transporte, instalação, manutenção e descarte final (Hoxha *et al.*, 2020). Esses dois componentes são amplamente discutidos na literatura como carbono operacional (*Operational Carbon – OC*) e carbono incorporado (*Embodied Carbon – EC*). A participação relativa dessas emissões no setor da construção pode ser observada na Figura 1.

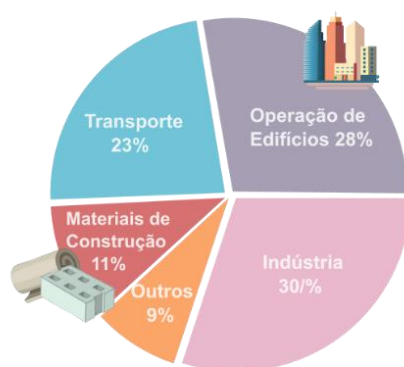


Figura 1. Distribuição global das emissões de CO₂ por setor. Dados de Lockhart, 2023.

A distinção entre OC e EC mostra que a redução das emissões no setor da construção civil exige uma abordagem integrada. Isso envolve, por um lado, a adoção de edificações projetadas para maior eficiência energética durante a operação e, por outro, a escolha de materiais que demandem menos energia e emitam menos carbono ao longo de seu ciclo de vida. Ao combinar essas estratégias, é possível reduzir simultaneamente o carbono operacional e o incorporado, fornecendo fundamentos para escolhas de projeto e para a seleção de tecnologias construtivas que conciliem desempenho técnico e sustentabilidade ambiental de maneira consistente e eficiente.

Considerando esses aspectos, os materiais isolantes térmicos assumem papel estratégico, pois atuam diretamente na redução do consumo energético durante a operação dos edifícios, diminuindo o carbono operacional (Asdrubali; D'Alessandro; Schiavoni, 2015; Schiavoni *et al.*, 2016). Esses materiais são amplamente utilizados para proporcionar conforto térmico a quem utiliza esses espaços e reduzir o consumo de energia associado à climatização. Seu principal objetivo é minimizar a transferência de calor entre o interior e o exterior das construções (Ghaffarian Hoseini *et al.*, 2013), atuando sobre os três mecanismos de transporte de energia térmica: condução, convecção e radiação. A eficácia desses materiais está intimamente ligada à sua estrutura interna porosa, que retém o ar e cria barreiras físicas capazes de dificultar tanto a movimentação deste quanto a propagação direta do calor. Ao limitar a passagem de calor, os isolantes permitem que os ambientes internos se mantenham em condições térmicas estáveis, reduzindo a demanda por aquecimento ou refrigeração e, consequentemente, o consumo de eletricidade por sistemas HVAC (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* – sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado), contribuindo para a eficiência energética.

Os isolantes térmicos podem ser classificados de acordo com sua origem, conforme ilustrado na Figura 2, em inorgânicos, como fibras minerais obtidas a partir de rochas; orgânicos sintéticos, incluindo espumas de poliestireno expandido (EPS), extrudado (XPS), poliuretano (PUR) e outros polímeros petroquímicos; e renováveis de base biológica, derivados de plantas ou subprodutos agrícolas, como celulose e fibras vegetais (Durakovic; Yildiz; Yahia, 2020).

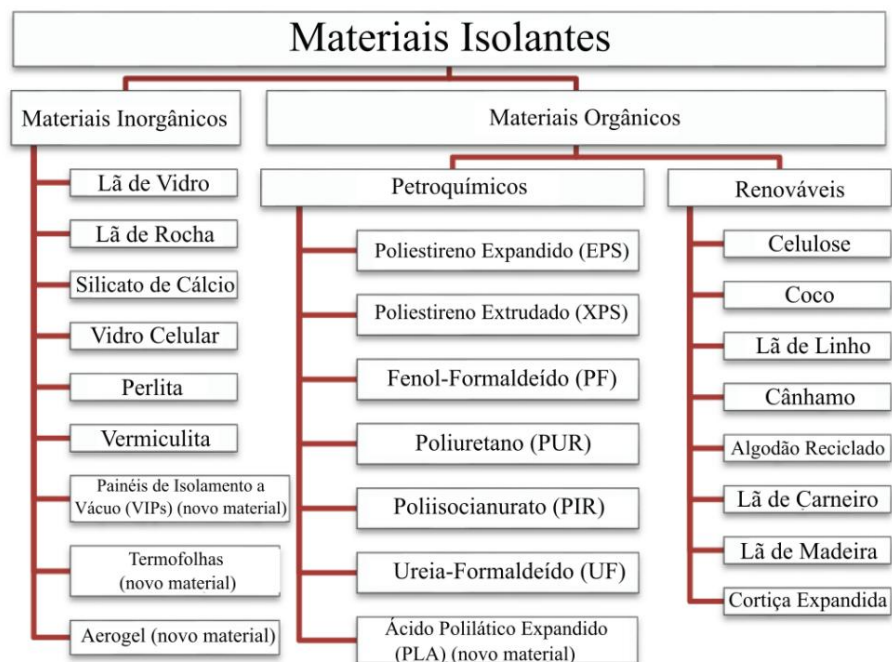


Figura 2. Classificação de materiais de isolamento por origem da matéria-prima. Durakovic, 2020 (Adaptado).

Apesar de contribuírem para a redução do consumo energético durante a operação das construções, os materiais isolantes convencionais, tais como as espumas de poliestireno, poliuretano e as lãs de rocha e vidro, apresentam uma tensão fundamental entre seus benefícios operacionais e os impactos de sua produção. Sua síntese envolve processos químicos e físicos complexos que demandam grandes quantidades de energia, majoritariamente proveniente de combustíveis fósseis, e gera subprodutos voláteis que contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Além disso, esses processos frequentemente requerem volumes expressivos de água e produzem resíduos sólidos de difícil manejo, que, quando descartados inadequadamente, intensificam a poluição do solo e a degradação de ecossistemas (Volf; Diviš; Havlík, 2015), reforçando a necessidade de alternativas mais sustentáveis.

Por outro lado, os materiais de base biológica apresentam potencial para conciliar desempenho técnico e redução do impacto ambiental (Escobar; Laibach, 2021; Pittau *et al.*, 2018). Isso ocorre porque, desde a fase inicial de seu crescimento, as plantas utilizadas na fabricação desses isolantes atuam como reservatórios de carbono; o dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera é assimilado por elas através da fotossíntese e incorporado aos seus tecidos vegetais, formando a celulose, a lignina e outros compostos orgânicos que constituem a biomassa (Cao *et al.*, 2022; Ingrao *et al.*, 2015). Quando transformadas em material, esse

carbono permanece retido em sua estrutura do isolante, reduzindo a quantidade de CO₂ liberada ao longo de todo o ciclo de vida do produto e contribuindo para a diminuição líquida das emissões de gases de efeito estufa (Galimshina *et al.*, 2022). Além disso, a produção desses materiais renováveis exige menor consumo de energia, não envolve reações químicas complexas e gera menos resíduos poluentes, mantendo propriedades, características e desempenho técnico compatíveis com os produtos tradicionais (Asdrubali; D'Alessandro; Schiavoni, 2015). Considerando o ciclo de vida completo das edificações, desde a construção até a demolição, incluindo consumo de energia, uso de recursos e geração de resíduos, os isolantes de base biológica se apresentam como alternativas viáveis e confiáveis, capazes de atender aos critérios de desempenho exigidos para construções modernas (Hansen; Budde; Prochnow, 2016; Hoxha *et al.*, 2020; Martínez; Bernat-Maso; Gil, 2023).

Assim, os materiais isolantes de base biológica se destacam como alternativas promissoras, capazes de conciliar desempenho técnico com menor impacto ambiental e oferecer soluções sustentáveis para o setor da construção civil. Nesta revisão, serão discutidos os principais avanços e aplicações desses materiais, evidenciando seu potencial como estratégia eficiente e ambientalmente responsável para edificações modernas.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar e discutir o panorama dos materiais isolantes térmicos, abordando a relação entre sua estrutura, composição e mecanismos de isolamento térmico. Além disso, busca comparar materiais convencionais e de origem renovável quanto ao desempenho térmico, métodos de obtenção, aplicações e aspectos relacionados à sustentabilidade, evidenciando suas potencialidades e limitações no contexto do desenvolvimento de soluções mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de uma revisão bibliográfica da literatura, conduzida a partir da análise de estudos científicos sobre materiais isolantes térmicos de origem convencional e renovável. Inicialmente, foi realizado um levantamento de publicações nas

bases de dados Google Scholar, Scopus e Web of Science, com o objetivo de reunir estudos relevantes relacionados ao tema.

Com base nesse levantamento, foram definidos os principais eixos de análise que nortearam a revisão, contemplando aspectos relacionados à estrutura dos materiais, às propriedades físicas, aos mecanismos de transferência de calor, ao desempenho em isolamento térmico, com ênfase na condutividade térmica, às rotas sintéticas empregadas na obtenção dos materiais e aos aspectos de sustentabilidade, como a origem das matérias-primas e os impactos ambientais associados.

A estratégia de busca foi então refinada por meio da utilização de palavras-chave e combinações de termos específicos, permitindo a seleção de estudos alinhados aos objetivos da pesquisa. Os trabalhos selecionados foram submetidos à leitura crítica e à análise qualitativa, considerando seus objetivos, metodologias e principais contribuições para a compreensão da relação entre a estrutura dos materiais e seu comportamento térmico.

Por fim, as informações obtidas foram sistematizadas e organizadas, estabelecendo relações entre as características estruturais, as propriedades físicas, as rotas de obtenção e o desempenho térmico dos materiais. Essa abordagem possibilitou a comparação entre diferentes sistemas isolantes, convencionais e de base renovável, bem como a avaliação das implicações das estratégias de síntese e dos aspectos de sustentabilidade sobre seu potencial de aplicação.

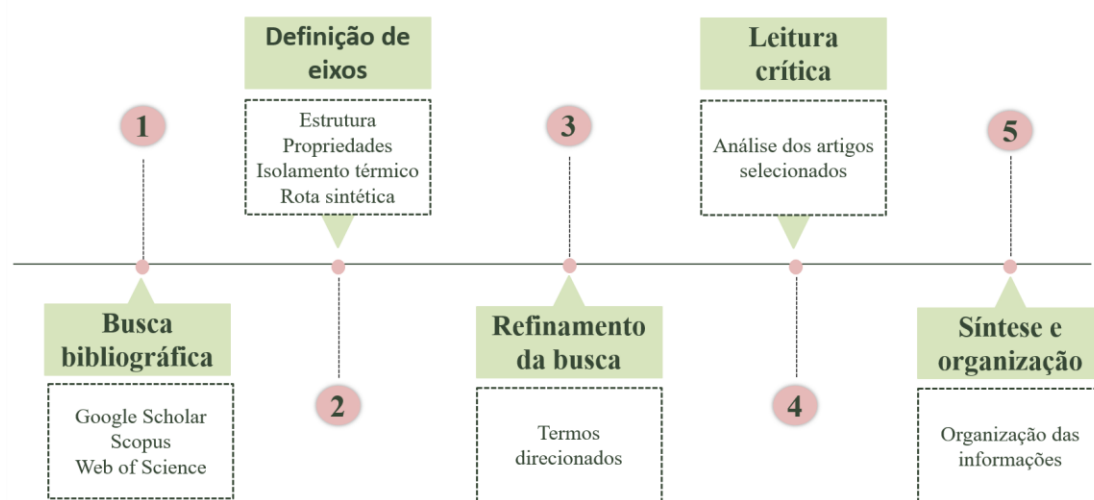


Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas adotadas na revisão bibliográfica.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Mecanismos de Transferência de Calor

A transferência de calor é um fenômeno físico fundamental que ocorre sempre que existe uma diferença de temperatura entre regiões de um sistema ou entre um sistema e seu entorno. Esse processo pode ser observado em sólidos, líquidos e gases e é regido por princípios microscópicos que determinam a forma como a energia térmica se propaga. De forma geral, distinguem-se três mecanismos principais: condução, convecção e radiação (Rathore; Kapuno, 2011), que podem ocorrer isoladamente ou de maneira combinada, dependendo das condições do sistema e das propriedades do material. A representação esquemática desses três mecanismos de transferência de calor é apresentada na Figura 4.

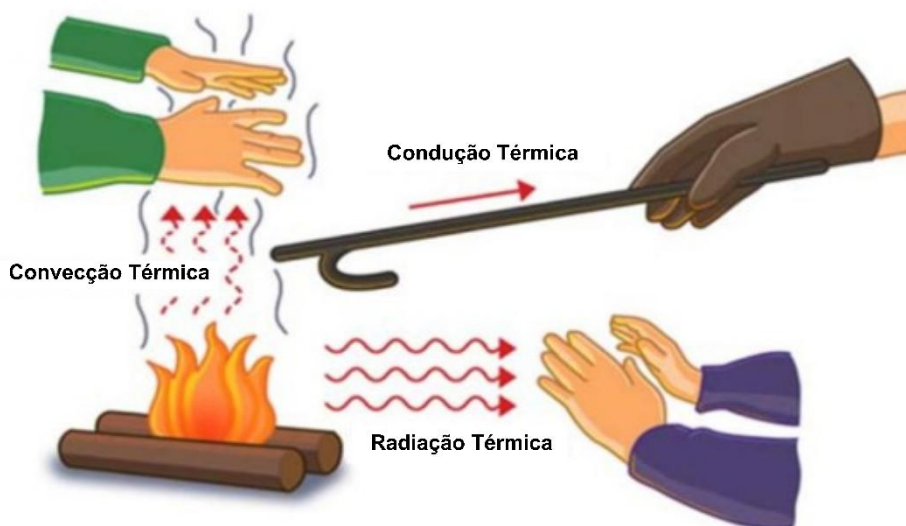


Figura 4. Ilustração dos três mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação, exemplificados em um sistema de aquecimento por chama. Gu, 2020 (Adaptado).

4.1.1 Portadores de Energia

A propagação de energia térmica depende do movimento e das interações de portadores microscópicos de energia, cuja natureza é determinada pela composição química e pela estrutura interna do material. Entre esses portadores destacam-se elétrons livres, fônons, moléculas, átomos e fótons, sendo cada um responsável por modos específicos de transporte de energia que definem o mecanismo predominante em diferentes estados da matéria (Çengel;

Ghajar, 2015). Em sólidos metálicos, os elétrons livres apresentam alta mobilidade e baixa massa, permitindo a transferência rápida de energia de regiões quentes para frias, interagindo continuamente com a rede cristalina e resultando em elevada condutividade térmica. Em sólidos isolantes, os elétrons permanecem fortemente ligados aos núcleos, tornando desprezível a condução eletrônica, sendo a propagação de energia dada principalmente por fônons (Uher, 2004).

A condução por fônons ocorre por modos de vibração coletiva da rede cristalina, nos quais cada átomo vibra em torno de sua posição de equilíbrio e essa vibração se propaga transportando energia de regiões quentes para regiões frias (Uher, 2004). A eficiência desse transporte depende da organização estrutural; redes cristalinas ordenadas permitem propagação contínua com menor dispersão, enquanto estruturas desordenadas ou porosas limitam a condução de calor. Em líquidos e gases, a condução se dá por colisões e difusão molecular: em que moléculas mais energéticas transferem energia para moléculas menos energéticas e há migração de moléculas mais energéticas para zonas de menor temperatura. Esses dois mecanismos promovem a redistribuição gradual do calor ao longo do fluido (Zhang *et al.*, 2005).

4.1.2 Condução

A condução térmica é o processo pelo qual a energia se propaga dentro de um material sem que ocorra movimento macroscópico da substância (Chinta; Heeraman, 2025) sendo governada pelas propriedades do material, como densidade e estrutura interna, e pela espessura na direção do fluxo de calor. O fluxo de calor unidimensional em um material pode ser descrito pela equação (1) (Çengel; Ghajar, 2015):

$$q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

em que q representa a taxa de transferência de calor, medida em watts (W); A é a área da superfície perpendicular à direção do fluxo de calor (m^2), ΔT corresponde à diferença de temperatura entre as extremidades do material (K), Δx indica a espessura do material ao longo da direção do fluxo e λ é a condutividade térmica do material ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$).

Em situações gerais, incluindo fluxos tridimensionais, o transporte de calor é representado pelo vetor de Fourier (Büttner; Mokross, 1984), conforme apresentado na equação (2):

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (2)$$

onde $\vec{q}$ é o vetor fluxo de calor, ∇T é o gradiente de temperatura e λ representa a condutividade do material. Este parâmetro caracteriza a capacidade do material de conduzir calor; valores elevados de λ indicam transferência de energia mais intensa, enquanto valores baixos correspondem a materiais que atuam como isolantes térmicos.

4.1.3 Convecção

A convecção térmica constitui um mecanismo de transferência de calor determinado pelo movimento de um fluido. Ao contrário da condução, que ocorre internamente no material, a convecção envolve o transporte de energia pela movimentação de volumes de fluido, influenciada por gradientes de temperatura e propriedades físicas do fluido (Çengel; Ghajar, 2015). Para o ar seco em repouso, a condutividade térmica é de 0,026 W/(m·K), valor de referência em condições padrão de pressão e temperatura (Heinemann, 2008).

Quando o movimento do fluido é induzido por forças externas, como ventiladores, bombas ou vento, o processo é denominado convecção forçada, enquanto que, quando o escoamento surge espontaneamente devido a diferenças de densidade causadas por variações de temperatura, fala-se em convecção natural (Kakaç; Yener, 1993).

O fluxo de calor transferido por convecção pode ser quantificado pela equação (3):

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (3)$$

em que q é a taxa de transferência de calor (W), h é o coeficiente convectivo (W/m²·K), A , a área de contato entre a superfície e o fluido (m²), e ΔT , a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (K). O coeficiente h depende das propriedades físicas do fluido, do regime de escoamento e da geometria da superfície, podendo ser determinado experimentalmente ou por meio de correlações empíricas.

4.1.4 Radiação

A radiação térmica é o mecanismo pelo qual o calor é transferido por meio de ondas eletromagnéticas, sem a necessidade de um meio material para que essa energia se propague.

Isso significa que mesmo no vácuo, um corpo quente pode transferir energia para outro mais frio. Todos os corpos emitem radiação de acordo com sua temperatura: quanto maior a temperatura, maior a quantidade de energia emitida (Howell *et al.*, 2021); a eficiência dessa emissão depende da emissividade da superfície (ε), que indica a capacidade relativa de um material de emitir energia em relação a um corpo negro ideal.

A taxa de transferência de calor por radiação entre uma superfície e seu entorno pode ser descrita pela Equação (4):

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{sup}^4) \quad (4)$$

onde q representa a taxa de transferência de calor (W), $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann, A , a área da superfície emissora (m^2), T_s , a temperatura da superfície emissora (K) e T_{sup} é a temperatura do ambiente ou da superfície receptora (K). O parâmetro T_s define a quantidade de energia irradiada pela superfície, enquanto T_{sup} corresponde à energia recebida do ambiente ou de superfícies vizinhas. A diferença entre as temperaturas das superfícies elevadas à quarta potência determina o fluxo líquido de radiação, que reflete o balanço entre a energia emitida e a absorvida pela superfície. Quando T_s é superior a T_{sup} , a superfície libera energia líquida; quando T_s é inferior, predomina a absorção de radiação (Howell *et al.*, 2021).

4.2 Transferência de Calor em Materiais Isolantes

Nos materiais isolantes, os mecanismos de condução, convecção e radiação atuam simultaneamente, embora com contribuições relativas distintas. Em materiais porosos, a convecção tende a ser fortemente reduzida ou até suprimida, uma vez que a estrutura interna dificulta a movimentação de fluidos em seu interior. Nesse contexto, a condução térmica ocorre por dois caminhos principais: ao longo da fase sólida, que forma a matriz do material, e através da fase gasosa, correspondente ao fluido contido nos poros. A radiação térmica também pode contribuir para a transferência de calor, especialmente em materiais de baixa densidade ou em condições de temperatura mais elevada (Ferkel *et al.*, 2013).

Assim, a condutividade térmica efetiva pode ser expressa como a soma das contribuições individuais, conforme apresentado na Equação (5):

$$\lambda_{total} = \lambda_{rad} + \lambda_{sol} + \lambda_{gas} \quad (5)$$

onde λ_{sol} corresponde à condução através da fase sólida, λ_{gas} refere-se à condução pela fase gasosa e λ_{rad} representa a contribuição associada à radiação térmica (Ferkel *et al.*, 2013).

4.3 Estrutura de Materiais Isolantes

Materiais isolantes caracterizam-se por apresentarem baixa condutividade térmica, em contraste com materiais metálicos, como o cobre (valores de condutividade próximos de 400 W/m·K) que possuem elevada capacidade de condução de calor. Essa diferença está associada à estrutura dos materiais: enquanto os metais apresentam estrutura cristalina compacta e alta densidade eletrônica, o que favorece a transferência eficiente de energia térmica, os isolantes apresentam estrutura mais heterogênea e, em geral, altamente porosa, o que dificulta a propagação do calor. Além disso, os materiais isolantes podem apresentar composição química bastante diversa, abrangendo sistemas vítreos, cerâmicos ou poliméricos. Como exemplos de materiais isolantes, podem ser citados a lã de vidro (0,023 – 0,040 W/m·K) e as espumas de poliuretano (0,020 – 0,030 W/m·K), amplamente utilizadas em sistemas de isolamento térmico na construção civil e em aplicações industriais.

A baixa condutividade desses materiais está diretamente relacionada à sua estrutura interna, que consiste em uma rede complexa de sólidos entremeados poros (Li *et al.*, 2020), cuja configuração interna, incluindo a forma, o tamanho, a distribuição e a conectividade dos poros, determina suas propriedades fundamentais. Essa rede apresenta uma estrutura expandida, na qual os elementos sólidos estão distribuídos de maneira a maximizar a fração de espaços vazios, resultando em baixa densidade aparente.

A elevada porosidade não apenas confere leveza ao material, mas também define sua arquitetura interna, influenciando diretamente propriedades como densidade, isolamento térmico e transporte de fluidos. Nesse contexto, a porosidade constitui um parâmetro central e pode ser definida tanto como a fração do volume total ocupada por ar ou gás (Chen; Xu; Zhang, 2026) quanto em termos da razão entre a densidade do material poroso e a densidade do material denso correspondente (isento de poros) (Kao; Jeyaprakash; Yang, 2021). Como a estrutura porosa incorpora uma fração significativa de vazios, a densidade aparente passa a refletir não

apenas a composição da fase sólida, mas também o volume de poros presente no material. Assim, quanto maior a porosidade, menor tende a ser a densidade aparente em relação ao material denso equivalente, sendo essa relação geralmente expressa em termos percentuais.

Além da magnitude da porosidade, a forma como os poros se apresentam, incluindo o tamanho, o formato, a conectividade e a distribuição, influencia a condutividade térmica e diversas outras propriedades do material poroso. Essas características são estabelecidas durante a formação do material, a partir de fenômenos físico-químicos associados às etapas de nucleação, crescimento e estabilização da fase gasosa, para materiais com poros formados em sistemas sólido/gás, e às etapas de secagem em poros formados a partir de sistemas sólido/líquido. Dessa forma, a compreensão desses mecanismos é essencial para a análise e o controle da estrutura final (Karimi *et al.*, 2012).

4.3.1 Mecanismo de formação de poros

4.3.1.1 Formação de poros por desprendimento de gás em sistemas poliméricos

Em materiais porosos obtidos a partir de sistemas sólido/gás, a formação da estrutura celular ocorre pela geração e expansão de uma fase gasosa no interior de uma fase contínua. Esse processo é observado em diferentes materiais espumados, como espumas de poliuretano, poliestireno expandido e polietileno expandido, e envolve quatro etapas principais: nucleação, crescimento, degeneração celular e estabilização.

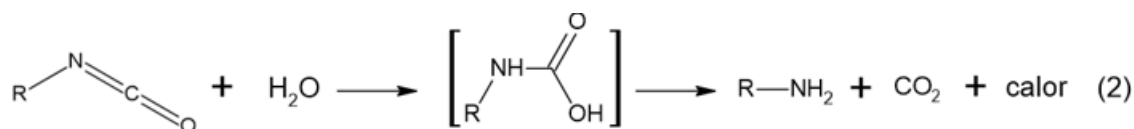
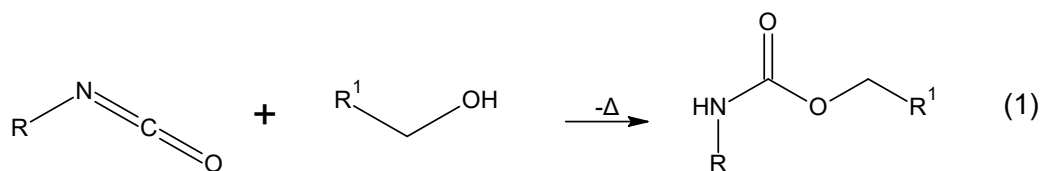
A nucleação constitui o estágio inicial da formação de poros e corresponde ao surgimento das primeiras células gasosas no interior do material. Essas células consistem em cavidades iniciais formadas pela separação do gás da fase contínua, as quais evoluem para os poros na estrutura final. Esse processo é desencadeado por perturbações no sistema, como aumento de temperatura ou redução de pressão, que promovem a liberação de gás e a formação de uma nova fase (Colton; Suh, 1987). Para que essas células se tornem estáveis, é necessário superar uma barreira energética associada à formação da interface entre o gás e a fase contínua. Nesse contexto, apenas células que atingem um tamanho mínimo, denominado raio crítico, conseguem se estabilizar e continuar crescendo. Células menores que esse valor são instáveis e colapsam, resultando na redissolução do gás no material (Colton; Suh, 1987), enquanto aquelas que ultrapassam esse limite tornam-se energeticamente favorecidas e passam a crescer espontaneamente.

A nucleação pode ocorrer sob diferentes condições, sendo usualmente classificada em homogênea ou heterogênea. No caso homogêneo, a formação das células ocorre em regiões estruturalmente uniformes do material, o que implica na necessidade de gerar uma nova interface gás-fase. Esse processo é energeticamente desfavorável, uma vez que toda a interface precisa ser criada a partir de um meio inicialmente contínuo. Por outro lado, na nucleação heterogênea, a presença de discontinuidades, como agentes nucleantes, impurezas ou defeitos, altera localmente o estado energético do sistema. Nessas regiões, a formação da fase gasosa requer menor reorganização estrutural, reduzindo o custo energético associado à criação da interface. Como resultado, essas regiões tornam-se mais propícias ao surgimento das células, favorecendo o início do processo de formação de poros (McClurg, 2004).

Após a nucleação, inicia-se o crescimento celular, impulsionado pela expansão do gás no interior das células já formadas. Esse crescimento ocorre porque o gás tende a ocupar um volume maior, seja pela redução da pressão externa ou pela contínua liberação de gás no sistema, fazendo com que as células aumentem de tamanho e promovam a expansão da estrutura porosa. À medida que as células crescem, a estrutura torna-se progressivamente instável, especialmente quando há grande diferença de tamanho entre células vizinhas. Nessas condições, ocorre a etapa de degeneração celular, na qual o sistema evolui para configurações mais estáveis. Um dos principais mecanismos envolvidos é o envelhecimento de Ostwald, em que células menores, mais instáveis, perdem gás para células maiores, que continuam a crescer. Além disso, pode ocorrer coalescência, quando o crescimento leva ao afinamento das paredes entre células adjacentes até sua ruptura, resultando na formação de cavidades maiores e menos uniformes (Bergeron; Walstra, 2005).

Os efeitos do envelhecimento e da coalescência podem ser atenuados por mecanismos químicos ou físicos que aumentam a rigidez da fase contínua, reduzindo sua capacidade de deformação. Enfim, a estabilização corresponde ao momento em que o crescimento e as transformações celulares são interrompidos. Isso ocorre quando a fase contínua se torna suficientemente rígida ou viscosa, dificultando tanto a expansão das células quanto a difusão de gás entre elas. Como consequência, a estrutura porosa é consolidada, preservando o tamanho, a forma e a distribuição dos poros. (Gibson; Ashby, 1999; Tavassoli; Razzaghi-Kashani; Mohebbi, 2018).

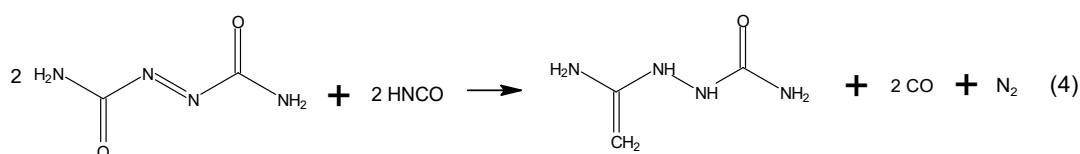
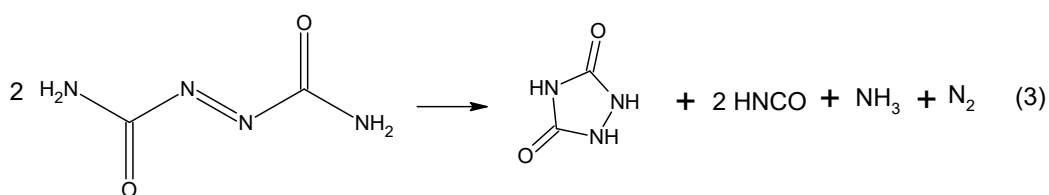
As espumas de poliuretano representam um exemplo de material poroso obtido por sistemas sólido/gás. Esses materiais são produzidos pela reação entre compostos contendo grupos hidroxila (-OH), denominados polióis, e compostos contendo grupos isocianato (-NCO), formando ligações uretânicas na cadeia polimérica, conforme mostrado na Reação 1. A formação da espuma, ocorre simultaneamente à geração da fase gasosa responsável pela expansão do material. Na produção dessas espumas, a água é frequentemente utilizada como agente expensor, reagindo com grupos isocianato para formar ácido carbâmico instável, o qual se decompõe em amina e dióxido de carbono (CO₂), conforme indicado na Reação 2. O CO₂ liberado promove a nucleação e o crescimento das células no interior da matriz polimérica, originando a estrutura porosa da espuma.



A partir desse processo inicial, a amina formada pode ainda reagir com novos grupos isocianato, produzindo ligações ureia e contribuindo para o aumento da reticulação da estrutura polimérica. Reações secundárias também podem levar à formação de grupos alofanato e biureto, aumentando a rigidez da rede e favorecendo a estabilização da espuma durante a expansão (Beckerdite; Herrington; Hock, 1991) (Ates *et al.*, 2022).

Em contraste, a formação das espumas de polietileno expandido (EPE) ocorre pela incorporação de uma fase gasosa em uma matriz termoplástica de polietileno fundido. Diferentemente das espumas de poliuretano, a formação de poros no polietileno ocorre principalmente pela decomposição térmica de agentes expansores, físicos ou químicos, adicionados durante o processamento. Entre os agentes expansores químicos mais utilizados, destacam-se compostos como a azodicarbonamida (ADC), cuja decomposição térmica libera gases como nitrogênio (N₂), monóxido de carbono (CO), amônia (NH₃) e ácido cianico (HNCO).

Paralelamente à geração de gases, também são formados produtos sólidos, como urazol e hidrazodicarbonamida, que permanecem dispersos na matriz polimérica e funcionam como pontos onde os gases tendem a se acumular inicialmente. Dessa forma, a formação das primeiras células gasosas passa a ocorrer preferencialmente na superfície dessas partículas sólidas, em vez de ocorrer aleatoriamente em toda a matriz. Como consequência, a nucleação exige menos energia, ocorre em maior número e resulta em estruturas celulares mais homogêneas. As reações de decomposição da azodicarbonamida podem ser representadas pelas reações 3 e 4 (Robledo-Ortiz *et al.*, 2008).



À medida que os gases são gerados, ocorre o aumento da pressão interna na matriz polimérica fundida, promovendo o crescimento das células e a expansão da espuma. Posteriormente, durante o resfriamento, a viscosidade do polímero aumenta e restringe a mobilidade das cadeias, estabilizando a estrutura celular formada.

De forma análoga ao EPE, o poliestireno expandido (EPS) constitui outro exemplo de espuma termoplástica amplamente utilizada, cuja estrutura porosa também resulta da incorporação de uma fase gasosa ao material. O EPS é produzido a partir da polimerização do monômero estireno, processo que leva à formação de pequenas partículas esféricas de poliestireno, comumente denominadas pérolas, contendo um agente expensor, geralmente o pentano, retido em seu interior (Wünsch, 2000).

Durante o processamento térmico, essas partículas são submetidas ao aquecimento com vapor ou ar quente, promovendo sua pré-expansão e a redução da densidade do material. Sob essas condições, o poliestireno atinge sua temperatura de amolecimento enquanto o agente expensor volatiliza, provocando aumento da pressão interna nas pérolas e sua consequente

expansão volumétrica, o que leva à formação da estrutura porosa do material. À medida que a expansão progride, as pérolas entram em contato e passam a se fundir parcialmente entre si, promovendo a consolidação da estrutura porosa e a formação de um corpo espumado contínuo. Posteriormente, durante o resfriamento do sistema, o aumento gradual da viscosidade do polímero restringe a mobilidade das cadeias e dificulta sua reorganização, contribuindo para a estabilização da espuma e para a manutenção de sua morfologia característica (Uttaravalli; Dinda; Gidla, 2020).

No poliestireno extrudado (XPS), por outro lado, a expansão ocorre diretamente no polímero fundido durante um processo contínuo de extrusão, sem a utilização de pérolas pré-expandidas. Nesse processo, o poliestireno é inicialmente fundido e misturado a agentes expansores físicos sob elevadas condições de temperatura e pressão, formando uma solução homogênea na qual o agente expensor permanece dissolvido na matriz polimérica. Enquanto essas condições são mantidas no interior da extrusora, o sistema permanece estável. Entretanto, ao passar pela matriz de extrusão e ser exposto à pressão atmosférica, ocorre uma rápida redução de pressão, diminuindo a solubilidade do agente expensor no polímero fundido. Como consequência, o agente expensor se expande rapidamente, promovendo a nucleação e o crescimento das células no interior do material extrudado (Feldman, 2010).

4.3.1.2 Formação de poros por processos de secagem

Além dos sistemas sólido-gás, nos quais a porosidade é gerada pela incorporação ou expansão de uma fase gasosa no interior do material, estruturas porosas também podem ser obtidas pela remoção controlada do solvente presente em sistemas líquidos precursores, como soluções, suspensões e géis. Nesses sistemas, os poros não são originados pela formação de bolhas, mas resultam dos espaços previamente ocupados pela fase líquida, que passam a constituir vazios após a extração dessa fase. Assim, a arquitetura porosa desenvolve-se progressivamente durante a consolidação da matriz sólida, sendo fortemente influenciada pelo mecanismo empregado para remoção do solvente.

Dependendo das condições de secagem adotadas, a extração do solvente pode ocorrer por evaporação, sublimação ou em estado supercrítico, originando diferentes classes de materiais porosos, incluindo xerogéis, criogéis e aerogéis, como esquematizado na Figura 5. Embora todos esses métodos conduzam à formação de estruturas contendo poros, os fenômenos

físicos envolvidos em cada processo influenciam diretamente a preservação da rede sólida, o desenvolvimento da morfologia interna e as propriedades estruturais finais do material.

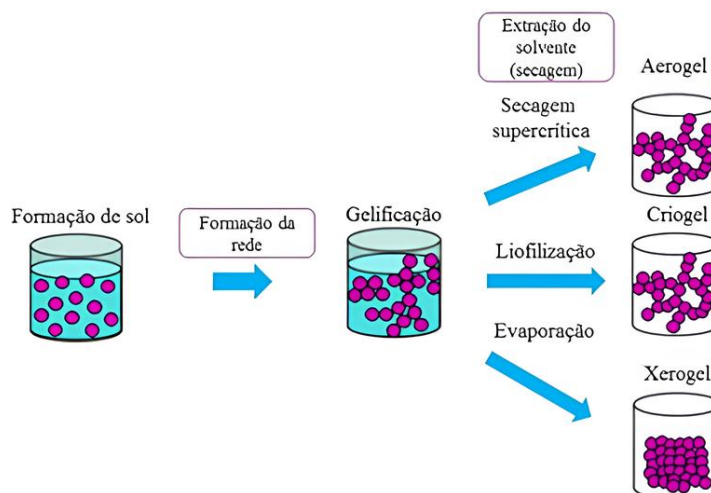


Figura 5. Processo de síntese de xerogéis, criogéis e aerogéis. Esquivel-Castrol, 2018 (Adaptado).

A secagem por evaporação, também denominada secagem à pressão ambiente, representa um dos métodos mais simples e amplamente empregados para obtenção de materiais porosos, sendo frequentemente associada à produção de xerogéis. Nesse processo, o solvente presente no interior da estrutura é removido gradualmente por evaporação, sob condições ambientes ou mediante aquecimento, promovendo o transporte contínuo da fase líquida do interior do material para sua superfície. À medida que a secagem avança, os espaços anteriormente preenchidos pelo solvente tornam-se vazios, originando a rede porosa remanescente (Baraka; Labidi, 2024). A simplicidade operacional, aliada ao baixo custo e à reduzida necessidade de equipamentos especializados, contribui para a ampla utilização desse método em diferentes sistemas, como xerogéis de nanoceluloses e de lignina.

Outro mecanismo amplamente empregado para a obtenção de materiais porosos a partir da remoção controlada de solventes é a liofilização, sendo ela muito utilizada na produção de criogéis, materiais caracterizados pela presença de estruturas com poros abertos e interconectados. Nesse processo, a estrutura porosa é formada a partir do congelamento do solvente presente no material precursor e de sua posterior remoção por sublimação.

O processo é normalmente dividido em duas etapas principais: congelamento e secagem. Dentre elas, a etapa de congelamento é particularmente importante, pois determina a organização inicial da estrutura que dará origem aos poros do material. Inicialmente, a solução, suspensão ou gel precursor é submetido ao resfriamento até que o solvente, geralmente água, se solidifique. Com a diminuição da temperatura, formam-se os primeiros núcleos de gelo, que passam a crescer progressivamente no interior do sistema. À medida que esses cristais se desenvolvem os demais componentes do sistema, como solutos, partículas ou cadeias poliméricas, são progressivamente expulsos das regiões em solidificação e se acumulam entre os cristais em crescimento. Como resultado, forma-se uma estrutura heterogênea composta por regiões ricas em solvente congelado e regiões concentradas em material sólido. Dessa maneira, os cristais de gelo atuam como moldes temporários, definindo o espaço que posteriormente dará origem aos poros.

Após a solidificação completa do solvente, inicia-se a etapa de secagem sob condições de vácuo. Nessa fase, a pressão do sistema é reduzida a valores suficientemente baixos para que o solvente congelado seja removido diretamente por sublimação, sem passar pela fase líquida. Durante a sublimação do gelo, o material preserva a arquitetura definida na etapa de congelamento, que passa a constituir uma rede porosa contínua. Assim, a distribuição espacial, geometria e tamanho desses poros refletem, portanto, a configuração assumida pelos cristais durante o congelamento (Baraka; Labidi, 2024).

Após a secagem por sublimação, uma secagem secundária pode ser aplicada, destinada à remoção do solvente residual adsorvido à matriz sólida, contribuindo para aumentar a estabilidade final do material (Qian; Zhang, 2010). Essa etapa é realizada, por exemplo, em criogéis de carboximetil celulose (CMC), formados a partir de uma dispersão aquosa de CMC. (Yu; Budtova, 2024).

A secagem supercrítica constitui outro mecanismo relevante de obtenção de materiais porosos e é fortemente associada à produção de aerogéis. Diferentemente dos processos anteriores, nesse método a extração ocorre em condições nas quais o fluido utilizado se encontra no estado supercrítico. Nessa condição, o fluido deixa de apresentar uma separação definida entre as fases líquida e gasosa, passando a comportar-se como uma única fase homogênea (Baraka; Labidi, 2024).

O estado supercrítico é alcançado quando temperatura e pressão ultrapassam valores específicos denominados temperatura crítica e pressão crítica. Acima desses limites, a distinção

entre as fases líquida e vapor deixa de existir, fazendo com que o fluido apresente simultaneamente características de ambas as fases. Dessa maneira, o fluido passa a combinar elevada capacidade de difusão, característica dos gases, com maior capacidade de solvatação, típica dos líquidos (Li *et al.*, 2025).

Em geral, o processo se inicia com um gel precursor, cuja rede tridimensional formada durante a etapa de gelificação permanece preenchida pelo solvente utilizado em sua preparação, geralmente água. Entretanto, devido à baixa solubilidade da água em dióxido de carbono supercrítico (CO₂ supercrítico), sua remoção direta por esse método apresenta baixa eficiência. Por esse motivo, normalmente é necessária uma etapa prévia de troca de solvente, na qual a água presente nos poros é gradualmente substituída por solventes orgânicos, como etanol ou acetona, que apresentam maior afinidade com o CO₂. Essa substituição ocorre de forma progressiva por difusão, permitindo que o solvente inicialmente presente no interior da estrutura seja substituído por um fluido mais compatível com o processo de extração (Baraka; Labidi, 2024).

Após essa etapa, o gel é inserido em um sistema pressurizado, geralmente uma autoclave, onde ocorre a introdução de dióxido de carbono. Em seguida, a temperatura e a pressão são elevadas até que o CO₂ atinja o estado supercrítico. Nessas condições, o fluido difunde-se através da estrutura porosa e promove a extração gradual do solvente presente nos poros. Posteriormente, a pressão do sistema é reduzida de forma controlada, permitindo a remoção do CO₂ e resultando na obtenção do material seco. Esse processo é utilizado, por exemplo, na obtenção de aerogéis de polissacarídeos, como celulose, pectina e quitosana (Zou; Budtova, 2021).

4.3.1.3 Formação de poros por deposição de fibras

Em materiais fibrosos, a porosidade pode ser obtida da forma como os filamentos são depositados e organizados no espaço tridimensional. Nesse contexto, a porosidade é intrínseca ao processo de construção da rede e é governada pela incapacidade geométrica dos filamentos de ocupar completamente o volume disponível (Jin *et al.*, 2026). Devido à sua geometria alongada, as fibras se organizam por meio de contatos localizados, formando pontos de cruzamento e regiões de suporte mecânico. Entre essas regiões, permanecem espaços intersticiais que constituem os poros característicos do material. Dessa forma, a estrutura

resultante é composta por uma fase sólida contínua, representada pelas fibras, e por uma fase vazia interconectada distribuída ao longo da rede.

À medida que a deposição avança, novos filamentos são incorporados à estrutura em desenvolvimento, interagindo continuamente com a rede previamente estabelecida. Esse processo dinâmico torna a arquitetura final fortemente dependente do histórico de formação do material, uma vez que cada nova fibra modifica a geometria local e redistribui os espaços intersticiais. Como consequência, a porosidade evolui ao longo do processamento, adquirindo diferentes níveis de conectividade e continuidade espacial conforme a rede se consolida (Jun *et al.*, 2018).

Materiais amplamente utilizados como isolantes térmicos, como a lã de vidro e a lã mineral, constituem exemplos representativos de estruturas porosas obtidas a partir da organização 3D de fibras. Na produção desses materiais, utilizam-se matérias-primas minerais que são aquecidas a temperaturas elevadas até atingirem o estado fundido. No caso da lã de vidro, empregam-se principalmente areia rica em sílica, calcário, barrilha e vidro reciclado, enquanto a lã mineral é produzida predominantemente a partir de rochas vulcânicas, como o basalto, podendo incorporar outros resíduos minerais. Após a fusão, o material líquido é convertido em fibras por processos de centrifugação ou sopro. Na centrifugação, a massa fundida é expelida através de rotores de alta velocidade, promovendo o estiramento e a formação de filamentos finos. A ação dessas forças mecânicas origina filamentos minerais longos e de pequeno diâmetro, que posteriormente são depositados aleatoriamente, dando origem à estrutura fibrosa porosa do material (Schiavoni *et al.*, 2016).

4.3.2 Classificação dos poros em materiais sólidos

Dentro dessa rede porosa, os poros podem ser classificados segundo diferentes critérios, como sua origem, localização, conectividade e estrutura, os quais estão diretamente relacionados ao comportamento do material.

4.3.2.1 Classificação quanto à origem

Os poros podem ser classificados quanto à sua origem em intrínsecos e extrínsecos. Os poros intrínsecos, surgem no interior de partículas individuais e são geralmente considerados estruturalmente inerentes ao material, podendo se formar por processos naturais da partícula ou

por reações internas. Por outro lado, os poros extrínsecos podem se formar quando uma substância externa é incorporada ao material e depois removida, estabelecendo cavidades no material. Se a substância é totalmente eliminada, os poros resultantes são chamados de poros “puros”. Em outros casos, esses poros podem ser estabilizados por materiais estruturantes, formando os chamados poros do tipo “pillared”, nos quais a estrutura interna mantém a abertura e a organização do poro (Kaneko, 1994).

4.3.2.2 Classificação quanto à localização na estrutura

Considerando sua localização na estrutura, os poros podem ser classificados em intrapartículas e interpartículas. Essa distinção está relacionada à forma como a fase sólida se organiza no material, sendo especialmente relevante em sistemas constituídos por partículas. Os poros interpartículas se apresentam como espaços entre partículas densas, que não apresentam porosidade interna. Essas cavidades resultam do empacotamento das partículas e suas características dependem do tamanho, da forma e da maneira como essas partículas se organizam no espaço, influenciando diretamente a densidade aparente do material. Não obstante, em materiais nos quais as próprias partículas apresentam porosidade interna, a estrutura passa a conter simultaneamente dois tipos de vazios: aqueles localizados no interior das partículas e aqueles formados entre elas. Essa combinação resulta em uma organização estrutural mais complexa, na qual diferentes escalas de porosidade coexistem.

Os poros intrapartículas, localizados no interior das partículas, são geralmente menores e contribuem principalmente para o aumento da área superficial do material. Já os poros interpartículas, formados entre as partículas, exercem maior influência sobre a densidade aparente e a distribuição espacial da fase sólida, sendo determinantes para a estabilidade e a coerência da microestrutura (Rouquerol *et al.*, 1994).

4.3.2.3 Classificação quanto ao tamanho

A classificação dos poros em função do tamanho é uma das abordagens mais utilizadas na descrição de materiais porosos, uma vez que estruturas com diferentes dimensões e geometrias podem apresentar comportamentos distintos mesmo sob as mesmas condições. Apesar de sua ampla aplicação, não existe uma padronização única, já que os limites adotados variam

conforme o método de caracterização e a área de estudo. De modo geral, a classificação é baseada na largura característica do poro, definida como o diâmetro no caso de poros cilíndricos, a distância entre as faces em poros do tipo fenda ou a menor dimensão em poros do tipo fissura (Sing, 1985). Nesse contexto, a classificação proposta pela União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC) é a mais amplamente adotada, organizando os poros em três faixas principais de acordo com sua largura característica: macroporos (> 50 nm), mesoporos (2–50 nm) e microporos (< 2 nm) (Everett, 1972).

4.3.2.4 Classificação quanto à geometria dos poros

O formato e a configuração dos vazios exercem influência direta sobre a matriz, determinando o arranjo da fase sólida e a organização interna da rede porosa. Na prática, os poros raramente apresentam contornos regulares ou uniformes; sua morfologia resulta de processos como expansão, sinterização, reações químicas ou empacotamento de partículas, originando geometrias irregulares que são difíceis de descrever diretamente.

Buscando contornar essa complexidade, a análise da estrutura porosa geralmente se baseia em modelos geométricos idealizados, nos quais os poros são representados por formas simplificadas. Entre as geometrias mais comuns estão as formas cilíndricas, em fenda, cônicas e do tipo garrafa de tinta, além de variantes elípticas, romboidais e quadradas.. A Figura 6 apresenta exemplos dessas geometrias ideais frequentemente utilizadas na descrição de meios porosos. Embora essas representações não correspondam exatamente à estrutura real, elas permitem descrever o sistema de maneira mais clara, comparável e aplicável em análises quantitativas (Kaneko, 1994).

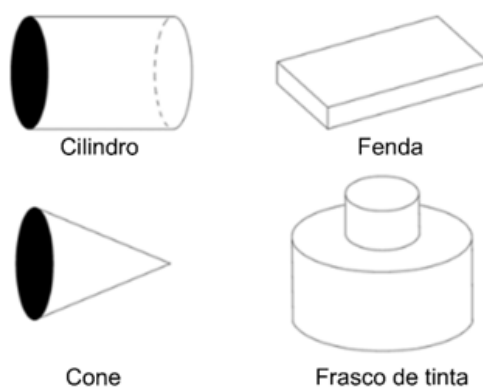


Figura 6. Classificação da estrutura dos poros. Kaneko, 1994.

Algumas dessas geometrias são mais frequentes em tipos específicos de materiais. Poros em fenda, por exemplo, são característicos de estruturas lamelares, como argilas e carvões ativados; poros cilíndricos ou prismáticos representam estruturas mais ordenadas; enquanto poros esféricos podem corresponder a cavidades internas ou aos vazios entre partículas aproximadamente esféricas, como ocorre em géis. Contudo, em um mesmo material, diferentes formas de poros podem coexistir, refletindo a complexidade intrínseca da estrutura porosa. Por essa razão, a geometria dos poros deve ser considerada em conjunto com parâmetros estruturais como tamanho, conectividade e distribuição espacial, garantindo uma caracterização mais completa e representativa da rede sólida (Gorman, 2015).

4.3.2.5 Classificação quanto à conectividade dos poros

A conectividade dos poros constitui um critério fundamental na caracterização de materiais porosos, uma vez que determina a existência de caminhos contínuos para o transporte de massa e energia no interior do material, influenciando diretamente a permeabilidade ao escoamento de fluidos e os mecanismos de transferência de calor. Em materiais de estrutura celular, como espumas e polímeros expandidos, amplamente empregados como isolantes térmicos, essa propriedade está associada ao tipo de célula predominante, podendo ser aberta ou fechada.

Os poros abertos estabelecem comunicação com a superfície do sólido, permitindo a penetração de fluidos e a ocorrência de transporte de massa no interior do material. Em função dessa conectividade, esses poros favorecem processos difusivos e o escoamento em escala microscópica. Dentro dessa categoria, distinguem-se os poros cegos, que se conectam ao exterior apenas por uma extremidade, limitando o acesso ao seu interior, e os poros passantes, que atravessam o material de uma face a outra, formando caminhos contínuos que contribuem para a interconectividade da rede porosa.

Em contraste, os poros fechados não apresentam comunicação com o meio externo, permanecendo isolados no interior da matriz sólida. Eles podem se originar durante o processamento do material, por exemplo, pelo aprisionamento de gases ou pela interrupção da formação de canais durante a expansão da estrutura. Alguns desses poros podem ser classificados como poros latentes, correspondendo a espaços estruturalmente presentes, porém inacessíveis a moléculas ou técnicas de caracterização, devido a restrições físicas ou químicas.

Embora não participem diretamente do transporte de massa, esses poros contribuem para a redução da densidade do material e para a distribuição de tensões na estrutura, auxiliando na manutenção da estabilidade da microestrutura.

A Figura 7 apresenta uma representação esquemática dos diferentes tipos de poros quanto à conectividade, incluindo poros abertos, fechados e configurações mistas, nas quais coexistem regiões interconectadas e isoladas (Zdravkov *et al.*, 2007).

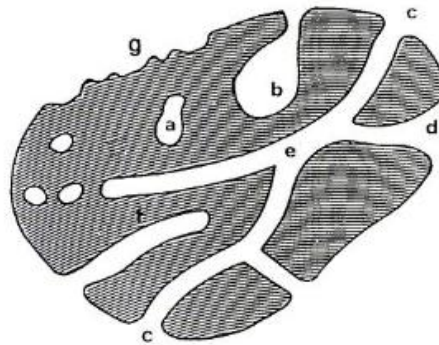


Figura 7. Representação esquemática dos diferentes tipos de poros quanto à conectividade: (a) poro fechado; (b) e (f) poros cegos; (c) e (d) poros abertos; (e) poro passante. IUPAC, 1994.

4.3.3 Tortuosidade

A tortuosidade é um parâmetro fundamental na descrição do espaço poroso em meios porosos naturais e artificiais (Ghanbarian *et al.*, 2013), sendo amplamente utilizada para caracterizar a complexidade das trajetórias de transporte de massa, energia e carga elétrica. De forma geral, ela é definida como a razão entre o comprimento efetivo do caminho percorrido através do meio poroso e o comprimento do caminho direto (Holzer *et al.*, 2023), evidenciando o fato de que partículas, moléculas ou fluxos raramente se deslocam em trajetórias retilíneas devido à geometria altamente sinuosa e interconectada do sistema poroso. Essa não linearidade dos caminhos faz com que a distância efetivamente percorrida seja significativamente maior do que a distância macroscópica entre entrada e saída do meio, influenciando diretamente propriedades como permeabilidade, difusividade, condutividade elétrica e transferência de calor (Srisutthiyakorn; Mavko, 2017).

O efeito da estrutura do espaço poroso pode ser visualizado de forma esquemática na Figura 8, a qual ilustra a discrepância entre o caminho macroscópico do fluxo e sua trajetória efetiva no interior do meio poroso.

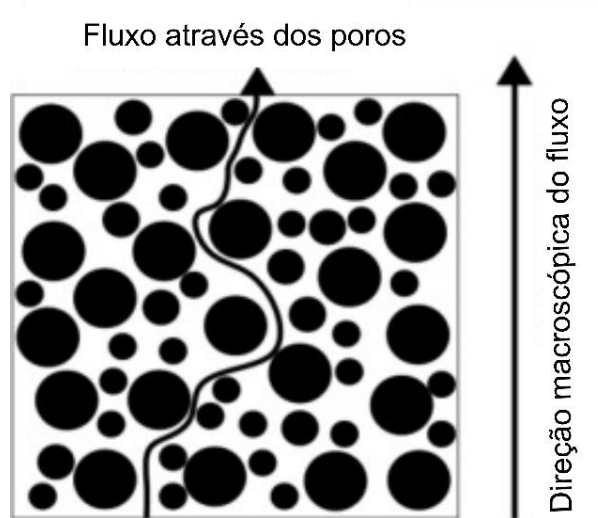


Figura 8. Esquema ilustrativo do transporte em meio poroso. da Silva, 2022 (Adaptado).

Matematicamente, a tortuosidade (τ) pode ser expressa como:

$$\tau = \frac{L_{eff}}{L_0} \quad (6)$$

em que L_{eff} representa o comprimento efetivo do caminho de transporte no interior do meio poroso, e L_0 corresponde ao comprimento do caminho direto.

Embora frequentemente tratada como um conceito simples, a tortuosidade depende diretamente da forma como o comprimento efetivo dos caminhos de transporte é definido e determinado, o que resulta em diferentes abordagens na literatura (Clennell, 1997). Essas abordagens podem ser, de maneira geral, agrupadas em duas perspectivas principais: geométrica e física. A perspectiva geométrica está associada apenas à complexidade dos caminhos imposta pela microestrutura, enquanto a perspectiva física considera, adicionalmente, os mecanismos de transporte envolvidos, como a difusão, o escoamento e a condução de calor.

4.3.4 Efeitos da morfologia na condutividade térmica de materiais isolantes

A transferência de calor em materiais isolantes é fortemente influenciada pela interação entre as fases sólida e gasosa presentes em sua estrutura e pela organização dessas fases dentro da matriz. A configuração e a distribuição dos poros na estrutura definem os percursos disponíveis para a propagação do calor, regulando de forma direta a eficácia do transporte térmico ao longo da matriz. Fatores estruturais como o tamanho dos poros, a porosidade, a tortuosidade da rede sólida e a conectividade da fase gasosa atuam de maneira integrada, determinando conjuntamente a condutividade térmica efetiva do material.

Em geral, a condução de calor ocorre predominantemente através da fase sólida, na qual a proximidade entre as partículas favorece a transferência de energia por meio de interações interatômicas. A fase gasosa, por outro lado, apresenta menor capacidade de condução devido ao maior espaçamento entre as moléculas, o que reduz a frequência de colisões responsáveis pelo transporte de energia, caracterizando-a como uma fase intrinsecamente mais isolante (Ding *et al.*, 2026). Dessa forma, como a condutividade térmica da fase sólida é, em geral, superior à da fase gasosa, o aumento da porosidade contribui para a redução da condutividade térmica efetiva do material.

O tamanho dos poros exerce influência significativa na transmissão de calor pela fase gasosa, pois determina a liberdade de movimento do gás e regula a forma como ele contribui para a transferência de calor. Em poros maiores, o gás pode transportar calor tanto por condução quanto por convecção, uma vez que o fluido possui liberdade suficiente para se movimentar no interior da estrutura; entretanto, em isolantes convencionais, onde comumente os poros possuem dimensões inferiores a aproximadamente 4 mm, a movimentação do fluido fica restrita, suprimindo as correntes convectivas e fazendo da condução o principal mecanismo de transporte de energia (Collishaw; Evans, 1994).

À medida que os poros diminuem, as moléculas de gás interagem com as paredes sólidas com maior frequência, tornando as colisões intermoleculares menos relevantes. Quando as dimensões dos poros se aproximam do caminho livre médio das moléculas, isto é, a distância percorrida entre colisões sucessivas (Pal, 2020), o transporte de energia passa a ser governado predominantemente pelas interações com as superfícies do poro. Esse fenômeno caracteriza o regime de Knudsen, que reduz de maneira significativa a condutividade térmica da fase gasosa (Ding *et al.*, 2026).

O efeito do regime de Knudsen é particularmente evidente em materiais com poros em escala nanométrica, como nos aerogéis e criogéis, cuja dimensão dos poros, em geral, é

equivalente ou inferior ao livre caminho médio de uma molécula. Aerogéis à base de nanocelulose, com poros na faixa de dezenas de nanômetros, apresentam condutividade térmica próxima de $0,018 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, enquanto aerogéis de sílica, com poros ainda menores, podem atingir valores em torno de $0,013 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (Liu; Zhao, 2022). Esses exemplos demonstram que a redução do tamanho dos poros e o confinamento do gás tornam o transporte de calor na fase gasosa progressivamente menos eficiente (Liu; Zhao, 2022).

Com a limitação da contribuição da fase gasosa, o transporte de calor passa a depender de forma mais significativa dos caminhos disponíveis na estrutura sólida remanescente. Nesse cenário, a tortuosidade da rede de condução emerge como um parâmetro determinante, ao controlar o grau de desvio e a complexidade dos percursos efetivamente seguidos pelo fluxo térmico. Na prática, isso significa que o calor deixa de se propagar de forma direta e passa a seguir trajetórias irregulares ao longo da estrutura, sendo continuamente desviado ao contornar os poros e as interfaces entre as fases. Como resultado, o percurso de transferência de energia torna-se mais longo e menos eficiente. Além disso, a existência de múltiplos caminhos possíveis faz com que o calor se distribua por diferentes trajetórias ao longo da matriz, em vez de se concentrar em um único percurso preferencial. Esse espalhamento do fluxo reduz a intensidade da condução em cada caminho individual e aumenta a resistência global ao transporte de calor, resultando na diminuição da condutividade térmica do material (Ding *et al.*, 2026).

A conectividade da fase gasosa atua como fator complementar, definindo se os poros estão interligados, formando uma rede contínua, ou isolados por paredes sólidas. Em materiais de célula aberta, a interligação dos poros cria múltiplos caminhos potenciais para a condução de calor; entretanto, essa continuidade não garante aumento da eficiência térmica, pois o transporte de calor ainda é condicionado pelo tamanho reduzido dos poros e pela elevada tortuosidade da rede. Em muitos isolantes de célula aberta, como a lã de vidro, essas características restringem a mobilidade do gás e suprimem a convecção interna, mantendo o transporte de calor predominantemente por condução. Apesar de possuir células abertas, a pequena escala dos poros e a elevada tortuosidade impedem que a continuidade da fase gasosa aumente a transferência de calor, demonstrando que esse tipo de poro sozinho também pode formar estruturas com baixa condutividade térmica.

Em contraste, materiais com células fechadas apresentam poros isolados entre si, separados por paredes sólidas contínuas, que interrompem a conectividade da fase gasosa ao longo da estrutura. Dessa forma, não há formação de caminhos percolantes para o fluxo térmico no gás,

e o transporte de calor nessa fase fica restrito ao interior de cada poro individual. Nessas condições, o transporte global de energia passa a ser dominado pela fase sólida e pelas interfaces sólido–gás, enquanto a contribuição do gás permanece local (Liu; Zhao, 2022).

Em síntese, a transferência de calor em materiais isolantes reflete a interação complexa entre a fase sólida, a fase gasosa e a configuração da estrutura porosa. A condutividade térmica efetiva não pode ser determinada por um único fator isolado; ela emerge da combinação integrada de tamanho de poros, tortuosidade, conectividade e tipo de célula, que juntos modulam os caminhos disponíveis para a propagação de energia, definindo o comportamento térmico global do material.

4.4 Análise morfológica de materiais isolantes

A estrutura morfológica de materiais espumados é determinada ao longo do próprio processo de expansão, sendo resultado da evolução contínua das bolhas gasosas formadas durante a geração de gás no sistema. À medida que os gases se acumulam e difundem para o interior das bolhas, ocorre aumento progressivo do volume ocupado pela fase gasosa. Inicialmente, essas bolhas apresentam geometria aproximadamente esférica; no entanto, conforme a expansão prossegue e o espaço disponível se torna limitado, elas sofrem compressão mútua, perdendo a forma esférica e adquirindo geometrias poliédricas (Figura 9).

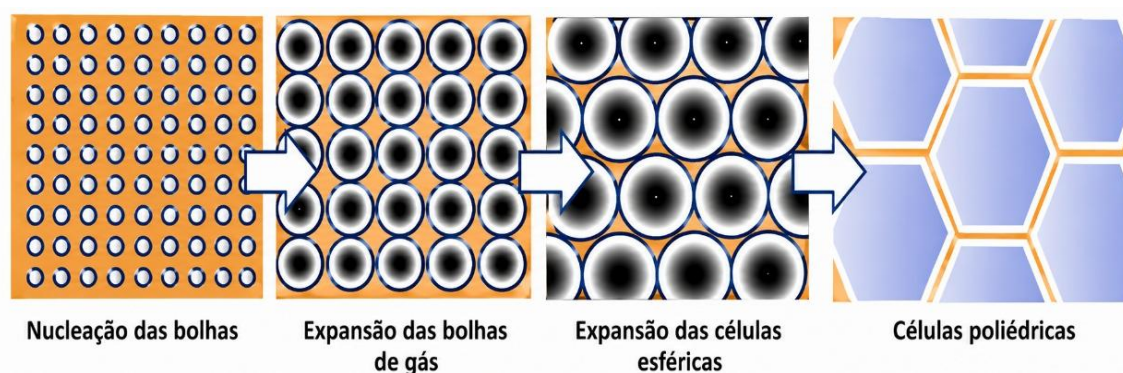


Figura 9. Esquema representativo da evolução da formação celular em espumas poliméricas durante o processo de expansão. Verdolotti, 2017.

Esse rearranjo estrutural marca a transição para a formação da arquitetura celular característica de espumas, que pode ser descrita por modelos poliédricos de preenchimento

espacial. A Figura 10 apresenta um exemplo ilustrativo dessa geometria poliédrica em espumas de poliuretano, mostrando tanto o modelo individual de célula quanto o arranjo resultante do empacotamento celular durante a expansão, evidenciando como as bolhas se ajustam mutuamente ao crescer.

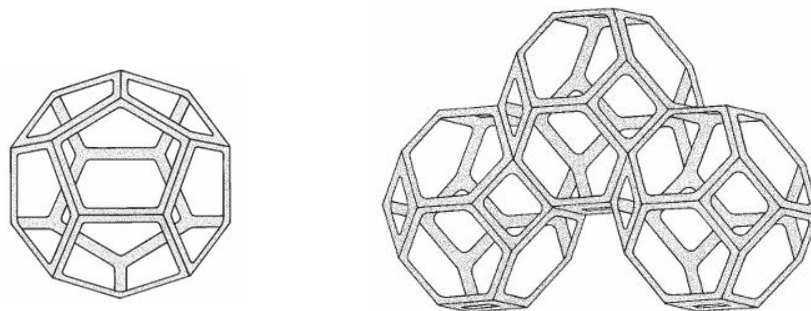


Figura 10. Representação esquemática da geometria poliédrica das células em espumas de poliuretano. À esquerda, modelo individual de célula; à direita, arranjo resultante do empacotamento celular durante a expansão da espuma. Beckerdite, 1991.

Durante a expansão, a fase sólida do material ainda mantém mobilidade suficiente para se redistribuir conforme a espuma se forma. À medida que as células crescem e entram em contato umas com as outras, o material sólido tende a migrar para os pontos de encontro entre três ou mais células, originando regiões mais espessas denominadas *Plateau borders*. Esse movimento do material não apenas reforça essas interseções, como também provoca o afinamento gradual das membranas que delimitam cada célula. Paralelamente, a drenagem do material sólido, impulsionada pelo crescimento das células e por diferenças locais de pressão, reorganiza continuamente a estrutura, determinando características morfológicas essenciais, como a espessura das membranas, a forma e o tamanho dos poros e a estabilidade da rede porosa após o endurecimento. Dessa forma, a distribuição do material sólido durante a expansão é determinante para a sustentação da arquitetura celular e para a configuração final da espuma, influenciando diretamente a conectividade entre os poros e a integridade estrutural do material.

À medida que as membranas se tornam mais finas, sua estabilidade depende do equilíbrio entre expansão das células e aumento da viscosidade do sistema. Quando o material sólido adquire rigidez antes de ocorrer ruptura significativa das membranas, estas permanecem preservadas, mantendo o isolamento entre células vizinhas e favorecendo a formação de uma estrutura com maior proporção de células fechadas. Por outro lado, se as membranas afinam além de sua resistência enquanto ainda há mobilidade suficiente, ocorre ruptura das paredes

intercelulares, criando passagens entre células adjacentes e estabelecendo uma rede porosa interconectada, característica de espumas de células abertas. A abertura celular tende a ocorrer próximo ao final da expansão, quando a pressão interna das bolhas aumenta, mas a viscosidade das membranas já limita sua deformação.

As diferentes respostas das membranas celulares durante a expansão influenciam diretamente a arquitetura final do material, evidenciando-se em análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nas espumas de poliuretano, por exemplo, essa variação morfológica é claramente visualizada: Em espumas flexíveis (Figura 11), observa-se uma rede altamente interconectada, na qual predominam aberturas entre células adjacentes decorrentes da ruptura parcial ou total das membranas nos estágios finais da espumação. Como resultado, a fase sólida concentra-se principalmente nas regiões remanescentes após a drenagem do polímero, formando uma rede contínua que sustenta a arquitetura expandida. Essa elevada conectividade entre poros confere maior deformabilidade à espuma, além de favorecer sua permeabilidade.

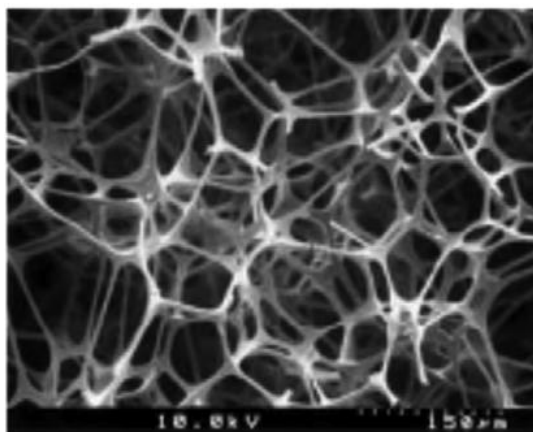


Figura 11. MEV de espuma de poliuretano flexível evidenciando morfologia de células abertas e interconectadas. Verdolotti, 2017 (Adaptado).

Por outro lado, espumas rígidas (Figura 12) apresentam células mais individualizadas, delimitadas por membranas preservadas e com menor comunicação entre cavidades vizinhas. Nesses casos, o endurecimento da matriz polimérica ocorre antes da ruptura significativa das membranas, estabilizando a estrutura ainda durante a expansão. Observa-se também maior acúmulo de material nas interseções entre células, resultado da redistribuição do polímero ao longo do crescimento celular, o que contribui para uma arquitetura mais compacta, associada a maior estabilidade estrutural e menor permeabilidade.

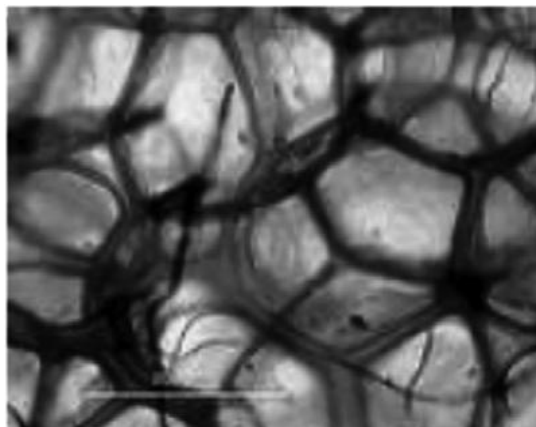


Figura 12. MEV de espuma de poliuretano rígida evidenciando morfologia de células fechadas e preservação das paredes celulares. Verdolotti, 2017 (Adaptado).

Assim, o estudo das espumas de poliuretano, com a integração das micrografias de células abertas e fechadas, permite compreender visualmente como o equilíbrio entre crescimento celular, drenagem do material sólido e endurecimento influencia o formato final dos poros e a conectividade da rede, princípios que podem ser aplicados a qualquer sistema em que um gás seja gerado para expandir um material (Beckerdite; Herrington; Hock, 1991) (Verdolotti *et al.*, 2017).

Como exemplo representativo das diferentes arquiteturas celulares encontradas em espumas poliméricas comerciais, são apresentadas microscopias de materiais amplamente utilizados como isolantes térmicos (Figura 13).

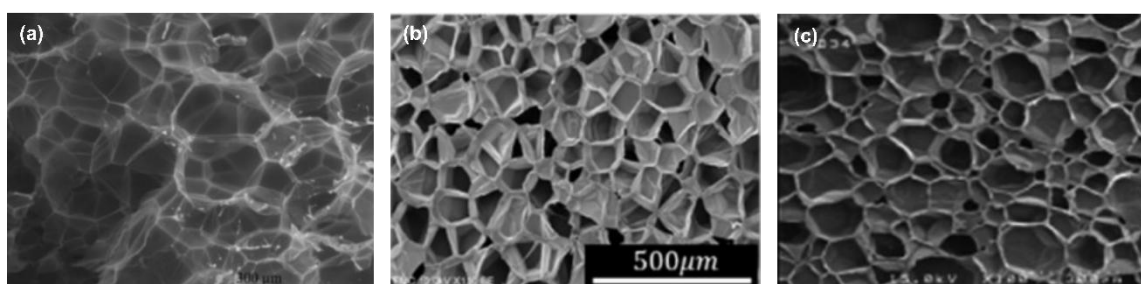


Figura 13. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de (a) poliestireno expandido (EPS) (Ogam, 2016); (b) poliestireno extrudado (XPS) (Torre, 2024) e (c) polietileno (Rezaei, 2014).

De forma a complementar essa análise qualitativa, apresenta-se na Tabela 1 uma comparação de valores típicos de condutividade térmica associados a diferentes classes de espumas poliméricas, relacionando o desempenho térmico às respectivas características estruturais.

Tabela 1. Relação entre estrutura celular e condutividade térmica em espumas poliméricas comerciais utilizadas como materiais isolantes. Dados de Comite, 2015.

Material	Condutividade Térmica (W/m·K)	Característica Morfológica Predominante
PU	0,020 – 0,030	Células abertas ou fechadas (dependente da formulação e grau de expansão)
EPS	0,030 – 0,040	Células fechadas
XPS	0,030 – 0,040	Células fechadas e uniformes
EPE	0,035 – 0,045	Células fechadas e abertas de tamanhos não homogêneos

Em materiais porosos obtidos por remoção de solvente, a evolução morfológica ocorre por mecanismos distintos daqueles observados em sistemas espumados, uma vez que a arquitetura porosa não é determinada pela expansão e interação entre bolhas gasosas, mas pelos fenômenos físicos associados à eliminação da fase líquida inicialmente presente no material precursor. Nesses sistemas, a configuração final dos poros depende não apenas da formação dos espaços vazios decorrentes da remoção do solvente, mas principalmente da capacidade da matriz sólida em preservar sua organização estrutural ao longo do processo de secagem. Assim, características como tamanho dos poros, conectividade, orientação espacial, área superficial específica e grau de retração resultam do equilíbrio entre a geração da porosidade e as deformações induzidas durante a consolidação da rede sólida.

Durante a formação inicial do material, seja na forma de solução, suspensão ou gel, o solvente encontra-se distribuído continuamente entre os constituintes sólidos do sistema, preenchendo os espaços existentes na rede em desenvolvimento. Quando o processo de secagem é iniciado, esse solvente passa a ser removido progressivamente, enquanto a matriz sólida permanece organizada ao redor das regiões anteriormente ocupadas pela fase líquida. Em princípio, a eliminação do solvente poderia ser interpretada apenas como a geração de espaços vazios que, posteriormente, constituirão os poros. Entretanto, a remoção da fase líquida também induz alterações mecânicas na estrutura, fazendo com que o próprio processo responsável pela formação dos poros possa, simultaneamente, promover sua deformação.

À medida que a secagem avança, o volume de solvente presente no interior da estrutura diminui gradualmente. Como consequência, o líquido deixa de preencher completamente os

espaços existentes na rede sólida e passa a permanecer apenas em regiões confinadas, situadas entre paredes adjacentes do material. Nessas condições, a interface estabelecida entre o líquido remanescente e o ar já não consegue manter configuração plana e passa a adquirir curvatura (menisco).

A formação dos meniscos está diretamente relacionada ao comportamento intermolecular do próprio líquido. Enquanto moléculas localizadas no interior da fase líquida encontram-se submetidas a interações distribuídas em todas as direções, moléculas presentes na superfície experimentam um desequilíbrio dessas interações devido à ausência de moléculas vizinhas acima da interface. Como consequência, estabelece-se uma tendência espontânea à redução da área superficial exposta, fenômeno conhecido como tensão superficial. Em regiões confinadas, as interações do líquido com a superfície sólida favorece o desenvolvimento de interfaces curvas. Embora essa curvatura possa, inicialmente, parecer apenas uma alteração geométrica da superfície líquida, seus efeitos sobre a estrutura sólida são significativos. A presença do menisco gera diferenças de pressão entre o interior do líquido e o meio externo, produzindo as chamadas pressões capilares. Como resultado, o líquido remanescente passa a exercer forças que tendem a aproximar as superfícies sólidas entre as quais permanece confinado.

Em termos estruturais, esse comportamento pode ser interpretado como o desenvolvimento de tensões compressivas sobre a rede do material. Dessa forma, enquanto a remoção do solvente promove a geração dos espaços vazios responsáveis pela formação da porosidade, as tensões capilares desenvolvidas simultaneamente atuam em sentido oposto, induzindo aproximação entre paredes porosas adjacentes e favorecendo a contração da estrutura. Assim, durante a secagem, estabelece-se uma competição contínua entre dois processos opostos: a formação dos poros e a retração da matriz sólida.

Como resultado, a secagem deixa de ser apenas um processo de eliminação do solvente e passa a atuar como um mecanismo contínuo de reorganização estrutural. À medida que as tensões desenvolvidas no interior da matriz aumentam, a arquitetura inicialmente formada pode sofrer diferentes níveis de modificação, variando desde discretas retrações da estrutura até alterações mais pronunciadas associadas à compactação da rede porosa. Em condições nas quais essas deformações se tornam mais intensas, observa-se redução do volume poroso, diminuição da conectividade entre cavidades adjacentes e maior densificação do material. Sob tensões

ainda mais elevadas, pode ocorrer colapso parcial da rede, comprometendo a preservação da organização tridimensional originalmente estabelecida.

Dessa maneira, a morfologia final dos materiais obtidos por remoção de solvente deixa de refletir exclusivamente o mecanismo responsável pela geração inicial dos poros e passa a depender também da intensidade das tensões desenvolvidas durante a secagem e da capacidade da matriz sólida em resistir às deformações induzidas. Como consequência, diferentes condições de secagem podem resultar em níveis distintos de retração, conectividade entre poros e preservação da arquitetura originalmente formada. Isso ocorre porque a magnitude das tensões capilares varia conforme características do próprio sistema, incluindo propriedades do solvente, velocidade de secagem, resistência mecânica da matriz e dimensões dos poros. Em poros menores, por exemplo, a maior curvatura dos meniscos favorece diferenças de pressão mais elevadas, intensificando as forças compressivas sobre a estrutura e aumentando a tendência à retração durante o processo de secagem.

Na secagem por evaporação, a remoção do solvente ocorre gradualmente a partir do estado líquido, mantendo por períodos prolongados a coexistência entre as fases líquida e gasosa no interior da estrutura. Nessas condições, tornam-se frequentes processos de retração estrutural, aproximação entre paredes porosas adjacentes e densificação progressiva da matriz. Em situações mais intensas, essas deformações podem levar ao colapso parcial dos poros originalmente formados, comprometendo a preservação da organização tridimensional inicial. Consequentemente, materiais obtidos tendem a apresentar maior retração volumétrica, menor preservação estrutural e redução da porosidade efetiva quando comparados a materiais produzidos por métodos capazes de minimizar tensões capilares. A influência desses fenômenos sobre a organização final do material pode ser exemplificada na imagem de uma parede de um xerogel de lignina apresentado na Figura 14. O xerogel apresenta estrutura compacta, com camadas irregulares de elevada irregularidade superficial. Essa organização sugere aproximação entre os constituintes durante a secagem, favorecendo estruturas mais densas e com menor preservação da arquitetura dos sistema precursor.

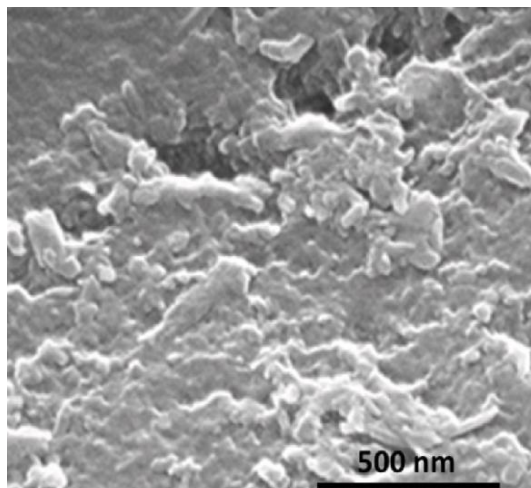


Figura 14. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície de um xerogel de lignina obtido por secagem evaporativa. Al-Hamamre, 2025.

Diferentemente da secagem por evaporação, na liofilização, o solvente é inicialmente congelado e posteriormente removido por sublimação, passando diretamente do estado sólido para o vapor. Como consequência, a remoção do solvente ocorre com menor desenvolvimento das tensões responsáveis pela deformação da matriz durante a secagem, uma vez que a formação de interfaces líquido-vapor no interior dos poros é significativamente reduzida. Dessa forma, a estrutura sólida tende a sofrer menor retração e menor reorganização induzida durante a remoção do solvente, favorecendo maior preservação da arquitetura congelada. Em função disso, a evolução morfológica do material passa a depender menos dos efeitos associados à compactação estrutural e mais dos fenômenos envolvidos na etapa de congelamento.

Nessas condições, os cristais formados durante o congelamento atuam como moldes temporários para a geração da porosidade. Após a sublimação, os espaços anteriormente ocupados pelo solvente sólido tornam-se cavidades, de modo que as dimensões, distribuição e organização dos poros passam a refletir diretamente a dinâmica de nucleação e crescimento cristalino ocorrida durante o resfriamento.

A velocidade de congelamento constitui um dos principais fatores responsáveis pelo controle dessa morfologia. Resfriamentos rápidos promovem elevada taxa de nucleação, favorecendo a formação simultânea de grande quantidade de núcleos cristalinos em curtos intervalos de tempo. Como consequência, o crescimento individual dos cristais se limita, resultando em estruturas cristalinas menores e mais numerosas. Após a remoção do solvente,

essas condições tendem a originar materiais com poros mais finos, distribuição mais homogênea e menor evidência de estruturas lamelares. Em contrapartida, congelamentos lentos reduzem a taxa de nucleação inicial e favorecem o crescimento prolongado dos cristais já formados, permitindo o desenvolvimento de cristais maiores, que geram cavidades mais amplas e redes porosas menos homogêneas. Esse efeito pode ser observado na Figura 15, em que diferentes temperaturas de congelamento resultam em alterações expressivas na morfologia e na dimensão dos poros.

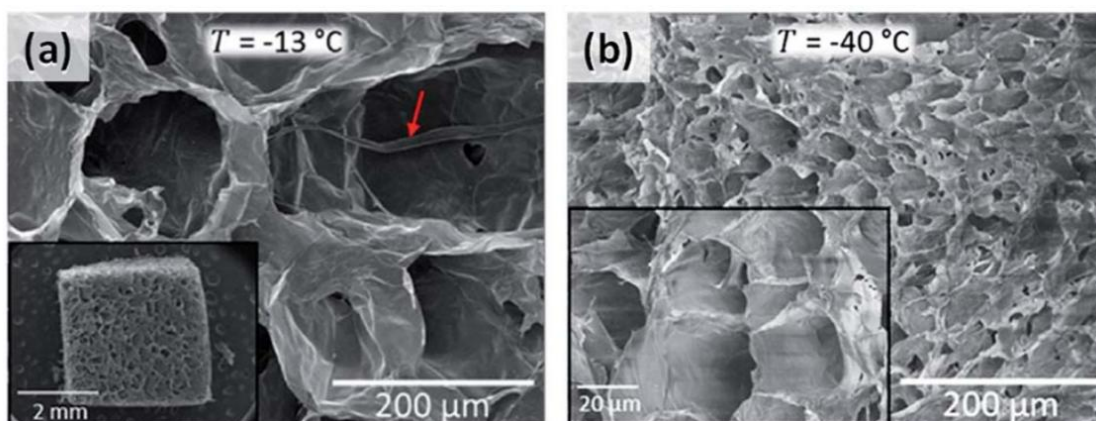


Figura 15. Influência da temperatura de congelamento na morfologia e estrutura porosa de criogéis de nanocelulose obtidas por congelamento homogêneo: (a) $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ e (b) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, evidenciando alterações no tamanho e organização dos poros. Lavoine, 2017.

Além da taxa de congelamento, a forma como o gradiente térmico se estabelece durante o resfriamento exerce influência significativa sobre a arquitetura porosa resultante. Em congelamentos convencionais, a nucleação e o crescimento dos cristais ocorrem em múltiplas direções, originando estruturas mais isotrópicas, nas quais os poros apresentam distribuição relativamente aleatória ao longo do material. Em contrapartida, quando o sistema é submetido a um gradiente térmico definido, estabelece-se o chamado congelamento direcional, no qual a frente de congelamento avança preferencialmente em uma única direção.

Após a sublimação do solvente, são obtidas estruturas anisotrópicas, com canais contínuos e alinhados. A influência do modo de congelamento sobre a organização estrutural pode ser observada na Figura 16, que compara morfologias obtidas por congelamento convencional e por congelamento direcional, evidenciando diferenças marcantes no alinhamento e na distribuição dos poros.

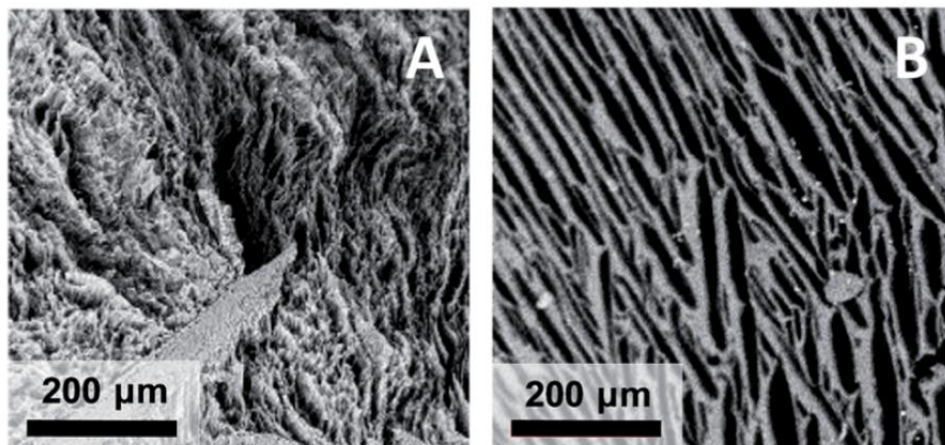


Figura 16. Influência do método de congelamento na morfologia porosa de criogéis de nanocelulose: estruturas obtidas por congelamento convencional (A) e congelamento direcional (B), evidenciando diferenças no alinhamento dos poros. Lavoine, 2017.

Em função desses mecanismos, materiais obtidos por liofilização frequentemente apresentam elevada interconectividade entre poros, menor densificação estrutural e maior preservação da rede tridimensional originalmente formada quando comparados a materiais produzidos por secagem ambiente. Em análises morfológicas, essas estruturas tendem a exibir cavidades abertas e redes porosas contínuas, cuja organização reflete diretamente as condições de congelamento empregadas durante o processamento (Lavoine; Bergström, 2017; Martoia *et al.*, 2016; Qian; Zhang, 2010). A Figura 17 ilustra uma morfologia típica observada em criogéis obtidos por liofilização, evidenciando a preservação da estrutura porosa após remoção do solvente por sublimação.

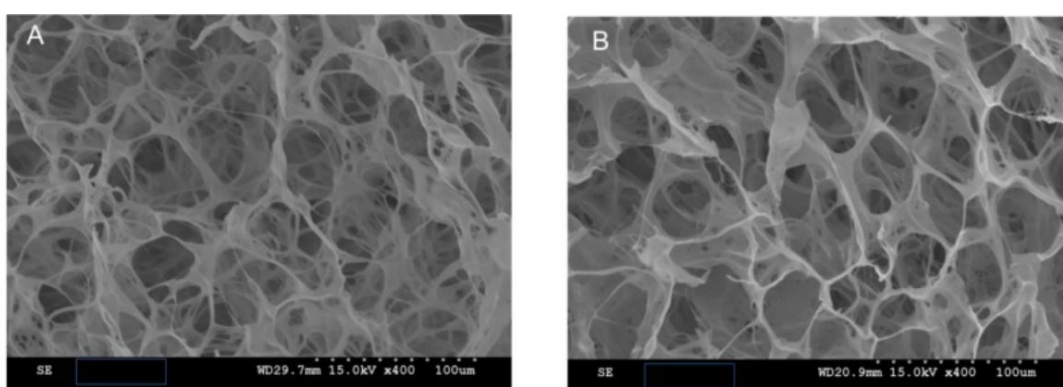


Figura 17. Morfologia porosa de criogel de CHC obtido por liofilização observada por MEV: (A) superfície e (B) seção transversal interna. Chen, 2025.

Em processos de secagem supercrítica, a evolução morfológica do material ocorre por mecanismos distintos daqueles observados tanto na secagem evaporativa quanto na liofilização. Nessa técnica, após a substituição do solvente original por um fluido miscível ao dióxido de carbono, a remoção é realizada sob condições de temperatura e pressão acima do ponto crítico do sistema. Nessas condições, desaparece a distinção entre fase líquida e fase gasosa, estabelecendo-se uma única fase supercrítica. Como consequência, a extração do solvente ocorre sem a formação de interfaces líquido-vapor no interior da estrutura e, portanto, com redução significativa das tensões capilares responsáveis pela compressão da rede sólida durante a secagem convencional.

A ausência dessas forças compressivas modifica profundamente a dinâmica de preservação estrutural do material, diferentemente de processos evaporativos. Dessa forma, a arquitetura estabelecida durante a gelificação ou organização inicial do sistema tende a sofrer menor reorganização ao longo da secagem, favorecendo maior preservação da configuração tridimensional originalmente formada. No entanto, a configuração pode ser afetada nas etapas de trocas de solvente, onde a fase dispersa pode se reorganizar ou contrair ao diminuir a polaridade do solvente. Essas mudanças são menos expressivas que as realizadas por congelamento, como nos processos de liofilização. Assim, a arquitetura final de um aerogel tende a refletir mais diretamente a rede tridimensional originalmente presente no estado hidratado.

Em particular, a secagem supercrítica de géis tem sido amplamente descrita como uma técnica eficiente para obtenção de aerogéis capazes de manter sua morfologia nativa em micro e nanoescala, uma vez que estruturas delicadas previamente organizadas durante a formação do gel tendem a permanecer preservadas após a remoção do solvente. Como consequência, materiais obtidos por esse método frequentemente apresentam elevada porosidade, altas áreas superficiais específicas e menor retração estrutural. Em geral, os aerogéis apresentam maior conectividade entre poros que os criogéis e menor densificação da matriz em comparação aos xerogéis. Na estrutura de aerogéis, podem ser observados elementos nanométricos originalmente presentes na rede do gel, incluindo arranjos porosos finos, agregados particulados e estruturas nanofibrosas. (Baldino *et al.*, 2015; Baraka; Labidi, 2024).

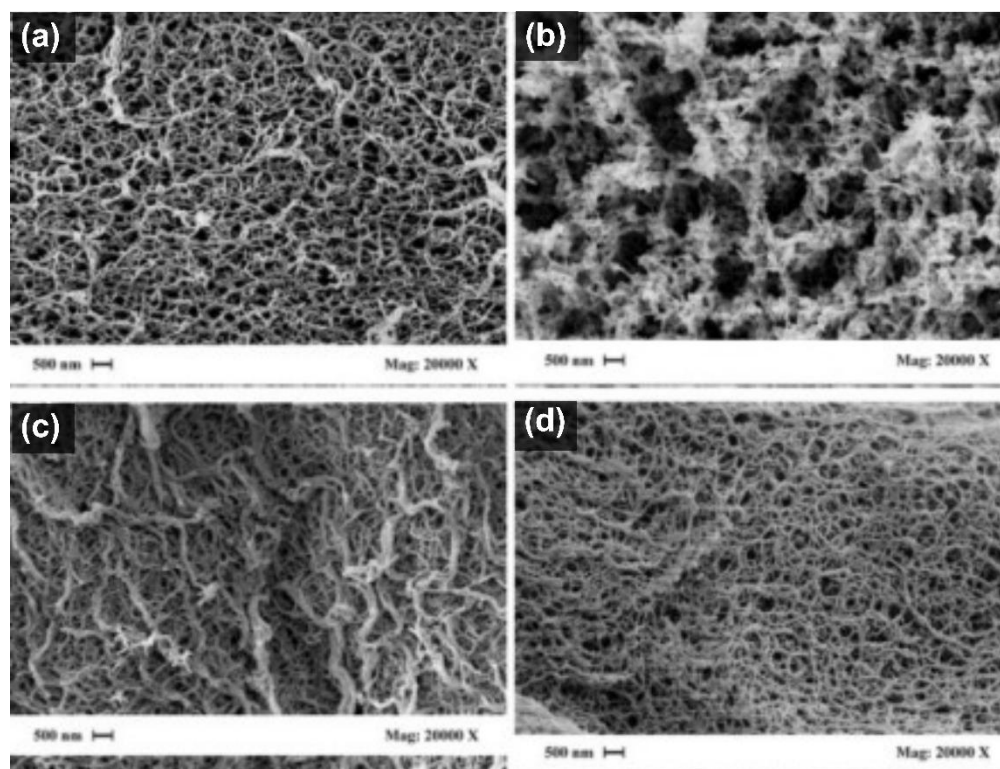


Figura 18. Microscopias MEV-FEG de aerogéis de quitosana obtidos por secagem supercrítica: (a) quitosana; (b) quitosana:glutaraldeído; (c) quitosana:glutaraldeído; (d) quitosana:glutaraldeído. Baldino, 2015.

A morfologia típica observada em aerogéis obtidos por secagem supercrítica pode ser visualizada na Figura 18. Observa-se uma rede porosa altamente aberta, formada por elementos estruturais finos interconectados, evidenciando preservação da organização desenvolvida antes da etapa de secagem.

Em materiais formados por deposição de fibras, a arquitetura porosa resulta diretamente da forma como os filamentos se distribuem e se acomodam no espaço durante a consolidação do sistema. Diferentemente de processos baseados em formação ou remoção de fases fluidas, a configuração final é definida pela organização progressiva de uma rede sólida de elementos alongados, cuja disposição espacial estabelece tanto os vazios intersticiais quanto os caminhos de conectividade ao longo do material.

Nesse contexto, a compactação da rede desempenha papel central na definição da morfologia dos poros, uma vez que controla simultaneamente a densidade de contatos entre filamentos e a distância média entre pontos de conexão. Quando o empacotamento é mais intenso, há maior frequência de interações interfibras, o que reduz o espaço disponível entre os

elementos e favorece a formação de regiões intersticiais menores e mais subdivididas. Por outro lado, quando a rede se forma de maneira menos compacta, a menor densidade de conexões permite a manutenção de espaços mais amplos entre os filamentos, resultando em poros de maior escala característica. Assim, a variação do empacotamento ao longo do processamento tem impacto direto na distribuição espacial dos vazios e na continuidade da estrutura formada.

As características geométricas individuais dos filamentos modulam de forma significativa esse comportamento. O diâmetro das fibras influencia a forma como os contatos são estabelecidos no interior do material, uma vez que filamentos mais espessos ocupam maior volume e tendem a reduzir a eficiência de empacotamento, mantendo maiores distâncias entre pontos de conexão. Já fibras mais finas apresentam maior capacidade de acomodação entre vizinhas, favorecendo o aumento da densidade local de contatos e contribuindo para a redução progressiva do tamanho dos espaços intersticiais.

Além dos parâmetros geométricos individuais e do nível global de compactação, a orientação espacial das fibras durante a deposição exerce influência direta sobre a configuração final do sistema fibroso. Em arranjos com deposição predominantemente aleatória, estabelece-se uma distribuição tridimensional desordenada, caracterizada por elevada heterogeneidade espacial e ampla variabilidade na forma e dimensão dos poros. Nessas condições, regiões localmente densas coexistem com áreas mais abertas ao longo do material. Por outro lado, quando há alinhamento parcial ou direcional dos filamentos, a rede adquire caráter anisotrópico, com orientação preferencial em uma determinada direção. Como consequência, os poros passam a apresentar maior organização direcional, formando regiões alongadas e caminhos preferenciais de fluxo ao longo da estrutura.

Na formação da rede, filamentos mais longos tendem a percorrer maiores distâncias dentro do volume, estabelecendo conexões mais espaçadas e reduzindo a frequência de interrupções ao longo de sua trajetória. Isso resulta em menor compactação local, com preservação de regiões vazias mais extensas e maior continuidade entre espaços interconectados. Em contrapartida, fibras mais curtas aumentam a densidade de extremidades e pontos de junção por unidade de volume, intensificando as interações entre filamentos e favorecendo um empacotamento mais eficiente (Figura 19).

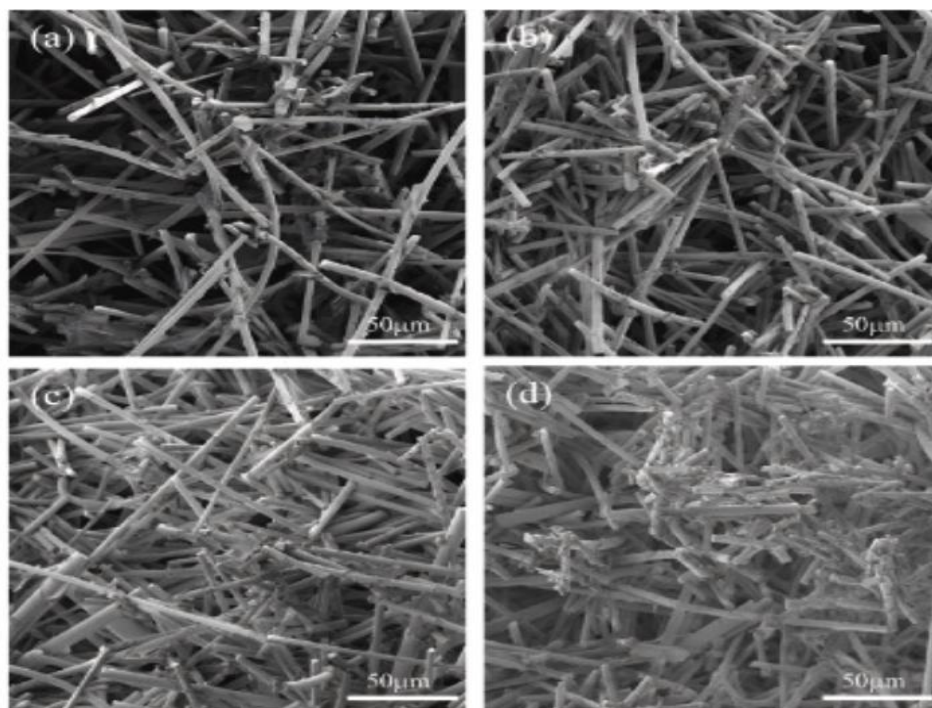


Figura 19. MEV de cerâmicas porosas reforçadas com fibras submetidas a diferentes tempos de moagem: (a) 10 s; (b) 20 s; (c) e (d) 30 s, evidenciando a redução do comprimento das fibras com o aumento do tempo de moagem. Song, 2026.

Durante a consolidação do material, essas diferenças geométricas também influenciam a capacidade de rearranjo dos filamentos. Sistemas baseados em fibras mais longas tendem a apresentar maior restrição cinética ao reordenamento, o que favorece configurações mais abertas e menos compactas. Já conjuntos formados por fibras curtas permitem maior mobilidade local durante o empacotamento, ocupando regiões previamente vazias e contribuindo para o aumento da densificação global do sistema.

A influência desses parâmetros pode ser observada em sistemas fibrosos convencionais amplamente utilizados como isolantes térmicos, nos quais a arquitetura tridimensional da rede desempenha papel determinante no comportamento macroscópico do material. Nesse contexto, micrografias de lã de vidro e lã de rocha são apresentadas como exemplos representativos dessas diferentes configurações estruturais (Figura 20), permitindo correlacionar diretamente a morfologia da rede fibrosa com suas implicações no transporte térmico (Jun *et al.*, 2018).

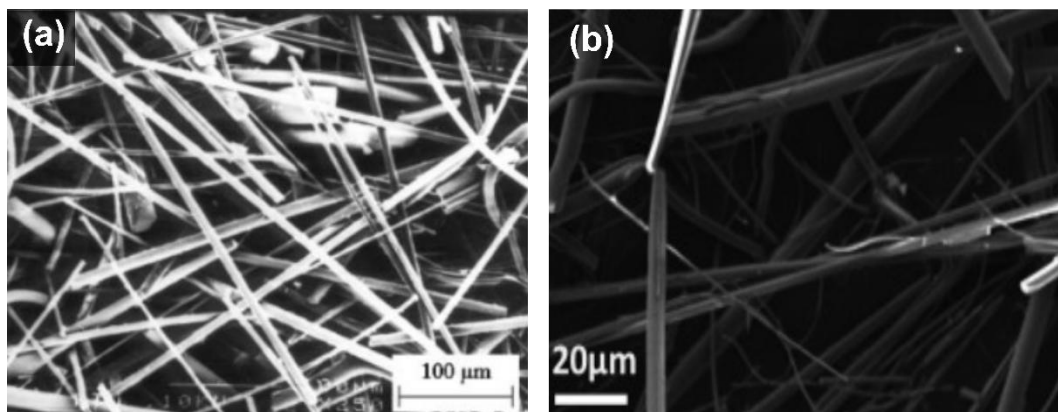


Figura 20. Microscopias eletrônicas de varredura (MEV) da (a) lã de rocha (Lemougna, 2020) e (b) lã de vidro (Öztürk, 2013).

A estrutura de lãs minerais, como a lã de vidro e a lã de rocha, é dominada por uma rede de fibras alongadas, finas e dispostas de forma aleatória, cuja organização espacial define um sistema de poros interconectados responsável pelo desempenho de isolamento térmico. Apesar dessa base estrutural comum, diferenças significativas são observadas entre os materiais. A lã de vidro apresenta fibras mais finas e lisas, com distribuição dimensional mais homogênea e comportamento estrutural tendendo à isotropia. Já a lã de rocha é composta por fibras mais espessas e superficialmente mais irregulares, frequentemente associadas à presença de inclusões e maior heterogeneidade morfológica, o que resulta em um grau mais pronunciado de anisotropia e elevada porosidade, podendo atingir valores próximos de 98% dependendo do processo de fabricação (Ho *et al.*, 2024; Meftah *et al.*, 2019).

De forma a correlacionar essas diferenças estruturais ao desempenho térmico, a Tabela 2 reúne valores típicos de condutividade térmica juntamente com as principais características morfológicas associadas a cada sistema fibroso.

Tabela 2. Influência da estrutura fibrosa na condutividade térmica de lãs minerais isolantes. Dados de Karnick, 2026.

Material	Condutividade Térmica (W/m·K)	Característica Morfológica Predominante
Lã de rocha	0,033 – 0,046	Rede aleatória, heterogênea e menos uniforme
Lã de vidro	0,023 – 0,040	Rede aleatória, homogênea e altamente conectada

4.5 Materiais isolantes renováveis

Materiais utilizados para isolamento térmico têm sido amplamente investigados a partir de diferentes fontes de matéria-prima, com crescente interesse por alternativas de menor impacto ambiental. Nesse contexto, materiais renováveis constituem uma classe diversificada de insumos obtidos a partir de recursos de origem biológica ou de fluxos continuamente regeneráveis, incluindo fibras vegetais, subprodutos agroindustriais e resíduos de cadeias produtivas diversas.

O uso dessas matérias-primas está associado não apenas à redução da dependência de recursos fósseis, mas também à valorização de resíduos e ao desenvolvimento de soluções mais sustentáveis para o setor da construção civil. Em muitos casos, esses materiais apresentam estruturas intrinsecamente porosas ou podem ser processados de forma a favorecer o aprisionamento de ar, o que contribui diretamente para seu desempenho como isolantes térmicos. A partir dessas características, a literatura reporta uma ampla variedade de materiais de origem renovável aplicados ao isolamento térmico, os quais são apresentados a seguir.

4.5.1 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é o resíduo fibroso obtido após a extração do caldo da cana (*Saccharum spp.*) no processamento industrial para produção de açúcar e etanol. Esse material corresponde à fração sólida remanescente do colmo vegetal e é constituído principalmente por fibras lignocelulósicas, além de tecidos vegetais fragmentados, como parênquima, que sofrem intensa desestruturação mecânica durante a moagem.

Durante o processamento, a organização original dos tecidos vegetais é rompida, levando à formação de um material heterogêneo composto por fibras de diferentes dimensões e fragmentos celulares irregulares. Essa morfologia influencia diretamente a forma como as partículas se reorganizam em sistemas particulados ou compósitos, afetando a formação da rede porosa responsável pelo isolamento térmico.

Do ponto de vista térmico, a baixa densidade do bagaço (100 - 490 kg/m³) (Jr; Fiorelli; Santos, 2017) (Monteiro *et al.*, 2011) é um parâmetro favorável à sua aplicação em isolamento térmico. Estudos indicam que, para densidades entre 70 e 120 kg/m³, a condutividade térmica pode atingir valores próximos de 0,046 W/m·K, com melhor desempenho em torno de 100 kg/m³. Em contrapartida, o aumento da densidade em estruturas leves provoca um aumento sutil

na condutividade térmica, com valores reportados entre 0,049 W/m·K (250 kg/m³) e 0,055 W/m·K (350 kg/m³), devido ao maior contato entre fibras e à intensificação da condução na fase sólida.

Além da estrutura favorável, a utilização do bagaço em materiais destaca-se pela elevada disponibilidade desse resíduo em regiões produtoras de cana-de-açúcar. O Brasil, maior produtor mundial da cultura, registrou produção próxima de 680 milhões de toneladas na safra 2024/2025. Considerando que o bagaço corresponde a cerca de 30% da massa da cana processada, observa-se a geração de grandes volumes dessa biomassa como subproduto agroindustrial. Embora amplamente empregado em sistemas de cogeração de energia, o bagaço ainda apresenta elevado potencial de valorização em aplicações de maior valor agregado, incluindo o desenvolvimento de novos materiais.

4.5.2 Cânhamo

O cânhamo (*Cannabis sativa*) é uma fibra vegetal historicamente utilizada na produção de tecidos, cordas e papel, tendo adquirido recentemente relevância em aplicações na construção civil, especialmente em materiais isolantes. As fibras de interesse, denominadas fibras de basto, estão localizadas na região externa do caule (floema) e são constituídas por células alongadas com elevada razão comprimento/diâmetro. Essa morfologia favorece o entrelaçamento durante o processamento, promovendo a formação de redes fibrosas tridimensionais estáveis. Quando estruturadas em mantas ou compósitos, essas redes são capazes de aprisionar grandes volumes de ar, reduzindo significativamente a transferência de calor e contribuindo para o desempenho térmico do material.

O desempenho térmico do cânhamo está diretamente relacionado à densidade e à organização da rede fibrosa formada. Materiais menos densos apresentam maior fração de ar aprisionado entre as fibras, reduzindo a condução térmica, enquanto o aumento da compactação intensifica o contato entre fibras e eleva a condução pela fase sólida. Em aplicações na construção civil, o cânhamo é frequentemente combinado com fibras sintéticas e aditivos retardantes de chama, visando adequação das propriedades mecânicas e conformidade com normas de segurança. Os materiais obtidos geralmente apresentam densidade entre 20 e 90 kg/m³, condutividade térmica entre 0,038 e 0,060 W/m·K e calor específico entre 1,6 e 1,7 kJ/kg·K, valores compatíveis com estruturas leves e altamente porosas.

Por outro lado, o elevado teor de celulose das fibras de cânhamo (até 70%) as torna mais suscetíveis à absorção de umidade do ambiente. A higroscopicidade característica das fibras lignocelulósicas influencia diretamente o desempenho térmico, uma vez que a presença de água nos poros aumenta a transferência de calor e reduz a eficiência do isolamento. Nesse contexto, tratamentos hidrofóbicos podem ser empregados para minimizar esse efeito e estabilizar a condutividade térmica ao longo do tempo (Schiavoni *et al.*, 2016).

4.5.3 Taboa

A taboa (*Typha* spp.) é uma planta aquática amplamente distribuída em ambientes úmidos, frequentemente considerada uma espécie invasora devido ao seu rápido crescimento e elevada capacidade de propagação. Apesar desse caráter indesejado em sistemas agrícolas, sua biomassa tem sido estudada como matéria-prima alternativa para materiais sustentáveis, especialmente no contexto de isolamento térmico.

Do ponto de vista estrutural, a taboa apresenta fibras lignocelulósicas que podem ser processadas na forma particulada e incorporadas em compósitos ou painéis isolantes. Em geral, esses sistemas dependem da adição de aglutinantes poliméricos para garantir estabilidade estrutural, o que influencia diretamente a densidade final e a morfologia dos poros. A condutividade térmica desses materiais situa-se tipicamente entre 0,043 e 0,061 W/m·K, variando conforme a densidade e o grau de compactação da matriz.

De forma geral, assim como observado para outras fibras vegetais, o desempenho térmico da taboa está associado à fração de ar aprisionado na estrutura. Entretanto, a necessidade de consolidação com ligantes pode reduzir parcialmente a porosidade efetiva em comparação com sistemas fibrosos mais leves e autoportantes (Asdrubali; D'Alessandro; Schiavoni, 2015).

4.5.4 Linho

O linho (*Linum usitatissimum*) é uma das fibras vegetais mais antigas exploradas pelo ser humano, com registros de uso que remontam a civilizações antigas, como a egípcia. Sua relevância atual está associada principalmente ao alto teor de celulose, em torno de 70%, que

contribui para a rigidez das fibras e para sua resposta eficiente em estruturas porosas voltadas ao isolamento. Uma característica marcante do linho é a capacidade de reter ar em sua estrutura fibrosa. Essa propriedade não depende apenas da composição química, mas também da geometria alongada das fibras, que favorece a formação de redes abertas quando o material é processado em mantas ou painéis. Esse aprisionamento de ar é um dos principais responsáveis pelo baixo desempenho térmico, típico de materiais fibrosos leves.

Na prática, o linho é utilizado principalmente na forma de mantas isolantes, com densidades geralmente entre 20 e 100 kg/m³. Nessas condições, a condutividade térmica varia aproximadamente de 0,038 a 0,075 W/m·K, faixa compatível com outros isolantes de origem vegetal. O calor específico situa-se entre 1,4 e 1,6 kJ/kg·K, reforçando o comportamento típico de materiais leves com elevada fração de poros.

Para atender requisitos de desempenho mecânico e durabilidade, o linho costuma ser combinado com outros componentes, como fibras sintéticas (por exemplo, poliéster) e aditivos voltados à resistência ao fogo e à proteção contra agentes biológicos. Essas modificações não alteram sua natureza fibrosa, mas permitem ampliar seu uso em sistemas construtivos mais exigentes.

Além do uso do material fibroso convencional, resíduos do processamento do linho também têm sido aproveitados. Fibras mais curtas podem ser transformadas em painéis com ou sem aglutinantes sintéticos, mantendo ainda propriedades térmicas interessantes, com condutividade em torno de 0,060 W/m·K e densidade próxima de 170 kg/m³. Isso indica que mesmo subprodutos mantêm parte do potencial isolante do material original.

Por fim, o linho também se destaca pela possibilidade de combinação com outras fibras vegetais, como o cânhamo, formando compósitos híbridos com desempenho térmico ainda mais eficiente. Em formulações otimizadas, já foram reportados valores de condutividade próximos de 0,033 W/m·K, reforçando o potencial desses sistemas como isolantes de alto desempenho (Schiavoni *et al.*, 2016).

4.5.5 Lã de ovelha

A lã de ovelha é uma fibra natural amplamente empregada em sistemas de isolamento térmico, podendo ser obtida tanto a partir de fibras não recicladas, quanto de resíduos provenientes da indústria têxtil. Em aplicações desse tipo, as fibras são frequentemente

associadas a componentes auxiliares, como poliéster, com o objetivo de aumentar a estabilidade do material e facilitar sua conformação na forma de mantas ou rolos.

Seu desempenho térmico está relacionado à sua organização estrutural, que governa a resposta do material à transferência de calor. Essa configuração resulta em valores de condutividade térmica entre 0,038 e 0,054 W/m·K e calor específico entre 1,3 e 1,7 kJ/kg·K, refletindo seu comportamento como isolante leve em regime estacionário.

A elevada higroscopicidade da lã introduz variações relevantes em suas propriedades térmicas sob diferentes condições ambientais. A absorção de umidade pode alcançar cerca de 35% em massa, com impacto direto na condutividade térmica, que passa a variar aproximadamente entre 0,036 e 0,081 W/m·K (Schiavoni *et al.*, 2016).

4.5.6 Fibra de coco

As fibras de coco são obtidas do mesocarpo da casca do coco (*Cocos nucifera*), correspondendo a um subproduto da indústria do coco. Antes de sua utilização, passam por tratamentos destinados à remoção de frações orgânicas putrescíveis. Considerando a elevada disponibilidade do resíduo, sua aplicação industrial representa uma alternativa para a valorização de subprodutos agroindustriais.

Em países tropicais, como o Brasil, a ampla produção de coco favorece a disponibilidade desse resíduo para aplicações industriais. Ainda assim, trata-se de um material obtido a partir de resíduos com baixo consumo energético e reduzida necessidade de insumos sintéticos.

Do ponto de vista funcional, as fibras apresentam elevada resistência mecânica e resistência natural à degradação biológica, incluindo baixa suscetibilidade a insetos, apodrecimento e atração de roedores. Adicionalmente, aditivos retardantes de chama são comumente incorporados em aplicações construtivas.

O comportamento térmico do material tem sido investigado em diferentes configurações. Para fibras em diferentes densidades (aproximadamente 40 a 90 kg/m³), são reportados valores de condutividade térmica em torno de 0,049 W/m·K. Em painéis particulados sem ligantes, valores próximos de 0,046 W/m·K também foram observados. Em produtos comerciais, a condutividade situa-se entre 0,040 e 0,050 W/m·K, com densidade variando entre 50 e 160 kg/m³ (Schiavoni *et al.*, 2016).

4.5.7 Fibra de juta

A juta é uma fibra vegetal obtida do caule de plantas do gênero *Corchorus*, cultivada predominantemente em regiões tropicais da Ásia, especialmente Índia e Bangladesh. Trata-se de uma fibra lignocelulósica de elevada resistência mecânica e boa flexibilidade, características que favorecem sua incorporação em mantas e compósitos fibrosos.

Em materiais à base de juta, a condutividade térmica situa-se entre 0,038 e 0,055 W/m·K, indicando potencial de aplicação em isolamento térmico. Esse desempenho depende das condições de processamento e do grau de compactação, que influenciam a organização interna do material e, conseqüentemente, suas propriedades térmicas.

Em composições comerciais, a juta é frequentemente associada a fibras poliméricas e aditivos, resultando em materiais com elevado calor específico (aproximadamente 2,35 kJ/kg·K), porém baixa densidade (35 - 40 kg/m³), o que influencia o desempenho térmico global. Em formulações com ligantes sintéticos e partículas vegetais, são reportados valores de condutividade térmica em torno de 0,046 W/m·K (Schiavoni *et al.*, 2016).

4.6 Rotas de produção e desempenho térmico de isolantes convencionais e alternativos

Materiais isolantes convencionais são produzidos a partir de rotas industriais sustentadas por cadeias produtivas baseadas em recursos não renováveis, envolvendo a extração e o refino de matérias-primas de origem mineral e petroquímica. Esses recursos são empregados tanto na produção de espumas poliméricas quanto na fabricação de isolantes fibrosos minerais obtidos a partir do beneficiamento de minerais silicáticos e rochas basálticas (Durakovic; Yildiz; Yahia, 2020).

Além do elevado consumo de água e energia associado às etapas de extração e processamento das matérias-primas, a manufatura desses materiais envolve processos industriais complexos e energeticamente intensivos. Em espumas poliméricas, como poliuretano e poliestireno expandido, a baixa condutividade térmica é obtida por meio de reações de polimerização conduzidas sob condições controladas de temperatura e pressão, associadas a processos de expansão química ou física responsáveis pela formação da estrutura celular. Já nos isolantes fibrosos minerais, como lã de vidro e lã de rocha, o desempenho térmico

depende inicialmente da fusão de matérias-primas inorgânicas em temperaturas elevadas, frequentemente superiores a 1400 °C, seguida de etapas de fibrilação por centrifugação ou sopro para geração de fibras finas e posterior consolidação em estruturas porosas.

Além da complexidade de fabricação, aspectos relacionados ao uso e ao fim da vida útil também diferenciam essas classes de materiais. Isolantes minerais requerem cuidados durante o manuseio e a instalação devido à possibilidade de liberação de partículas (Kupczewska-Dobacka; Konieczko; Czerczak, 2020; Solvang; Okhrimenko; Koch, 2023), enquanto espumas poliméricas apresentam limitações associadas ao descarte e à reciclagem. Embora sua baixa densidade seja uma característica desejável para o isolamento térmico, ela dificulta a logística de coleta, transporte e reaproveitamento dos resíduos. Como consequência, uma parcela significativa desses materiais ainda é destinada a aterros ou à recuperação energética após o uso (Beromi, 2024).

Em contraste, materiais alternativos baseados em fibras naturais e resíduos industriais utilizam uma estratégia distinta para obtenção da estrutura responsável pelo isolamento térmico. Em vez da formação de uma nova matriz por síntese química ou fusão, esses sistemas aproveitam estruturas já existentes, de origem vegetal ou reciclada, que são reorganizadas em arranjos porosos (Ferreira; Rezende; Cranston, 2021). Nesses materiais, o processamento envolve predominantemente etapas mecânicas, como separação, desfibramento e reconstituição em mantas ou painéis, podendo incluir a adição de pequenas quantidades de ligantes para estabilização estrutural. Além de ampliar o aproveitamento de recursos renováveis e subprodutos industriais, essa abordagem possibilita a obtenção de estruturas isolantes por meio de rotas de fabricação relativamente simples.

Entretanto, o potencial desses materiais como alternativas sustentáveis aos isolantes convencionais não depende apenas da utilização de recursos renováveis ou reciclados. As técnicas empregadas para atingir determinado desempenho térmico também devem ser consideradas, uma vez que influenciam diretamente o consumo de energia, a complexidade da produção e os impactos ambientais associados. Em muitas aplicações, processos simples de secagem são suficientes para produzir materiais com capacidade de isolamento térmico para substituir os materiais convencionais (Wang *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2022). Por outro lado, a obtenção de condutividades extremamente baixas frequentemente requer métodos mais sofisticados, como a secagem supercrítica. Embora essas técnicas permitam maior controle da estrutura porosa, resultando em melhores propriedades térmicas, elas também demandam mais

energia, equipamentos especializados e custos mais elevados. Assim, a avaliação da sustentabilidade desses sistemas deve considerar não apenas o desempenho alcançado, mas também os recursos necessários para sua produção.

Portanto, a comparação entre isolantes convencionais e alternativos deve considerar simultaneamente a eficiência térmica e os recursos necessários para alcançá-la. Essa perspectiva é particularmente importante na análise de materiais renováveis, uma vez que diferentes estratégias de fabricação podem resultar em estruturas porosas e desempenhos térmicos distintos, influenciando diretamente sua competitividade em relação aos materiais já consolidados comercialmente. Embora a eficiência térmica seja um requisito fundamental, a viabilidade de aplicação desses materiais também depende do atendimento a outros critérios de desempenho, como propriedades mecânicas, estabilidade frente à umidade e durabilidade, que devem ser considerados de forma integrada no desenvolvimento e na seleção de sistemas isolantes.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu compreender que o desempenho de materiais isolantes térmicos está diretamente associado à interação entre composição, estrutura interna e propriedades físicas, uma vez que esses fatores influenciam os mecanismos de transferência de calor e, conseqüentemente, a eficiência do isolamento. Nesse contexto, observa-se que características estruturais, como porosidade, distribuição de poros e organização interna, exercem papel fundamental na redução da condutividade térmica, independentemente da natureza do material empregado.

A análise da literatura evidenciou que materiais isolantes convencionais apresentam desempenho térmico amplamente consolidado, sendo, em muitos casos, obtidos a partir de matérias-primas de origem fóssil e por meio de rotas produtivas de maior complexidade. Paralelamente, os estudos revisados demonstram que materiais de base renovável possuem potencial para atingir propriedades térmicas comparáveis, ampliando as perspectivas para o desenvolvimento de alternativas menos dependentes de recursos não renováveis.

A comparação entre diferentes classes de materiais reforça que a eficiência térmica não está exclusivamente relacionada à origem da matéria-prima, mas à forma como características

estruturais são estabelecidas ao longo do processamento. Nesse sentido, abordagens baseadas em recursos renováveis e rotas de obtenção mais simples têm se mostrado capazes de produzir materiais com desempenho semelhante ao de sistemas isolantes convencionais.

Em conjunto, os trabalhos analisados indicam que materiais isolantes de base renovável representam uma alternativa promissora aos sistemas tradicionalmente empregados, evidenciando a possibilidade de conciliar desempenho térmico, redução da dependência de recursos fósseis e simplificação de determinadas etapas produtivas. Dessa forma, o avanço no desenvolvimento desses materiais depende não apenas da escolha da matéria-prima, mas também da compreensão integrada entre estrutura, processamento e propriedades, aspectos fundamentais para o projeto de sistemas isolantes mais eficientes e sustentáveis.

6 REFERÊNCIAS

- ALBLAS, Alex; PETERS, Kristian; WORTMANN, Hans. Fuzzy sustainability incentives in new product development: An empirical exploration of sustainability challenges in manufacturing companies. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 34, n. 4, p. 513–545, 1 abr. 2014.
- AL-HAMAMRE, Zayed *et al.* Synthesis, characterization, and performance evaluation of different sulfonated lignin-based carbon catalysts for upgrading waste vegetable oil to biodiesel. **Energy Conversion and Management**, v. 325, p. 119381, 1 fev. 2025.
- ÁLVAREZ, Irantzu *et al.* Sustainable Civil Engineering: Incorporating Sustainable Development Goals in Higher Education Curricula. **Sustainability**, v. 13, n. 16, 10 ago. 2021.
- ASDRUBALI, Francesco; D’ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI, Samuele. A review of unconventional sustainable building insulation materials. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 4, p. 1–17, 1 jul. 2015.
- ATES, Murat *et al.* Polyurethane foam materials and their industrial applications. **Polymer International**, 2022.
- BALDINO, Lucia *et al.* Complete glutaraldehyde elimination during chitosan hydrogel drying by SC-CO₂ processing. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 103, p. 70–76, 1 ago. 2015.
- BARAKA, Farida; LABIDI, Jalel. The emergence of nanocellulose aerogels in CO₂ adsorption. **Science of The Total Environment**, v. 912, p. 169093, 20 fev. 2024.
- BECKERDITE, Janan; HERRINGTON, Ron; HOCK. **Flexible Polyurethane Foams**. [S.l.]: Dow Chemical Company, Dow Plastics, 1991.
- BERGERON, Vance; WALSTRA, Pieter. Foams. **Fundamentals of Interface and Colloid Science**, 2005.

BEROMI, Megan Mohadjer. Chapter Two - Modern mechanistic approaches for the depolymerization of commodity plastics via organometallic catalysis. *In*: PÉREZ, Pedro J. (Org.). **Advances in Organometallic Chemistry**. [S.l.]: Academic Press, 2024. v. 82 p. 71–133.

BÜTTNER, H.; MOKROSS, F. Fourier's law and thermal conduction. **Nature**, 1984.

CAO, Xiaobing *et al.* Cellulose-based functional hydrogels derived from bamboo for product design. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, 2022.

CAVALETT, Otavio *et al.* **Paving the way for sustainable decarbonization of the European cement industry | Nature Sustainability**. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41893-024-01320-y>>. Acesso em: 29 mar. 2026.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin Jahanshahi. **Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications**. [S.l.]: McGraw Hill Education, 2015.

CHEN, Cheng; XU, Jinghua; ZHANG, Shuyou. Reducing idle trajectory for numerical controlled manufacturing of porous structures via neighborhood stratified heuristic. **Computer-Aided Design**, v. 194, p. 104049, 1 maio 2026.

CHEN, Chih-Hao *et al.* Chondroitin sulfate/hyaluronic acid/carboxymethylcellulose macroporous cryogels for controlled delivery of TGF- β 1 and IGF-1 to induce chondrogenic differentiation of adipose-derived stem cells in cartilage tissue engineering. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 317, p. 144756, 1 jun. 2025.

CHINTA, Sandeep; HEERAMAN, Jatoth. Thermal Conduction Fundamentals and Applications. *In*: [S.l.: S.n.].

CLENNELL, M. Ben. Tortuosity: a guide through the maze. **Geological Society, London, Special Publications**, 1997.

COLLISHAW, P. G.; EVANS, J. R. G. An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellular materials. **Journal of Materials Science**, 1994.

COLTON, Jonathan S.; SUH, Nam P. **The nucleation of microcellular thermoplastic foam with additives: Part I: Theoretical considerations**. Disponível em: <<https://www.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscaador.html?task=detalhes&id=W1973905161>>. Acesso em: 14 abr. 2026.

COMITE, A. *et al.* Thermal barrier coatings based on alumina microparticles. **Progress in Organic Coatings**, v. 78, p. 124–132, 1 jan. 2015.

DING, Yang *et al.* Biomass-based porous materials for thermal insulation. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 168, p. 101138, 1 jan. 2026.

DURAKOVIC, Benjamin; YILDIZ, Gokhan; YAHIA, Mohamed E. Comparative Performance Evaluation of Conventional and Renewable Thermal Insulation Materials Used in Building Envelops. **Tehnicki vjesnik - Technical Gazette**, v. 27, n. 1, fev. 2020.

ESCOBAR, Neus; LAIBACH, Natalie. Sustainability check for bio-based technologies: A review of process-based and life cycle approaches. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110213, 1 jan. 2021.

ESQUIVEL-CASTRO, Tzipatly A. *et al.* Porous aerogel and core/shell nanoparticles for controlled drug delivery: A review. **Materials Science and Engineering: C**, v. 96, p. 915–940, 1 mar. 2019.

EVERETT, D. H. Manual of Symbols and Terminology for Physicochemical Quantities and Units, Appendix II: Definitions, Terminology and Symbols in Colloid and Surface Chemistry. **Pure and Applied Chemistry**, v. 31, n. 4, p. 577–638, 1972.

FELDMAN, D. Polymeric foam materials for insulation in buildings. **Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings**, 2010.

FERKL, Pavel *et al.* Heat transfer in one-dimensional micro- and nano-cellular foams. **Chemical Engineering Science**, v. 97, p. 50–58, 28 jun. 2013.

FERREIRA, Elisa S.; REZENDE, Camila A.; CRANSTON, Emily D. Fundamentals of cellulose lightweight materials: bio-based assemblies with tailored properties. **Green Chemistry**, v. 23, n. 10, p. 3542–3568, 24 maio 2021.

GALIMSHINA, Alina *et al.* Bio-based materials as a robust solution for building renovation: A case study. **Applied Energy**, v. 316, p. 119102, 15 jun. 2022.

GHAFFARIANHOSEINI, AmirHosein *et al.* Sustainable energy performances of green buildings: A review of current theories, implementations and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 1–17, 1 set. 2013.

GHANBARIAN, Behzad *et al.* Tortuosity in Porous Media: A Critical Review. 2013.

GIBSON, Lorna J.; ASHBY, Michael F. **Cellular Solids 2nd Edition**. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/universitypress/subjects/engineering/materials-science/cellular-solids-structure-and-properties-2nd-edition>>. Acesso em: 14 abr. 2026.

GORMAN, Brian P. Structural Characterization of Porous Materials. **World Scientific Series in Nanoscience and Nanotechnology**, 2015.

HANSEN, Anja; BUDDE, Jörn; PROCHNOW, Annette. Resource Usage Strategies and Trade-Offs between Cropland Demand, Fossil Fuel Consumption, and Greenhouse Gas Emissions—Building Insulation as an Example. **Sustainability**, v. 8, n. 7, 28 jun. 2016.

HEINEMANN, Ulrich. Influence of Water on the Total Heat Transfer in ‘Evacuated’ Insulations. **International Journal of Thermophysics**, v. 29, n. 2, p. 735–749, 1 abr. 2008.

HO, Thi H. *et al.* **Water adsorption on surfaces of calcium aluminosilicate crystal phase of stone wool: a DFT study | Scientific Reports**. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-024-59754-5>>. Acesso em: 22 maio. 2026.

HOLZER, Lorenz *et al.* Tortuosity-Porosity Relationships: Review of Empirical Data from Literature. *In*: HOLZER, Lorenz *et al.* (Orgs.). **Tortuosity and Microstructure Effects in Porous Media: Classical Theories, Empirical Data and Modern Methods**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 51–89.

HOWELL, John R. *et al.* **Thermal radiation heat transfer**. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar_lookup?&title=Thermal%20Radiation%20Heat%20Transfer&publication_year=2016&author=Howell%2CJR&author=Meng%2C%20BC%20A7%20CMP&author=Siegel%20CR>. Acesso em: 7 abr. 2026.

HOXHA, Endrit *et al.* Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. **Buildings & Cities**, v. 1, n. 1, 12 ago. 2020.

INGRAO, Carlo *et al.* Energy and environmental assessment of industrial hemp for building applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 29–42, 1 nov. 2015.

JIN, Hao *et al.* Influence of fiber microstructure on particle dynamic deposition and macroscopic filtration performance in nonwoven fiber filter media. **Separation and Purification Technology**, v. 391, p. 137143, 11 jun. 2026.

JR, Holmer; FIORELLI, Juliano; SANTOS, Sergio. **Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites**. [S.l.: S.n.]. p. 466

JUN, Indong *et al.* Electrospun Fibrous Scaffolds for Tissue Engineering: Viewpoints on Architecture and Fabrication. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 3, 5 mar. 2018.

KAKAÇ, Sadık; YENER, Yaman. **Heat Conduction**. [S.l.]: Taylor & Francis, 1993.

KANEKO, Katsumi. Determination of pore size and pore size distribution: 1. Adsorbents and catalysts. **Journal of Membrane Science**, v. 96, n. 1, p. 59–89, 28 nov. 1994.

KAO, Chong-Mau; JEYAPRAKASH, N.; YANG, Che-Hua. Modelling and non-destructive measurement of dispersion behaviour of stainless steel and alumina ceramic porous plates. **Ceramics International**, v. 47, n. 10, Part A, p. 14233–14243, 15 maio 2021.

KARIMI, Mohammad *et al.* Formation and size distribution of pores in poly(ϵ -caprolactone) foams prepared by pressure quenching using supercritical CO₂. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 61, p. 175–190, 1 jan. 2012.

KARNICK, S. Tumkur *et al.* Circular insulation material: characterisation and bio-solubility of waste mineral wool for blown-in insulation applications. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 32, p. 101218, 1 jun. 2026.

KUPCZEWSKA-DOBECKA, Małgorzata; KONIECZKO, Katarzyna; CZERCZAK, Sławomir. Occupational risk resulting from exposure to mineral wool when installing insulation in buildings. 2020.

LAVOINE, Nathalie; BERGSTRÖM, Lennart. Nanocellulose-based foams and aerogels: processing, properties, and applications. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 5, n. 31, p. 16105–16117, 8 ago. 2017.

LEMOUGNA, Patrick N. *et al.* Utilisation of glass wool waste and mine tailings in high performance building ceramics. **Journal of Building Engineering**, v. 31, p. 101383, 1 set. 2020.

LI, Hao *et al.* Preparation of nickel porous materials by sintering nickel oxalate and sodium chloride after blending and reduction. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 3149–3157, 1 maio 2020.

LI, Zhouhang *et al.* A review of microscale physics and macroscale convective heat transfer in supercritical fluids for energy and propulsion systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 272, p. 126380, 1 ago. 2025.

LIU, He; ZHAO, Xinpeng. Thermal Conductivity Analysis of High Porosity Structures with Open and Closed Pores. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 183, p. 122089, 1 fev. 2022.

MARTÍNEZ, Borja; BERNAT-MASO, Ernest; GIL, Lluís. **Applications and Properties of Hemp Stalk-Based Insulating Biomaterials for Buildings: Review | MDPI**. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1944/16/8/3245>>. Acesso em: 25 mar. 2026.

MARTOÏA, F. *et al.* Cellulose nanofibril foams: Links between ice-templating conditions, microstructures and mechanical properties. **Materials & Design**, v. 104, p. 376–391, 15 ago. 2016.

MCCLURG, Richard B. Design criteria for ideal foam nucleating agents. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 24, p. 5779–5786, 1 dez. 2004.

MEFTAH, Redouane *et al.* Multiscale characterization of glass wools using X-ray micro-CT. **Materials Characterization**, v. 156, p. 109852, 1 out. 2019.

MEHDIPOUR, Armin; NIA, Hoda Rashdi. Industrialization and City Change; the Concept and Historical Evolution of Urban Regeneration. **International Journal of Sciences**, v. 12, n. 1, 2013.

MONTEIRO, Sergio *et al.* Natural Lignocellulosic Fibers as Engineering Materials—An Overview. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 42, p. 2963–2974, 1 out. 2011.

OGAM, Erick; FELLAH, Z. E. A.; OGAM, Géry. Identification of the mechanical moduli of closed-cell porous foams using transmitted acoustic waves in air and the transfer matrix method. **Composite Structures**, v. 135, p. 205–216, 1 jan. 2016.

ÖZTÜRK, Bülent; ARSLAN, F.; ÖZTÜRK, Sultan. Effects of Different Kinds of Fibers on Mechanical and Tribological Properties of Brake Friction Materials. **Tribology Transactions**, v. 56, 1 jul. 2013.

PAL, Parimal. Introduction to modeling membrane separation processes. **Membrane-Based Technologies for Environmental Pollution Control**, 2020.

PITTAU, Francesco *et al.* Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. **Building and Environment**, v. 129, p. 117–129, 1 fev. 2018.

QIAN, Lei; ZHANG, Haifei. Controlled freezing and freeze drying: a versatile route for porous and micro-/nano-structured materials. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, 2010.

RATHORE, Mahesh M.; KAPUNO, Raul Raymond. **Engineering Heat Transfer**. [S.l.]: Jones & Bartlett Learning, 2011.

REZAEI, Mostafa; MOHAMMADIAN, Zahra; AZDAST, Taher. Microstructure, Physical and Mechanical Properties of LDPE/UHMWPE Blend Foams: An Experimental Design Methodology. **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, v. 29, 15 dez. 2014.

ROBLEDO-ORTIZ, J. R. *et al.* Non-isothermal decomposition kinetics of azodicarbonamide in high density polyethylene using a capillary rheometer. **Polymer Testing**, v. 27, n. 6, p. 730–735, 1 set. 2008.

ROUQUEROL, J. *et al.* Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 66, n. 8, p. 1739–1758, 1994.

SCHIAVONI, S. *et al.* Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 988–1011, 1 set. 2016.

SING, K. S. W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). **Pure and Applied Chemistry**, 1985.

SOLVANG, M.; OKHRIMENKO, D. V.; KOCH, C. **Full article: Investigation of the occurrence of binder material on airborne respirable mineral wool fibers**. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15459624.2023.2205470>>. Acesso em: 8 jun. 2026.

SONG, Xin-rui *et al.* Fiber length-dependent microstructure and properties of fiber-reinforced porous ceramics for thermal protection systems. **Ceramics International**, v. 52, n. 1, p. 1302–1309, 1 jan. 2026.

SRISUTTHIYAKORN, Nattavadee; MAVKO, Gerald M. What is the role of tortuosity in the Kozeny-Carman equation? **Interpretation**, v. 5, n. 1, p. SB57–SB67, 19 jan. 2017.

TAVASSOLI, Fatemeh; RAZZAGHI-KASHANI, Mehdi; MOHEBBY, Behbood. Hydrothermally treated wood as reinforcing filler for natural rubber bio-composites. **Journal of Polymer Research**, v. 25, n. 1, p. 3, jan. 2018.

UHER, Ctirad. Thermal Conductivity of Metals. *In*: TRITT, Terry M. (Org.). **Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications**. Boston, MA: Springer US, 2004. p. 21–91.

UTTARAVALLI, Appala Naidu; DINDA, Srikanta; GIDLA, Bhanu Radhika. Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene : A review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 137, p. 140–148, 1 maio 2020.

VERDOLOTTI, Letizia *et al.* Polyurethane Nanocomposite Foams. **Polyurethane Polymers**, 2017.

VOLF, Martin; DIVIŠ, Jakub; HAVLÍK, Filip. Thermal, Moisture and Biological Behaviour of Natural Insulating Materials. **Energy Procedia**, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015. v. 78, p. 1599–1604, 1 nov. 2015.

WANG, Li *et al.* Cellulose nanofiber-created air barrier enabling closed-cell foams prepared via oven-drying. **Carbohydrate Polymers**, v. 351, p. 123096, 1 mar. 2025.

WÜNSCH, J. R. **Polystyrene: Synthesis, Production and Applications**. [S.l.]: iSmithers Rapra Publishing, 2000.

YU, Sujie; BUDTOVA, Tatiana. Creating and exploring carboxymethyl cellulose aerogels as drug delivery devices. **Carbohydrate Polymers**, v. 332, p. 121925, 15 maio 2024.

ZDRAVKOV, Borislav *et al.* Pore classification in the characterization of porous materials: A perspective. **Open Chemistry**, v. 5, n. 2, p. 385–395, 1 jun. 2007.

ZHANG, Meimei *et al.* Thermal Conductivities of Molecular Liquids by Reverse Nonequilibrium Molecular Dynamics. **The Journal of Physical Chemistry B**, v. 109, n. 31, p. 15060–15067, 1 ago. 2005.

ZHU, Yeling *et al.* Air drying scalable production of hydrophobic, mechanically stable, and thermally insulating lignocellulosic foam. **Chemical Engineering Journal**, v. 450, p. 138300, 15 dez. 2022.

ZOU, Fangxin; BUDTOVA, Tatiana. Polysaccharide-based aerogels for thermal insulation and superinsulation: An overview. **Carbohydrate Polymers**, v. 266, p. 118130, 15 ago. 2021.