

## RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta Tese será disponibilizado somente a partir de 17/05/2026.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
CÂMPUS EXPERIMENTAL DE ROSANA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MATERIAIS - POSMAT

TESE DE DOUTORADO

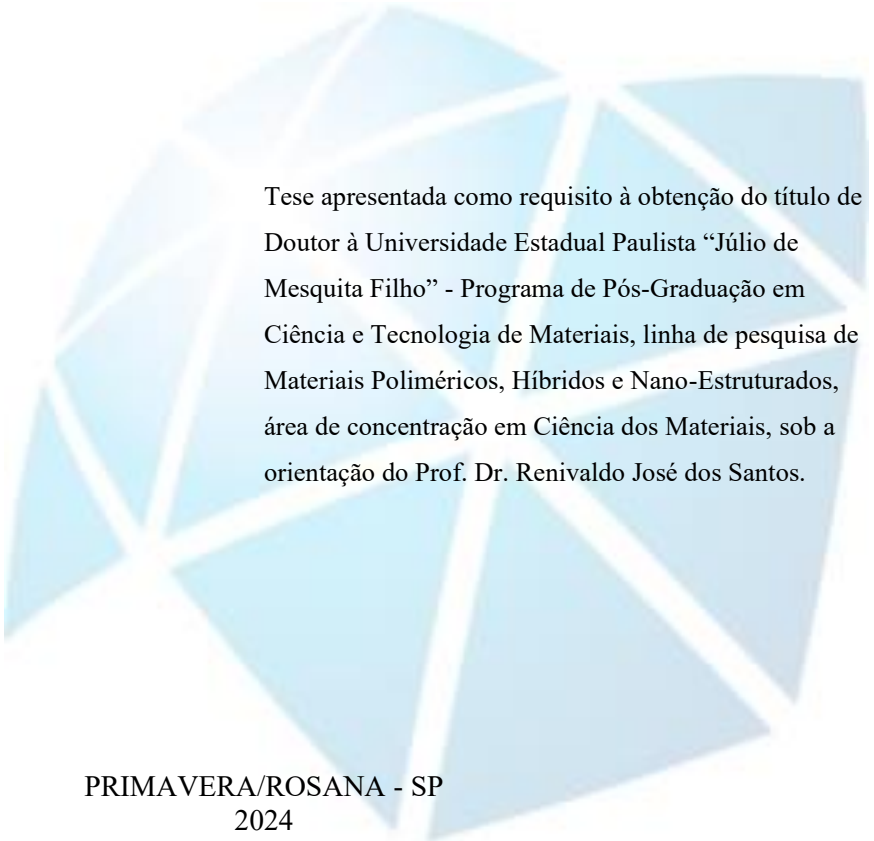
REVESTIMENTO TÉRMICO PARA HABITAÇÕES  
POPULARES COM COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE  
BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR)  
COM RESÍDUO INDUSTRIAL COURO



PRIMAVERA/ROSANA - SP  
2024

GABRIEL DELTREJO RIBEIRO

REVESTIMENTO TÉRMICO PARA HABITAÇÕES  
POPULARES COM COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE  
BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR)  
COM RESÍDUO INDUSTRIAL COURO



Tese apresentada como requisito à obtenção do título de  
Doutor à Universidade Estadual Paulista “Júlio de  
Mesquita Filho” - Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia de Materiais, linha de pesquisa de  
Materiais Poliméricos, Híbridos e Nano-Estruturados,  
área de concentração em Ciência dos Materiais, sob a  
orientação do Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos.

PRIMAVERA/ROSANA - SP  
2024

R484r Ribeiro, Gabriel Deltrejo  
Revestimento térmico para habitações populares com compósitos expandidos de borracha de estireno-butadieno (SBR) com resíduo industrial couro / Gabriel Deltrejo Ribeiro. -- Rosana, 2024  
169 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana  
Orientador: Renivaldo José dos Santos

1. Materiais de construção. 2. Borracha expandida. 3. Borracha SBR. 4. Isolante térmico. 5. Habitações populares. I. Título.

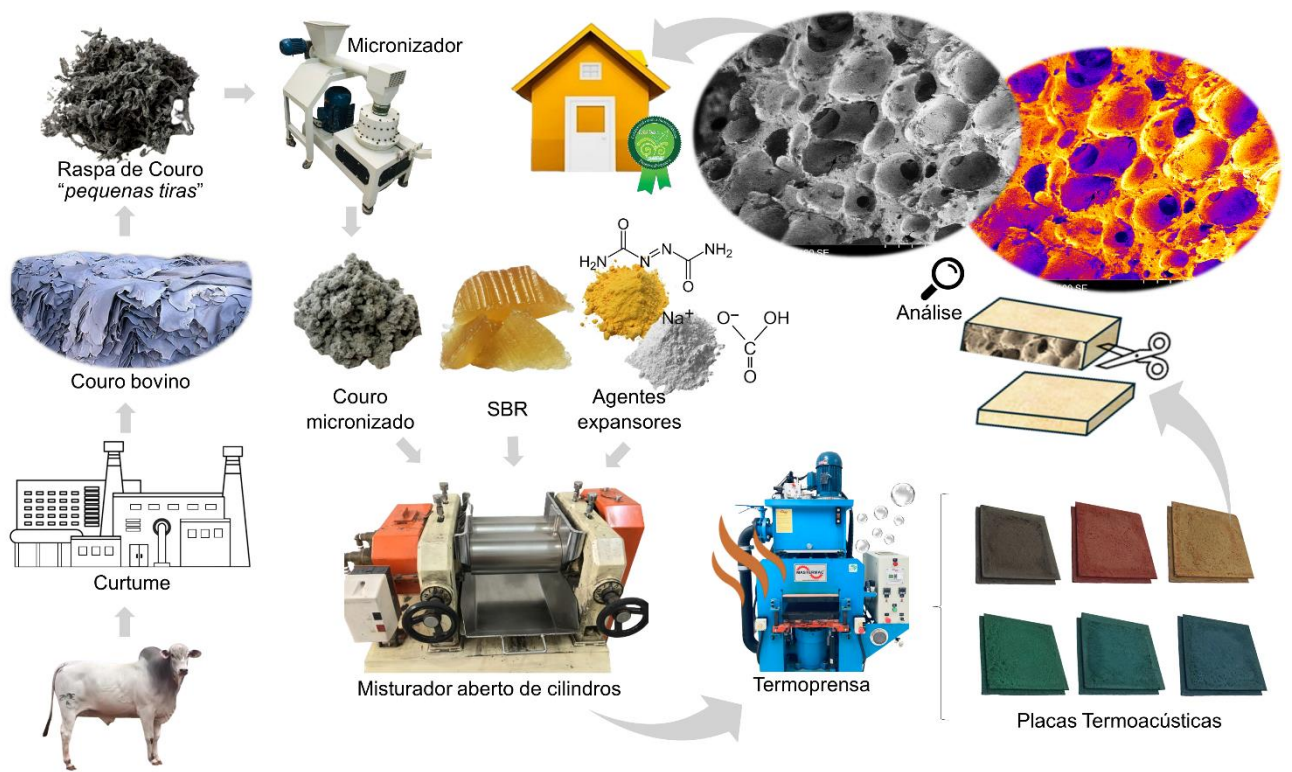
## **Impacto Potencial desta Pesquisa**

Esta pesquisa apresenta uma solução inovadora no campo dos materiais de construção, focando no desenvolvimento de compósitos de borracha de estireno-butadieno (SBR) expandido com dispersão industrial de couro micronizado para melhorar a eficiência energética e o conforto térmico em habitações populares de áreas urbanas com condições climáticas extremas. Este novo material, especialmente o composto SBR/Couro 20 phr, mostrou-se superior em isolamento térmico com uma condutividade térmica de apenas  $0,073 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e a capacidade de reduzir a temperatura interna em cerca de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , oferecendo uma alternativa mais durável e sustentável que os materiais convencionais como placas de construção, compensados, fibra de vidro, telhados de asfalto, e telhas de cimento. A abordagem não apenas promove a estabilidade térmica e a saúde dentro das habitações urbanas, mas também integra práticas de reciclagem ao utilizar resíduos industriais de couro, contribuindo para a economia circular e causando o impacto ambiental associado à produção de novos materiais de construção. Este estudo, ao alinhar eficiência energética com responsabilidade ambiental, estabelece uma base para futuras inovações no setor de construção civil, mostrando como soluções sustentáveis, *eco-friendly*, podem revolucionar a construção de habitações populares e fornecer benefícios duradouros para o meio ambiente, a economia e a sociedade.

## **Potential Impact of this Research**

This research presents an innovative solution in the field of construction materials, focusing on the development of expanded styrene-butadiene rubber (SBR) composites with industrial dispersion of micronized leather to enhance energy efficiency and thermal comfort in public housing in urban areas with extreme climate conditions. This new material, especially the SBR/Leather 20 phr compound, proved superior in thermal insulation with a thermal conductivity of just  $0.073 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  and the ability to reduce the internal temperature by about  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , offering a more durable and sustainable alternative to conventional materials such as construction boards, plywood, fiberglass, asphalt roofing, and cement tiles. The approach not only promotes thermal stability and health within urban dwellings but also integrates recycling practices by utilizing industrial leather waste, contributing to the circular economy and mitigating the environmental impact associated with the production of new building materials. This study, by aligning energy efficiency with environmental responsibility, lays the foundation for future innovations in the construction sector, showing how sustainable, *eco-friendly* solutions can revolutionize the construction of public housing and provide long-lasting benefits for the environment, economy, and society.

## Resumo Gráfico



*Fonte: Autoria própria.*

# **Termo de Aprovação**

GABRIEL DELTREJO RIBEIRO

## **" REVESTIMENTO TÉRMICO PARA HABITAÇÕES POPULARES COM COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE BORRACHA DE ESTIRENO-BUTADIENO (SBR) COM RESÍDUO INDUSTRIAL COURO"**

**Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutor à  
Universidade Estadual Paulista (UNESP) "Júlio de Mesquita Filho" -  
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais.**

**Orientador:** Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos  
Coordenadoria de Curso de Engenharia de Energia, UNESP Campus de Rosana.

**Banca Avaliadora:**

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ana Maria Pires  
Química e Bioquímica, UNESP Campus de Presidente Prudente.  
Presidente Prudente – SP.

Prof.<sup>a</sup> Dra. Ângela Mitie Otta Kinoshita  
PRPPG - Pós-graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional,  
Universidade do Oeste Paulista – UNOESTE.  
Presidente Prudente - SP.


Prof.<sup>a</sup> Dra. Danielle Goveia  
Coordenadoria de curso de Engenharia de Produção, UNESP Campus de Itapeva.  
Itapeva - SP.

Prof. Dr. Augusto Batagin Neto  
Ciências e Tecnologia, UNESP Campus de Itapeva.  
Itapeva - SP.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GABRIEL DELTREJO RIBEIRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 17 dias do mês de maio do ano de 2024, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de GABRIEL DELTREJO RIBEIRO, intitulada **REVESTIMENTO TÉRMICO PARA HABITAÇÕES POPULARES COM COMPÓSITOS EXPANDIDOS DE BORRACHA DE ESTIRENO BUTADIENO (SBR) COM RESÍDUO INDUSTRIAL COURO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RENIVALDO JOSÉ DOS SANTOS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Energia / Faculdade de Engenharia e Ciências - Unesp/Câmpus de Rosana, Profa. Dra. ANGELA MITIE OTTA KINOSHITA (Participação Virtual) do(a) Pós-Graduação em meio ambiente e desenvolvimento regional / Universidade do Oeste Paulista, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. DANIELLE GOVEIA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Produção / Instituto de Ciências e Engenharia - Câmpus de Itapeva, Prof. Dr. AUGUSTO BATAGIN NETO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Ciências e Tecnologia / Instituto de Ciências e Engenharia - Unesp/Câmpus de Itapeva, Profa. Dra. ANA MARIA PIRES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Química e Bioquímica / Faculdade de Ciências e Tecnologia - Unesp/Câmpus de Presidente Prudente. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. RENIVALDO JOSÉ DOS SANTOS

Documento assinado digitalmente  
 RENIVALDO JOSE DOS SANTOS  
Data: 17/05/2024 15:48:36-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

*Dedico este trabalho a minha amada esposa Sílvia, ao meu amado filho João Lucas, aos meus colegas de pesquisa em especial ao Carlos e ao Renivaldo, ao grupo de pesquisa LTBÁ e LTBPol que me apoiaram e fortaleceram nessa jornada, em que todos não mediram esforços para que eu vencesse esse novo desafio em minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus por guiar os meus passos e iluminar o meu caminho sempre de mãos dadas comigo.*

*A minha amada esposa Silvinha por todo apoio, respeito, incentivo, orações, paciência, amor, carinho e compreensão para com as etapas vividas ao longo desse trabalho, em que sempre me motivou e acreditou que esse momento seria possível, aceitando e fazendo os sacrifícios necessários.*

*A meu amado e lindo filho João Lucas que sempre me recebia em casa com um grande sorriso, abraços e beijos, que foram o combustível e energia para prosseguir e vencer cada etapa e novo desafio.*

*Aos meus avós que estão no céu ao lado dos anjos, que muito amo, por terem sido exemplos de pai e mãe, e sempre terem ficado ao meu lado em todos os momentos, eterna gratidão.*

*A minha mãe que é muito especial e iluminada, Vera cheia de graça, que sempre me aconselha e orienta com muito amor, mostrando o caminho a ser seguido, e sempre ora por mim.*

*Ao meu padrasto Roberto (Roro), verdadeiro amigo e pai, presente em todos os momentos especiais da minha vida, orientando e conversando com amor e carinho.*

*Ao meu irmão Diego parceiro de todos os momentos, a minha cunhada Nathalia e ao meu sobrinho Pedro que muito amo, pelo carinho, apoio e incentivo.*

*Ao meu sogro e sogra, Silvio e Luzia, por terem acreditado que essa conquista seria possível e principalmente pelo amor, carinho e compressão.*

*Ao meu Orientador e grande amigo Prof. Dr. Renivaldo José dos Santos, que nunca esquecerei do que ele fez e faz de forma tão singela por mim, companheiro de graduação e exemplo de vida e superação, gratidão por estar ao meu lado nessa jornada e descobertas da ciência, se cheguei até aqui foi porque ele estava ao meu lado.*

*Ao grande amigo, irmão e parceiro Carlos, que fiz ao longo dessa jornada que se iniciou no mestrado, e que se não fosse pelo incentivo, apoio, momentos de estudos, discussões científicas e muitos cafezinhos essa conquista não teria sido possível, tenho enorme gratidão e carinho.*

*Ao Prof. Dr. Aldo Eloizo Job da FCT/Unesp de Pres. Prudente por me receber de braços abertos no grupo de pesquisa do Laboratório de Tecnologia de Borrachas e Aplicações (LTBA) possibilitando o avanço científico, além do carinho e atenção que sempre teve comigo.*

*Ao Prof. Dr. Fernando Sérgio Okimoto da FCT/Unesp de Pres. Prudente por me auxiliar nos ensaios de condutividade térmica.*

*Ao Professor Dr. Miguel Angel Rodríguez Pérez e a Dra. Leandra Oliveira Salmazo da Universidad de Valladolid, UVA, Espanha por me auxiliarem nos ensaios de transmissão acústica.*

*Ao Professor Dr. Giovanni Barrera Torres e a sua equipe do Instituto Tecnológico Metropolitano da Colômbia pelo suporte nas revisões de inglês, na qual foi possível publicarmos parte desta Tese como artigo científico.*

*Ao grupo de pesquisa do LTBA, Gabrieli, Andressa, Vitor, Cibeli, Celina, em que todos me acolheram e orientaram ao longo da pesquisa, momentos que nunca esquecerei e que foram fundamentais, além da grande amizade que foi construída.*

*Ao Laboratório de Resíduos Sólidos Urbanos da Unesp de Presidente Prudente sob a supervisão do Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira por sempre me receber de braços abertos e pela assistência e parceria de Gleyson Tadeu Almeida Santos, por não medir esforços em ajudar e auxiliar nos ensaios de fluorescência de raio X, tração e compressão.*

*Ao Guilherme Dognani que é base e referência em pesquisa, agradeço as discussões científicas de extrema qualidade e auxílio nas discussões e reflexões.*

*Ao João Canhada pela amizade, conselhos e colaborações*

*Aos Professores da banca de qualificação e de defesa por terem aceitado o convite para comporem a banca, contribuindo para a melhora do trabalho de modo tão significativo.*

*A todos os Professores e funcionários do Programa Posmat, em especial a Thamires Nascimento Parussolo, Ingrid Tiemy Taira e Leticia Lopes Veronez que além de fazerem um belo trabalho, conseguem nos apoiar e orientar, cuidando para que tudo saia correto.*

*A empresa Proquitec, em especial ao César, que forneceu o antioxidante, óleo plastificante e os agentes expansores para este trabalho agregando qualidade aos materiais e permitindo o avanço da pesquisa com sucesso, além de toda a educação, disposição e atenção prestadas.*

*A Aodran do Brasil Comércio de Produtos Químicos LTDA pelo fornecimento do carbonato de cálcio tratado com o promotor de adesão Chartwell.*

*A Prope (Pró-Reitoria de Pesquisa da Unesp) pelo fomento nas publicações dos artigos científicos.*

*A Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Unesp.*

*"Se pude enxergar mais longe,  
foi porque me apoiei em ombros de gigantes".  
(Frase da carta de Isaac Newton em 1675 para Robert Hooke)*

<sup>1</sup>O SENHOR é o meu pastor, nada me faltará.  
<sup>2</sup>Deitar-me faz em verdes pastos, guia-me mansamente a águas tranquilas.  
<sup>3</sup>Refrigera a minha alma; guia-me pelas veredas da justiça, por amor do seu nome.  
<sup>4</sup>Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte, não temeria mal algum,  
porque tu estás comigo; a tua vara e o teu cajado me consolam.  
<sup>5</sup>Preparas uma mesa perante mim na presença dos meus inimigos,  
unges a minha cabeça com óleo, o meu cálice transborda.  
<sup>6</sup>Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão todos os dias  
da minha vida; e habitarei na casa do Senhor por longos dias.  
(Bíblia Sagrada: Salmos 23:1-6)

*Artigos publicados em revistas como primeiro autor durante a execução desta tese:*

- **RIBEIRO, G. D.**; HIRANOBE, C. T.; DA SILVA, J. F. R.; TORRES, G. B.; PAIM, L. L.; JOB, A. E.; CABRERA, F. C.; DOS SANTOS, R. J. DOS. *Physical-Mechanical Properties of Chartwell® Coupling Agent-Treated Calcium Carbonate and Silica-Reinforced Hybrid Natural Rubber Composites*. *Crystals*, v. 12, p. 1552, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12111552>.
- **RIBEIRO, G. D.**; HIRANOBE, C. T.; ARAÚJO, S. S.; FILGUEIRA, M. S.; ROCHA, J. A.; MUKUNO, J. S.; SALMAZO, L. O.; GOMES, A. S.; TOLOSA, G. R.; GENNARO, E. M.; JOB, A. E.; RODRÍGUEZ PÉREZ, M. A.; SANTOS, R. J. *Sustainable construction materials for low-cost housing: Thermal insulation potential of expanded SBR composites with leather waste*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.04.234>.

*Artigos publicados em revistas como coautor durante a execução desta tese:*

- DE MARIA, V. P. K.; DE PAIVA, F. F. G.; CABRERA, F. C.; HIRANOBE, C. T.; **RIBEIRO, G. D.**; PAIM, L. L.; JOB, A. E.; SANTOS, R. J. DOS. *Mechanical and rheological properties of partial replacement of carbon black by treated ultrafine calcium carbonate in natural rubber compounds*. *Polymer Bulletin (Berlin. Internet)*, v. 10, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03891-8>.
- HIRANOBE, C. T.; **RIBEIRO, G. D.**; TORRES, G. B.; REIS, E. A. P. DOS; CABRERA, F. C.; JOB, A. E.; PAIM, L. L.; SANTOS, R. J. DOS. *Cross-Linked Density Determination of Natural Rubber Compounds by Different Analytical Techniques*. *Materials Research*, v. 24, p. e20210041, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0041>.
- HIRANOBE, C. T.; SILVA, A. R. DA; CRUZ, M. A. G.; CANHADA, J. C. S.; ARAÚJO, S. S.; ROCHA, J. A.; SANTOS, H. F. DOS; **RIBEIRO, G. D.**; TOLOSA, G. R.; SANTOS, G. T. A.; BUDEMBERG, E. R.; AZEVEDO, C. G. DE; SANTOS, R. J. DOS. *Evaluation of the properties of natural rubber bio composite and guava residue (Psidium guajava L.) as sustainable application*. *Materials Research*, v. 26, p. 1-9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0515>.
- CARVALHO, A. P.; SANTOS, H. F.; **RIBEIRO, G. D.**; HIRANOBE, C. T.; GOVEIA, D.; GENNARO, E. M.; PAIM, L. L.; SANTOS, R. J. DOS. *Sustainable Composites: Analysis of Filler-Rubber Interaction in NR-SBR/Polyurethane Composites Using the Lorenz-Park*

*Method and Scanning Electron Microscopy. Polymers*, v. 16(4), p. 471, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym16040471>.

- ROCHA, J. A.; HIRANOBE, C. T.; HIRANOBE, M. F.; ARAÚJO, S. S.; FILGUEIRA, M. S.; **RIBEIRO, G. D.**; CARDIM, H. P.; MUKUNO, J. S.; SILVA, J. F. R.; ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; SANTOS, R. J. *Strategic diagnosis for improvements in the execution of structural masonry. Journal of Engineering Research*, v. 4, n. 13, p. 1-16, 2024. DOI: [https://doi.org/10.22533/at.ed.317413242\\_9043](https://doi.org/10.22533/at.ed.317413242_9043).
- CRUZ, M. A. G; HIRANOBE, C. T.; CARDIM, G. P.; CABRERA, F. C.; **RIBEIRO, G. D.**; TOLOSA, G. R.; GARCIA, R. E.; SANTOS, R. J. *Artificial neural network modeling for predicting the carbon black content derived from unserviceable tires for elastomeric composite production. Journal Of Applied Polymer Science*, v. 1, p. 1-12, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.55951>.

#### **Capítulos de livros publicados como coautor durante a execução desta tese:**

- *Gears of the future* – Capítulo 5: “**Determinação da densidade de ligações cruzadas em borracha natural para diferentes sistemas de vulcanização**” – Arthur Pimentel de Carvalho, Harison Franca dos Santos, Carlos Toshiyuki Hiranobe, Eduardo Roque Budemberg, Gabriel Deltrejo Ribeiro, Giovanni Barrera Torres, José Francisco Resende, Leonardo Lataro Paim, Leandra Oliveira Salmazo, Miguel Ángel Rodríguez Pérez e Renivaldo José dos Santos (2022). Editora Atena ISBN 978-65-5983-868-4 – DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.6842204025>.
- *Collection: Applied electrical engineering* – Capítulo 15: “**Determinação da densidade de ligações cruzadas em borracha de estireno butadieno (SBR) para diferentes sistemas de vulcanização**” – Harison Franca dos Santos, Arthur Pimentel de Carvalho, Carlos Toshiyuki Hiranobe, Eduardo Roque Budemberg, **Gabriel Deltrejo Ribeiro**, Giovanni Barrera Torres, José Francisco Resende, Leonardo Lataro Paim, Leandra Oliveira Salmazo, Miguel Ángel Rodríguez Pérez e Renivaldo José dos Santos (2022). Editora Atena ISBN 978-65-5983-858-5 – DOI: [https://doi.org/10.22533/at.ed.585222\\_80115](https://doi.org/10.22533/at.ed.585222_80115).

#### **Trabalhos apresentados em Congressos durante a execução desta tese:**

- I Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (COBICET) – “*Estudo Comparativo da Influência das Cargas de Sílica e Carbonato de Cálcio Tratados com Agentes de Acoplamento em Compósito de Borracha Natural*” – **Gabriel Deltrejo Ribeiro**, Carlos

Toshiyuki Hiranobe, Elton Aparecido Prado Reis, Aldo Eloizo Job, Flavio Camargo Cabrera e Renivaldo José dos Santos (2020). ISBN: 978-65-88243-19-0.

- 1ª Reunião Técnica Virtual do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (RTVPosmat) – “*Carbonato de Cálcio Tratado na Substituição Parcial de Sílica em Compósitos de Borracha Natural*” – **Gabriel Deltrejo Ribeiro**, Carlos Toshiyuki Hiranobe, Elton Aparecido Prado Reis, Aldo Eloizo Job, Flávio Camargo Cabrera e Renivaldo Jose (2020). ISBN: 978-65-5941-065-1.

***Trabalhos apresentados em Congressos como colaborador durante a execução desta tese:***

- 1ª Reunião Técnica Virtual do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (RTVPosmat) – “*Avaliação das Propriedades Mecânicas dos Compósitos de Borracha Estireno Butadieno e Resíduo de Poliuretano*” – Carlos Toshiyuki Hiranobe, **Gabriel Deltrejo Ribeiro**, Flávio Camargo Cabrera, Cibele de Moraes Lima Sartori, Aldo Eloizio Job, Leonardo Lataro Paim e Renivaldo José dos Santos (2020). ISBN: 978-65-5941-065-1.
- II Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia (COBICET) – “*Avaliação do Negro de Fumo Pirolítico Proveniente dos Pneus de Caminhões e Aplicação em Matriz de Borracha Natural*” – Carlos Toshiyuki Hiranobe, **Gabriel Deltrejo Ribeiro**, Flávio Camargo Cabrera, Leonardo Lataro Paim, Aldo Eloizio Job e Renivaldo José dos Santos (2021). ISSN: 2764-0582 - DOI: 10.29327/143026.
- 24º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat) – “*Avaliação das propriedades do biocompósito de borracha natural e resíduo da goiaba (psidium guajava l.) como aplicação sustentável*” – Carlos T. Hiranobe, **Gabriel D. Ribeiro**, Gabriele R. Tolosa, Gleyson T. A. Santos, Flávio C. Cabrera, José F. R. da Silva, Leonardo L. Paim, Aldo E Job, Giovanni B. Torres e Renivaldo J. dos Santos (2022).
- XII Congresso Brasileiro de Análise Térmica e Calorimetria (CBRATEC) & V Congresso Pan-Americano de Análise Térmica e Calorimetria (CPANATEC) – “*Análises Térmicas do Carço de Pequi Para Uso Como Biomassa*” – Bruna Ruri Kobayachi, Pedro Henrique Mariano Santos, Carlos Toshiyuki Hiranobe, **Gabriel Deltrejo Ribeiro** e Renivaldo José dos Santos (2021).

RIBEIRO, G. D. **Revestimento térmico para habitações populares com compósitos expandidos de borracha de estireno-butadieno (SBR) com resíduo industrial couro.** 2024. 169f. Tese (Doutor em Ciência e Tecnologia de Materiais) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Rosana, 2024.

## RESUMO

Nos últimos anos, tem-se observado um interesse crescente na melhoria da eficiência energética e do conforto térmico em habitações populares, especialmente em regiões sujeitas a condições climáticas extremas. Os materiais convencionais utilizados na construção civil, como tijolos e concreto, evidenciam deficiência nas questões energéticas, resultando em elevadas temperaturas internas. Esse cenário não apenas impacta o bem-estar dos residentes, mas também aumenta o consumo de energia, especialmente para sistemas de ar-condicionado, podendo sobrecarregar a infraestrutura elétrica em áreas de clima quente, ocasionando interrupções no fornecimento de energia e consequências adversas para a comunidade e a indústria local. Este estudo propõe uma solução inovadora e sustentável: a utilização de borracha estireno-butadieno (SBR) expandida com raspa de couro micronizada, com propriedades de isolamento térmico. A capacidade de isolamento térmico dos compósitos foi avaliada por meio dos métodos de fluxo de calor, análise de fluxo de calor em placas quente/fria e método acústico por tubo de impedância. Destaca-se o compósito SBR/Couro 20 phr como uma alternativa viável, promissora e sustentável, apresentando significativa capacidade de isolamento térmico, com uma condutividade térmica de  $0,073 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  e atenuação de temperatura próxima de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , potencialmente contribuindo para o aumento do conforto e da qualidade de vida em áreas urbanas. Os resultados de isolamento térmico dos demais compósitos também superaram os materiais de construção tradicionais, como placas de construção, compensados, fibra de vidro, telhado de asfalto e telhas de cimento. O estudo demonstra a viabilidade do reaproveitamento do couro como carga de reforço em espumas à base de borracha para a produção de materiais isolantes térmicos, oferecendo uma solução sustentável para mitigar o aquecimento urbano e melhorar a qualidade de vida nas cidades.

**Palavras-chave:** Borracha SBR expandida, condutividade térmica, isolamento acústico, isolamento térmico e resíduo de couro.

RIBEIRO, G. D. **Thermal insulation for low-cost housing using expanded styrene-butadiene rubber (SBR) composites with industrial leather waste.** 2024. 169f. Thesis (Doctoral in Materials Science and Technology) São Paulo State University (UNESP), School of Engineering and Sciences, Rosana, 2024.

## **ABSTRACT**

In recent years, there has been a growing interest in improving energy efficiency and thermal comfort in public housing, especially in regions subject to extreme weather conditions. Conventional materials used in construction, such as bricks and concrete, show a lack of energy efficiency, resulting in high internal temperatures. This scenario not only impacts the well-being of residents but also increases energy consumption, especially for air conditioning systems, potentially overloading the electrical infrastructure in hot climate areas, causing interruptions in power supply and adverse consequences for the community and local industry. This study proposes an innovative and sustainable solution: the use of expanded styrene-butadiene rubber (SBR) with micronized leather shavings, which possess thermal insulation properties. The insulation capacity of the composites was assessed using heat flow methods, hot/cold plate heat flow analysis, and the impedance tube acoustic method. The SBR/Leather 20 phr composite stands out as a viable, promising, and sustainable alternative, exhibiting significant thermal insulation capacity with a thermal conductivity of  $0.073 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  and temperature attenuation close to  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , potentially contributing to increased comfort and quality of life in urban areas. The thermal insulation results of the other composites also surpassed traditional building materials, such as construction boards, plywood, fiberglass, asphalt roofing, and cement tiles. The study demonstrates the feasibility of reusing leather as a reinforcement filler in rubber-based foams for the production of thermal insulation materials, offering a sustainable solution to mitigate urban heating and improve the quality of life in cities.

**Keywords:** Expanded SBR rubber, thermal conductivity, acoustic insulation, thermal insulation, leather waste.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

<b>ABIEC</b>	- Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes
<b>ABNT</b>	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ADC</b>	- Azodicarbonamida
<b>AIBN</b>	- Azobisisobutironitrilo
<b>ASTM</b>	- Sociedade Americana de Testes e Materiais ( <i>American Society for Testing and Materials</i> ).
<b>ATR</b>	- Transformada de Fourier utilizada na análise dos dados do FT-IR ( <i>Attenuated total reflection</i> )
<b>BS</b>	- Poroso BS é um expansor à base de bicarbonato de sódio
<b>CETESB</b>	- Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
<b>CFCs</b>	- Clorofluorcarbonetos
<b>CFD</b>	- Deflexão da força de compressão ( <i>compression force deflection</i> )
<b>CIIR</b>	- Borracha de isobutileno-isopreno clorada
<b>cps</b>	- Centipoise (unidade dinâmica da viscosidade)
<b>CR</b>	- Borracha de cloropreno
<b>Cr<sup>3+</sup></b>	- Sulfato de cromo trivalente
<b>Cr<sup>6+</sup></b>	- Sulfato de cromo hexavalente
<b>CRI</b>	- Velocidade de cura da análise reométrica
<b>DMA</b>	- Análise dinâmico-mecânica ( <i>Dynamic-mechanical analysis</i> ).
<b>DPC</b>	- Deformação permanente em compressão (%)
<b>DSC</b>	- Calorimetria Exploratória Diferencial ( <i>Diferencial scanning calorimetry</i> )
<b>DTG</b>	- Derivada de primeira ordem da curva do gráfico do ensaio da TGA
<b>DTGS</b>	- Detector de sulfato de triglicina deuterado para um espectrômetro de infravermelho ( <i>deuterated triglycine sulfat</i> e)
<b>E'</b>	- Módulo de armazenamento
<b>E''</b>	- Módulo de perda
<b>EDX</b>	- Espectroscopia por energia dispersiva
<b>EPDM</b>	- Borracha de Etileno-propileno-dieno
<b>FMI</b>	- Fundo Monetário Internacional
<b>FRX</b>	- Fluorescência de Raios X ( <i>X-Ray Fluorescence</i> )
<b>FT-IR</b>	- Espectroscopia Vibracional de Absorção na região do IV com Transformada de Fourier (FT-IR) ( <i>Spectroscopy Fourier Transform Infrared</i> )
<b>HC</b>	- Alta Capacidade ( <i>High Capacity</i> )
<b>IECC</b>	- <i>International Energy Conservation Code</i>
<b>IFD</b>	- Deflexão da força de recuo ( <i>indentation force deflection</i> )

<b>ISO</b>	- <i>International Organization for Standardization</i>
<b>L</b>	- Dispersão do resíduo
<b>MBTS</b>	- Acelerador de Vulcanização - Dissulfeto de benzotiazila
<b>MEV</b>	- Microscopia Eletrônica de Varredura
<b>M<sub>H</sub></b>	- Torque máximo medido no reômetro
<b>M<sub>L</sub></b>	- Torque mínimo medido no reômetro
<b>MMT</b>	- Montmorilonita
<b>N<sub>0</sub></b>	- Densidade celular
<b>NBR</b>	- Norma Brasileira
<b>NBR</b>	- Borracha de acrilonitrila butadieno
<b>PCM</b>	- Materiais de Mudança de Fase ( <i>Phase Change Materials</i> )
<b>PCM</b>	- Materiais de mudança de fase
<b>PE</b>	- Borracha de Polietileno
<b>PEG 4000</b>	- Polietileno glicol (plastificante utilizado na vulcanização)
<b>phr</b>	- Partes por 100 partes de borracha ( <i>per hundred of rubber</i> )
<b>PLA</b>	- Ácido polilático
<b>PP</b>	- Polipropileno
<b>PS</b>	- Poliestireno
<b>PU</b>	- Poliuretano
<b>PVC</b>	- Cloreto de polivinila
<b>RT</b>	- Temperatura Ambiente ( <i>Room Temperature</i> )
<b>SBR</b>	- Borracha de Estireno-Butadieno
<b>SC-C</b>	- Poroso SC-C é um expansor à base de azodicarbonamida
<b>t<sub>90</sub></b>	- Tempo necessário para que o torque atinja 90% do torque máximo
<b>Tan δ</b>	- Tangente de delta (relação módulo de perda pelo módulo de armazenamento)
<b>T<sub>g</sub></b>	- Temperatura de transição vítrea
<b>TGA</b>	- Termogravimetria
<b>TMTM</b>	- Acelerador de Vulcanização - Monossulfeto de Tetrametiltiuram
<b>t<sub>s1</sub></b>	- Tempo, em minutos, necessário para aumentar o torque mínimo M <sub>L</sub> em uma unidade de torque
<b>USD</b>	- dólar dos Estados Unidos ( <i>United States Dollar</i> )
<b>UV</b>	- Radiação ultravioleta (UV)
<b>ΔM</b>	- Variação do torque medido no reômetro

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Benefícios do uso de resíduos para produção de materiais *ecofriendly*..... 32
- Figura 2.** Evolução do rebanho bovino do Brasil de 2012 a 2022. .... 39
- Figura 3.** Infográfico do perfil da carne brasileira em 2022..... 40
- Figura 4.** Couro após o tratamento com solução de sulfato básico de  $\text{Cr}^{3+}$  produzindo uma manta de couro que recebe o nome de *wet-blue*. Em (a) Manta de couro *wet-blue* esticada; (b) Pilha de couro *wet-blue* no curtume e em (c) Rebaixadeira e serragem (pó de rebaixadeira) resultante da operação de rebaixamento. .... 41
- Figura 5.** Formação da estrutura do elastômero SBR. Em (a) copolímero com os seus dois monômeros: estireno e butadieno, em (b) imagem do registro fotográfico e em (c) outra representação do SBR..... 46
- Figura 6.** Modelagem da vulcanização e mecanismo para melhor desempenho tribológico da borracha de estireno-butadieno em escala atômica. Em (a) Polimerização dos monômeros estireno e butadieno para formação do SBR e em (b) Estrutura espacial do SBR vulcanizado com detalhes da ligação cruzada formada com enxofre. .... 48
- Figura 7.** Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) apresentado por Wei, Y., Zhou, H., Deng, H. *et al.* de (A) uma espuma de células fechadas [149], (B) espuma de células parcialmente abertas [150] e (C) espuma de células abertas [151]. .... 50
- Figura 8.** Nucleação e crescimento de bolhas em função da energia livre..... 52
- Figura 9.** Decomposição do bicarbonato de sódio em carbonato de sódio, água e dióxido de carbono. .... 57
- Figura 10.** Decomposição do Azodicarbonamida (ADC) puro com reações primárias (i) e (ii), e reações secundárias que ocorrem como ácido isocianico (iii), (iv), (v) e (vi)..... 59
- Figura 11.** Registro fotográfico da borracha sintética tipo Estireno-Butadieno (SBR) 1502.. 62
- Figura 12.** Registro fotográfico do micronizador da marca SCHILLING: (a) Vista frontal do sistema de filtragem, que separa as partículas finas das mais grossas, assegurando uniformidade no tamanho das partículas processadas. (b) Vista lateral do moinho de facas, equipado com lâminas rotativas de alta velocidade que cortam ou trituram o material, facilitando a micronização eficiente. (c) Vista superior do processador, destacando a rosca sem fim utilizada para o transporte contínuo do material. .... 64
- Figura 13.** Registro fotográfico do couro: (a) Raspas de couro coletadas após o processo de rebaixo, mostrando a forma bruta e inicial do material. (b) Raspas de couro após o processo de micronização, destacando a transformação na textura e na granulometria para partículas finamente processadas. .... 64
- Figura 14.** Registro fotográfico dos agentes expansores fornecidos pela Proquitech: (a) Poroso SC-C, uma versão otimizada de Azodicarbonamida (ADC), especialmente desenvolvida para melhorar a eficiência e precisão no processo de expansão. (b) Poroso BS, um agente expensor

à base de bicarbonato de sódio, ideal para aplicações que requerem formação de células abertas em borrachas esponjosas. ....	67
<b>Figura 15.</b> Carbonato de Cálcio (a) registro fotográfico (b) fórmula química .....	70
<b>Figura 16.</b> Misturador aberto de cilindros – Makintec, mod. 379M. ....	72
<b>Figura 17.</b> Processamento da Borracha Estireno-Butadieno (SBR): do couro a vulcanização dos compósitos. ....	73
<b>Figura 18.</b> Protótipos de compósitos de borracha SBR expandida com resíduos de couro. (a) Placas de 190 x 190 mm, comprimento e largura, com espessura de $15,5 \pm 0,5$ mm, encaixadas. (b) Detalhe do encaixe sobreposto entre as placas através de rebaixos de 8,0 mm (c) Placas livres e detalhe do corte transversal de uma das placa. ....	74
<b>Figura 19.</b> Curva reométrica característica.....	78
<b>Figura 20.</b> Equipamento e Configuração de Teste para Medição da Condutividade Térmica. (a) Esquema do equipamento de análise de fluxo de calor utilizado para determinar a condutividade térmica conforme a norma ASTM C518, calibrado de acordo com a ASTM C1363. (b) Câmara de isolamento térmico apresentando a amostra do compósito SBR/Couro 50 phr, com dimensões de 190 x 190 mm e espessura de $15,5 \pm 0,5$ mm, posicionada entre duas câmaras como barreira térmica. Os quatro termopares frontais, destacados em azul, estão distribuídos nos centroides dos quatro quadrantes. ....	90
<b>Figura 21.</b> Esboço esquemático de um aparelho de tubo de impedância. ....	92
<b>Figura 22.</b> Curva reométrica, com 1° de oscilação do disco e isothermas de 160 °C, dos compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	93
<b>Figura 23.</b> Grau de Dispersão (L) do resíduo de couro na matriz de borracha SBR: A imagem mostra a dispersão do resíduo de couro em diferentes concentrações na matriz de borracha SBR. A linha contínua indica a goma pura (00 phr), utilizada como referência para análise comparativa dos compósitos com adição de couro. ....	96
<b>Figura 24.</b> Densidade de ligações cruzadas por inchamento Flory-Rehner (massa $\approx 0,25 \pm 0,05$ g, imersa em tolueno por 5 dias, após segue para a estufa por 24 horas a 60 °C) dos compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	97
<b>Figura 25.</b> Imagens relacionadas à raspa de couro micronizada in natura e ao compósito SBR/Couro 50 phr: (a) mostra raspa de couro micronizada para 50 mesh com diâmetro inferior a 0,297 mm; (b) apresenta o MEV das fibras da raspa de couro micronizada com ampliação de 50 vezes; (c) exibe uma ampliação de 1.000 vezes do compósito SBR/Couro 50 phr, as setas indicam as fibras de couro e o círculo vermelho indica a região ampliada em (d), que mostra uma ampliação de 5.000 vezes, destacando a característica fibrosa do couro e as camadas da matriz polimérica. ....	99
<b>Figura 26.</b> Densidade dos compósitos SBR/Couro expandidos (espumas) calculados de acordo com ASTM D297 [184] aplicando a Equação (6). ....	101
<b>Figura 27.</b> Densidade relativa, calculada conforme a ASTM D1622 [186] e a Equação (7) – que é a razão entre a densidade da borracha antes da vulcanização e expansão ( $\rho_s$ ) e a densidade	

após o processo de formação da espuma ( $\rho_f$ ) – e Porosidade, que representa a fração volumétrica de vazios ( $V_f$ ), determinada pela Equação (12)..... 102

**Figura 28.** Densidade celular ( $N_0$ ) determinada pela aproximação teórica de Kumar através da Equação (10), através da área da amostra sólida é determinado o número de células para um volume unitário..... 103

**Figura 29.** Imagens do MEV da **goma (00 phr)** com aproximação de (a) 50 vezes e (b)100 vezes. Análise da (c) Distribuições total dos poros por área, (d) Nova distribuição para poros com áreas até  $20.10^3 \mu\text{m}^2$  e (e)Imagem do registro fotográfico da espuma no formato cilíndrico 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura..... 104

**Figura 30.** Imagens do MEV para **SBR/Couro 10 phr** com aproximação de (a) 50 vezes e (b)100 vezes. Análise da (c) Distribuições total dos poros por área, (d) Nova distribuição para poros com áreas até  $20.10^3 \mu\text{m}^2$  e (e)Imagem do registro fotográfico da espuma no formato cilíndrico 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura..... 105

**Figura 31.** Imagens do MEV para **SBR/Couro 20 phr** com aproximação de (a) 50 vezes e (b)100 vezes. Análise da (c) Distribuições total dos poros por área, (d) Nova distribuição para poros com áreas até  $20.10^3 \mu\text{m}^2$  e (e)Imagem do registro fotográfico da espuma no formato cilíndrico 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura..... 105

**Figura 32.** Imagens do MEV para **SBR/Couro 30 phr** com aproximação de (a) 50 vezes e (b)100 vezes. Análise da (c) Distribuições total dos poros por área, (d) Nova distribuição para poros com áreas até  $20.10^3 \mu\text{m}^2$  e (e)Imagem do registro fotográfico da espuma no formato cilíndrico 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura..... 106

**Figura 33.** Imagens do MEV para **SBR/Couro 40 phr** com aproximação de (a) 50 vezes e (b)100 vezes. Análise da (c) Distribuições total dos poros por área, (d) Nova distribuição para poros com áreas até  $20.10^3 \mu\text{m}^2$  e (e)Imagem do registro fotográfico da espuma no formato cilíndrico..... 107

**Figura 34.** Imagens do MEV para **SBR/Couro 50 phr** com aproximação de (a) 50 vezes e (b)100 vezes. Análise da (c) Distribuições total dos poros por área, (d) Nova distribuição para poros com áreas até  $20.10^3 \mu\text{m}^2$  e (e)Imagem do registro fotográfico da espuma no formato cilíndrico 30 mm de diâmetro e 10 mm de espessura..... 107

**Figura 35.** Anisotropia dos compósitos de SBR com couro e a goma (00 phr) como referência. Determinada pela razão entre a maior e menor dimensão linear do poro. .... 109

**Figura 36.** Modelos reais de geometria 2D a partir de imagens MEV para espumas (a) SBR - Goma (00 phr), (b) SBR/Couro 10 phr, (c) SBR/Couro 20 phr e (d) SBR/Couro 30 phr..... 110

**Figura 37.** Espectroscopia de energia dispersiva de raio X - EDX do compósito SBR/Couro 50 phr (a) imagem da área analisada, (b) dispersão dos elementos químicos identificados, (c) tabela fornecida com os elementos identificados, (d) identificação do cromo nas fibras de couro presentes no compósito SBR/Couro 50 phr e (e) espectro do EDX..... 111

**Figura 38.** Em (a) é apresentado a raspa de couro micronizada com fibras na ordem de 50 mesh (diâmetro  $< 0,297$  mm) e em (b) representação estrutural do cromo ligado a estrutura do couro após o processamento de curtimento..... 114

<b>Figura 39.</b> Exemplos dos principais tipos de vibrações moleculares considerando a molécula de H <sub>2</sub> O. ....	115
<b>Figura 40.</b> Espectroscopia Vibracional de Absorção na região do IV com Transformada de Fourier (FT-IR) modo ATR (resolução espectral de 2 cm <sup>-1</sup> , detector DTGS com 120 scans e analisado sobre uma janela de cristal de diamante) dos compósitos de SBR com couro, da goma (00 phr) como referência e da raspa de couro micronizada.....	115
<b>Figura 41.</b> Espectroscopia Vibracional de Absorção na região do IV com Transformada de Fourier (FT-IR) modo ATR (resolução espectral de 2 cm <sup>-1</sup> , detector DTGS com 120 scans e analisado sobre uma janela de cristal de diamante) da raspa de couro micronizada.....	118
<b>Figura 42.</b> Histerese do ensaio de deformação com limite de 75% a velocidade constante de 6 mm min <sup>-1</sup> , para a (a) goma (00 phr) e os compósitos SBR/Couro (b) 10 phr, (c) 20 phr, (d) 30 phr, (e) 40 phr e (f) 50 phr. Essas imagens apresentam ao lado o detalhe das curvas de com a deflexão da força de compressão ( <i>compression force deflection</i> - CFD) e controle da deflexão da força de recuo ( <i>indentation force deflection</i> - IFD), respectivamente através das linhas contínuas e tracejadas. Em (g) o comparativo para todos os compósitos no ciclo 1 e em (h) o comparativo para todos os compósitos no ciclo 5. ....	119
<b>Figura 43.</b> Histerese do ensaio de deformação com limite de 75% a velocidade constante de 6 mm min <sup>-1</sup> , para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência.....	122
<b>Figura 44.</b> Tensão máxima do ensaio de deformação com limite de 75% a velocidade constante de 6 mm min <sup>-1</sup> , para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	123
<b>Figura 45.</b> Módulo de elasticidade do ensaio de deformação com limite de 75% a velocidade constante de 6 mm min <sup>-1</sup> , para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	124
<b>Figura 46.</b> Deformação permanente em compressão a 25% da espessura da espuma, em 70 °C por 24 h, e coeficiente de Poisson para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	126
<b>Figura 47.</b> Dureza Shore A aferida com um durômetro Kiltler e perda de volume por Abrasão medida através de um tambor rotativo com frequência de 40 rpm, 150 mm de diâmetro e distância nominal equivalente a 40 m, dos compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	129
<b>Figura 48.</b> Módulo de armazenamento (E') do DMA, no modo de flexão de três pontos, força perpendicular à espuma, frequência 2,0 Hz, razão de aquecimento 5 °C min <sup>-1</sup> , fator proporcional 1,1, amplitude 1,20 µm, força dinâmica máxima 5,0 N, para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	132
<b>Figura 49.</b> Curvas de tan δ do DMA, no modo de flexão de três pontos, força perpendicular à espuma, frequência 2,0 Hz, razão de aquecimento 5 °C min <sup>-1</sup> , fator proporcional 1,1, amplitude 1,20 µm, força dinâmica máxima 5,0 N, para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	134
<b>Figura 50.</b> Curva da Termogravimetria (TGA) para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. Usada atmosfera de N <sub>2</sub> com fluxo de 15 mL min <sup>-1</sup> , razão de aquecimento de 10 °C min <sup>-1</sup> e massa aproximada de 10 mg.....	136

- Figura 51.** Curva da Termogravimetria e DTG para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. Usada atmosfera de N<sub>2</sub> com fluxo de 15 mL min<sup>-1</sup>, razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> e massa aproximada de 10 mg..... 136
- Figura 52.** Curva da Termogravimetria e DTG para a raspa de couro micronizada. Usada atmosfera de N<sub>2</sub> com fluxo de 15 mL min<sup>-1</sup>, razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> e massa aproximada de 10 mg. .... 138
- Figura 53.** Curva da Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. Usada atmosfera de N<sub>2</sub> com fluxo de 15 mL min<sup>-1</sup>, razão de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup> e massa aproximada de 10 mg. .... 140
- Figura 54.** Condutividade térmica e atenuação térmica para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. Os compósitos ensaiados possuem 190 x 190 mm, comprimento e largura, com espessura de 15,5 ± 0,5 mm. .... 142
- Figura 55.** Curva característica de absorção acústica dos compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência, segundo a ASTM E1050-10, conduzido a 20 °C, no intervalo de 500-6500 Hz, para amostras com diâmetro de 30 mm e espessura de 10 mm. Os pontos cartesianos marcados em cada pico do gráfico representam as grandezas físicas dos eixos, indicados como (α; f(Hz))..... 145
- Figura 56.** Coeficiente de absorção acústica normalizado (α<sub>N</sub>) dos compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência, segundo a ASTM E1050-10, conduzido a 20 °C, no intervalo de 500-6500 Hz, para amostras com diâmetro de 30 mm e espessura de 10 mm. .... 146

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Condutibilidade térmica de compósitos de resíduos em aplicações de construção civil .....	31
<b>Tabela 2.</b> Massa molar e estrutura química dos reagentes .....	65
<b>Tabela 3.</b> Propriedades físico-químicas do Poroso SC-C .....	68
<b>Tabela 4.</b> Propriedades físico-químicas do Poroso BS .....	68
<b>Tabela 5.</b> Formulação padrão de vulcanização listada na sequência de incorporação, processamento e homogeneização .....	72
<b>Tabela 6.</b> Propriedades reométricas, com 1° de oscilação do disco e isotermas de 160 °C, dos compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	94
<b>Tabela 7.</b> Propriedades morfológicas dos poros das espumas de SBR com couro e a goma (00 phr) como referência .....	100
<b>Tabela 8.</b> Composição química dos constituintes do resíduo da raspa de couro por fluorescência de raios X (FRX) .....	113
<b>Tabela 9.</b> Principais picos evidenciados pelo FT-IR modo ATR (resolução espectral de 2 cm <sup>-1</sup> , detector DTGS com 120 scans e analisado sobre uma janela de cristal de diamante) dos compósitos de SBR com couro, da goma (00 phr) e da raspa de couro micronizada. ....	116
<b>Tabela 10.</b> Deformação permanente em compressão a 25% da espessura da espuma, em 70 °C por 24 h, e coeficiente de Poisson para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. ....	126
<b>Tabela 11.</b> Condutividade térmica e atenuação térmica para os compósitos SBR/Couro e a goma (00 phr) como referência. Os compósitos ensaiados possuem 190 x 190 mm, comprimento e largura, com espessura de 15,5 ± 0,5 mm. ....	142
<b>Tabela 12.</b> Comparação da condutividade térmica para diferentes matrizes poliméricas com cargas distintas e materiais usuais da construção civil que vem sendo pesquisado. ....	144

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>30</b>
2.1. Revestimento Térmico para Habitações Populares .....	30
2.2 Avanços em Materiais de Isolamento Térmico para Construção Sustentável .....	33
2.3 O Papel dos Resíduos de Couro na Sustentabilidade Ambiental e Industrial .....	38
2.4 Borracha de Estireno-Butadieno (SBR): Uma Jornada de Inovação desde o Campo de Batalha até a Indústria .....	44
2.5 Dinâmica de Formação de Espumas Expansivas e suas Aplicações em Isolamento Térmico .....	49
2.6 Propriedades e Processos de Agentes Expansores .....	55
<b>3. MATERIAIS .....</b>	<b>62</b>
3.1 Borracha Sintética SBR.....	62
3.2 Raspa de couro .....	63
3.3 Agentes de Cura .....	64
3.4 Agentes Expansores .....	66
3.5 Aditivos: Antioxidante e plastificantes .....	69
3.6 Carga de enchimento .....	70
<b>4. MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>71</b>
4.1 Método de preparação dos compósitos .....	71
4.2 Métodos de caracterização .....	76
4.2.1 Comportamento Reológico .....	77
4.2.2 Densidade de Ligações Cruzadas por Inchamento (Flory-Rehner).....	79
4.2.3 Densidade Relativa .....	80
4.2.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Histograma e Anisotropia .....	81
4.2.5 Densidade Celular e Distribuição do Tamanho das células.....	83
4.2.6 Fluorescência de Raios X (FRX).....	84
4.2.7 Espectroscopia Vibracional de Absorção na região do IV com Transformada de Fourier (FT-IR) .....	84
4.2.8 Dinâmica de Histerese: Teste de Compressão com Análise de Recuo.....	85
4.2.9 Deformação Permanente e coeficiente de Poisson .....	86

4.2.10 Perda por Abrasão.....	87
4.2.11 Dureza (Shore A).....	87
4.2.12 Análise Mecânica Dinâmica (DMA).....	88
4.2.13 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	88
4.2.14 Termogravimetria (TGA) .....	89
4.2.15 Condutividade Térmica .....	89
4.2.16 Absorção Acústica .....	91
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>93</b>
5.1 Comportamento Reológico .....	93
5.2 Análise da Densidade de Ligações Cruzadas por Inchamento (Flory-Rehner) .....	97
5.3 Morfologia Celular.....	99
5.4 Fluorescência de Raios X (FRX) .....	112
5.5 Espectroscopia Vibracional de Absorção na região do IV com Transformada de Fourier (FT-IR).....	115
5.6 Dinâmica de Histerese: Teste de Compressão com Análise de Recuo .....	119
5.7 Deformação Permanente e Coeficiente de Poisson.....	125
5.8 Dureza Shore A e Resistência a Abrasão .....	129
5.9 Análise Mecânica Dinâmica (DMA).....	132
5.10 Termogravimetria (TGA).....	135
5.11 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) .....	139
5.12 Condutividade térmica .....	141
5.13 Propriedade acústica.....	145
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>148</b>
<b>7. PERSPECTIVAS.....</b>	<b>151</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>152</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada das últimas décadas tem gerado uma série de desafios complexos para as cidades em todo o mundo. O aumento da densidade populacional e a expansão das atividades urbanas têm levado a um aquecimento significativo do ambiente urbano, resultando em um fenômeno conhecido como "ilhas de calor". Essas ilhas de calor são áreas urbanas onde as temperaturas são substancialmente mais altas do que as áreas circundantes, devido à absorção e retenção de calor pelos materiais urbanos e à escassez de áreas verdes [1].

O aquecimento urbano resultante das ilhas de calor acentua problemas de saúde, especialmente em populações vulneráveis como crianças e idosos, aumentando a incidência de doenças relacionadas ao calor e agravando condições médicas preexistentes. Este impacto na saúde pública está intrinsecamente ligado a consequências econômicas, pois o desconforto térmico eleva a demanda por refrigeração, o que impulsiona os custos de energia para residentes e empresas e pode diminuir a produtividade em ambientes de trabalho inadequadamente climatizados [2].

Além dos impactos na saúde humana, o aquecimento urbano também pode ter consequências econômicas significativas. Por exemplo, o aumento da demanda por energia para refrigeração durante os meses mais quentes pode levar a picos de consumo de eletricidade e aumentos nos custos de energia para os residentes e empresas. Além disso, o aumento das temperaturas urbanas pode afetar negativamente a produtividade no local de trabalho, especialmente em ambientes sem ar condicionado adequado [3, 4, 5].

As perspectivas futuras são alarmantes tanto em termos econômicos quanto ambientais. O Fundo Monetário Internacional (FMI) projeta uma contração de 3% na economia global até 2050, acelerada por uma redução antecipada de 3% já em 2020 devido aos impactos da pandemia do Coronavírus (COVID-19) [6]. Paralelamente, Erdem Cuce e colaboradores destacam que a temperatura média da superfície terrestre se elevou aproximadamente 0,8 °C, com dois terços desse aumento ocorrendo nas últimas três décadas [7].

Avançando nos estudos, o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC afirmou que a temperatura média global da superfície aumentou em aproximadamente 1,09 °C, tomando como linha de base pré-industrial o período de 1850-1900 até 2011-2020 [8]. Além disso, o relatório enfatiza que esse aquecimento recente é sem precedentes nos últimos milhares de anos e atribui a maior parte desse aumento às atividades humanas nas últimas décadas. Essa

tendência climática, intensificada pela ação humana, representa desafios significativos para a sustentabilidade global.

É essencial desenvolver estratégias e implementar ações que transformem o panorama atual. Especificamente na construção civil, é notório que materiais convencionais como tijolos e concreto geralmente apresentem baixa eficiência energética. [9]. Essa característica resulta em um aumento da temperatura interna das habitações, especialmente em regiões de clima quente. Tal condição não apenas reduz o conforto térmico dos residentes, mas também pode provocar problemas de saúde e incrementar o consumo de energia devido à maior dependência de sistemas de ar-condicionado [10].

Em algumas regiões e durante certos períodos, o consumo de energia elétrica para refrigeração residencial compete diretamente com a demanda do setor industrial. Esta competição pode sobrecarregar a infraestrutura elétrica existente, levando a falhas e interrupções no fornecimento de energia. Para prevenir colapsos mais graves, as concessionárias de energia podem ser forçadas a adotar medidas como redução de carga ou desligamentos programados em áreas específicas da rede. O tempo necessário para o restabelecimento do fornecimento de energia pode variar de algumas horas a vários dias, causando prejuízos significativos e desconforto não apenas para a população, mas também afetando o comércio, hospitais e indústrias [11].

Diante dos crescentes desafios climáticos e econômicos impostos pelo aquecimento urbano, torna-se crucial adotar estratégias que mitiguem esses impactos de forma integrada. A utilização de materiais termoisolantes em edifícios urbanos exemplifica uma solução eficaz, que não apenas reduz a transferência de calor e melhora o conforto interno, mas também diminui a carga sobre os sistemas de climatização. Esse avanço pode significativamente reduzir o consumo energético urbano, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental das cidades

Estudos têm demonstrado que o uso de materiais termoisolantes em edificações pode resultar em reduções significativas no consumo de energia destinada ao aquecimento e à refrigeração. Por exemplo, uma análise realizada pela Agência Internacional de Energia identificou que a implementação de medidas de eficiência energética, incluindo o uso de isolamento térmico, tem o potencial de reduzir o consumo de energia em edifícios urbanos em até 50%. Este dado sublinha a eficácia de adotar materiais termoisolantes como uma estratégia fundamental para a sustentabilidade urbana e para a mitigação dos impactos do aquecimento global em ambientes construídos [12].

Para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas e reduzir o consumo de energia elétrica, têm emergido pesquisas focadas em modelagem e simulações, bem como no desenvolvimento de materiais compósitos que funcionam como isolantes térmicos. Em particular, Sheng *et al.* [13] avaliaram a resiliência térmica de uma instalação de vida assistida durante episódios extremos de calor e frio, assim como durante interrupções no fornecimento de energia elétrica. Utilizando modelagem e análises detalhadas, o estudo examinou os impactos de treze medidas de eficiência energética sobre a resiliência térmica e a capacidade dos sistemas de energia de reserva. Os resultados indicaram que, embora a ventilação natural seja eficaz para reduzir o superaquecimento no verão, as medidas de isolamento térmico podem apresentar resultados variados entre os eventos de calor extremo e frio intenso.

Outro estudo significativo no campo da simulação computacional foi conduzido por Anter *et al.* [14], que exploraram a integração de materiais de mudança de fase (PCM) nas paredes de edifícios para aprimorar o desempenho térmico e reduzir o consumo de energia. Focado no ambiente árido de Aswan, Egito, durante o verão, este estudo analisou o comportamento térmico de longo prazo de paredes que incorporam diferentes tipos e espessuras de PCM. As simulações computacionais ajudaram a avaliar como essas variáveis afetam a temperatura interna das paredes. Os resultados mostraram que o PCM, especialmente o PCM RT-35HC — material de mudança de fase que opera eficientemente em temperaturas próximas à ambiente (RT = *Room Temperature*), muda de estado a 35 °C, possui alta capacidade de armazenamento térmico (HC = *High Capacity*) — é eficaz em diminuir o fluxo de calor interno e em manter a temperatura das paredes internas dentro de níveis ótimos, evidenciando seu potencial como uma solução eficiente para o controle térmico em climas quentes.

No contexto do desenvolvimento de materiais compósitos modernos, Kocyigit *et al.* [15] exploraram a fabricação de um concreto celular inovador que incorpora um material de mudança de fase (PCM) composto por ácido caprílico (C<sub>8</sub>H<sub>16</sub>O<sub>2</sub>), um ácido graxo saturado, infundido em pó de basalto residual. Este concreto foi projetado para o armazenamento de energia térmica em edificações e demonstrou capacidade de termorregulação solar, ajudando a manter as temperaturas internas mais estáveis e confortáveis. Embora a adição do PCM tenha resultado em uma redução moderada na resistência mecânica do concreto, o material exibiu alta eficiência em ciclos repetidos de fusão e solidificação. Essas características indicam que o concreto celular desenvolvido por Kocyigit *et al.* representa uma opção viável e sustentável para construções, contribuindo significativamente para a conservação de energia e uma termorregulação mais eficiente em edifícios.

Em um estudo realizado por Kumar *et al.* [5], é feita uma análise comparativa das propriedades e do desempenho de diversos materiais de isolamento utilizados na construção civil. Este estudo sublinha a crucial importância do isolamento para a eficiência energética e para o conforto térmico interno, considerando que o isolante é um determinante chave no controle do ganho e da perda de calor em edifícios. Propõe-se um esquema de otimização que avalia as propriedades térmicas, higroscópicas, acústicas, de reação ao fogo, ambientais e os custos associados a esses materiais, com uma atenção especial às variações necessárias em diferentes zonas climáticas. O estudo também aponta que o uso de materiais de isolamento sustentáveis pode reduzir significativamente o risco de superaquecimento durante os meses de verão e enfatiza a importância de considerar múltiplos critérios na seleção do isolamento mais adequado

Diante da necessidade urgente de reduzir o consumo de energia e promover a sustentabilidade ambiental, a demanda por materiais compósitos ecoeficientes tem crescido significativamente. Este interesse é evidenciado pelo aumento das iniciativas globais que visam desenvolver revestimentos térmicos eficazes, de baixa densidade e economicamente acessíveis, destacando-se como uma prioridade em centros de pesquisa e inovação tecnológica. Estas soluções visam não apenas melhorar o desempenho energético dos edifícios, mas também contribuir para a redução da pegada ecológica da indústria da construção [16].

Entre as várias alternativas exploradas, destaca-se o potencial dos compósitos poliméricos expandidos que incorporam resíduos de couro bovino, como aparas e raspas. Esses resíduos são ricos em sulfato de cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ), empregado no curtimento, que ao reagir com as fibras de colágeno do couro, não só melhora a resistência e a estabilidade do material, mas também realça sua estética após o tingimento. Além disso, o sulfato de cromo torna o couro mais resistente à decomposição bacteriana e aumenta sua durabilidade, características que são altamente valorizadas pela indústria de curtimento. A possibilidade de reaproveitamento desses resíduos para uso em materiais de construção inovadores destaca-se como uma estratégia sustentável e economicamente viável para lidar com resíduos e promover a ecoeficiência na indústria da construção [17].

No entanto, é crucial ressaltar os riscos associados ao manuseio e descarte inadequados de resíduos contendo cromo. Sob certas condições ambientais, o cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ), que é a forma mais estável, pode ser oxidado a cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ). O  $\text{Cr}^{6+}$  não é estável em sua forma isolada; ele existe predominantemente na forma de cromatos  $[\text{CrO}_4]^{2-}$  em meio básico ou dicromatos  $[\text{Cr}_2\text{O}_7]^{2-}$  em meio ácido. Essa oxidação ocorre especialmente sob exposição prolongada à luz solar ou na presença de agentes oxidantes, como óxidos de

manganês. O  $\text{Cr}^{6+}$ , presente na forma de cromatos, é carcinogênico e extremamente prejudicial ao meio ambiente. Essa transformação pode contaminar solos e corpos d'água, evidenciando a necessidade de práticas rigorosas de gestão ambiental e de tecnologias avançadas de tratamento para prevenir a poluição e garantir a sustentabilidade no uso desses materiais [18].

Matrizes poliméricas representam uma plataforma ideal para incorporação de resíduos de couro, devido à sua habilidade de encapsular esses materiais. Esta encapsulação não só previne a oxidação do cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ) em cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) — um processo que poderia liberar compostos carcinogênicos — mas também reforça as propriedades mecânicas dos compósitos, garantindo a segurança ambiental do material [19]. Adicionalmente, a inclusão de um agente expensor confere porosidade ao compósito, criando células de ar que diminuem sua condutividade térmica. Isso torna o material ideal para isolamento térmico [20]. A mesma porosidade facilita também a absorção de som, ampliando as aplicações do compósito para isolamento acústico [21]. Tal característica é extremamente benéfica em ambientes que necessitam de controle de ruído, como edifícios residenciais e industriais.

Na busca por alternativas sustentáveis, o estudo conduzido por Ulfat *et al.* [22], adotou uma abordagem inovadora ao reciclar resíduos da indústria de curtimento de couro, especificamente a poeira de polimento. Esses resíduos foram reprocessados em compósitos de isolamento térmico usando poliestireno. A pesquisa teve um duplo propósito: mitigar a poluição do ar derivada desses resíduos e criar um material compósito eficiente. A fusão da poeira de polimento com poliestireno e um agente expensor produziu um compósito poroso que exibe baixa condutividade térmica, elevada resistência à compressão e boa estabilidade térmica. Os resultados promissores sugerem que esses compósitos expandidos são adequados para uso como isolantes térmicos em construção civil, oferecendo uma solução ecológica que favorece a economia circular e reduz a poluição atmosférica.

Em estudos anteriores conduzidos por nosso grupo de pesquisa, Garcia *et al.* [23] desenvolveram uma técnica inovadora para reciclar resíduos de couro, utilizando-os como material de enchimento em espumas de borracha natural. O processo envolveu variar a quantidade de resíduos de couro incorporados nas espumas, que foram então examinadas através de testes morfológicos e mecânicos. Observamos que um aumento na proporção de resíduos de couro levou à formação de células menores e mais uniformes nas espumas, bem como a um aumento significativo em sua rigidez. Esses resultados demonstram a contribuição do nosso grupo para a área, apresentando uma estratégia eficaz e ecologicamente correta para a reutilização de resíduos de couro e indicando potencial para a produção de novos materiais sustentáveis e "*eco-friendly*".

No âmbito da inovação sustentável, os compósitos expandidos feitos de borracha de estireno butadieno (SBR) surgiram como uma opção promissora. Eles se destacam devido às suas propriedades térmicas superiores, baixo custo relativo em comparação com outras borrachas sintéticas, e a capacidade de integrar resíduos industriais, como resíduos de couro. Essa combinação não apenas promove a sustentabilidade ambiental, mas também implica um uso eficiente de subprodutos industriais. Importante destacar, esses compósitos também oferecem potencial como materiais acústicos, ampliando ainda mais suas aplicações práticas.

A absorção sonora dos materiais é crucial para aumentar o conforto acústico em ambientes residenciais, especialmente em áreas urbanas onde o ruído externo é uma preocupação constante. A utilização de compósitos expandidos de borracha de estireno butadieno (SBR) enriquecidos com resíduo industrial de couro não só oferece isolamento térmico eficaz, mas também ajuda a diminuir o ruído indesejado. Isso resulta em ambientes mais tranquilos e confortáveis para os moradores, particularmente em habitações populares. Além disso, essas características fazem dos compósitos expandidos uma solução versátil, multifuncional e sustentável, que atende a desafios globais e específicos na construção civil.

## 6. CONCLUSÃO

No desenvolvimento das espumas de borracha de estireno-butadieno (SBR), adotamos azodicarbonamida e bicarbonato de sódio como agentes de expansão, enxofre para a vulcanização e resíduos de couro micronizado na granulometria de 50 mesh como carga. Os compósitos de espuma SBR/Couro foram formulados em concentrações variando de 0 a 50 phr, com incrementos de 10 phr. Esses compósitos foram meticulosamente avaliados através de testes que abordaram suas propriedades reológicas, morfológicas, mecânicas, acústicas e térmicas. Os resultados obtidos não apenas validaram a eficácia dos métodos empregados, mas também destacaram a importância fundamental das descobertas, evidenciando a contribuição significativa deste estudo para o avanço no campo da ciência dos materiais.

As análises mecânicas dos compósitos SBR/Couro revelaram um conjunto de propriedades que os qualificam como materiais excepcionais para aplicações em revestimentos térmicos em habitações populares. Estes compósitos demonstraram aumento na dureza Shore A e no módulo de elasticidade, traduzindo-se em uma resistência aprimorada à abrasão e uma melhor capacidade de controlar a deformação permanente sob cargas mecânicas repetidas. Essas características não somente garantem a durabilidade dos compósitos, mas também asseguram a manutenção de seu desempenho térmico ao longo do tempo, evidenciando seu potencial como solução eficaz e durável para isolamento térmico.

A análise do desempenho térmico dos compósitos SBR/Couro confirmou sua alta capacidade de isolamento, fundamental para sua aplicação em revestimentos térmicos em habitações populares. A estrutura dos compósitos, definida por uma distribuição uniforme e controlada de poros, é crucial para a redução efetiva da condutividade térmica. Essa propriedade foi especialmente evidente no compósito SBR/Couro 20 phr, que se destacou por criar uma barreira térmica mais eficaz.

O estudo também revelou que a variação na densidade relativa e porosidade dos compósitos impacta diretamente a performance isolante. Para os compósitos SBR/Couro 10 e 20 phr, a densidade relativa e porosidade se mantiveram estáveis, oferecendo um equilíbrio ideal entre resistência mecânica e isolamento térmico. No entanto, com o aumento da adição de couro, notou-se uma elevação na densidade relativa e uma redução na porosidade, o que contribui para um aumento da transferência de calor através do material.

Embora os compósitos SBR/Couro apresentem uma densidade relativamente maior em comparação com materiais tradicionais como fibra de vidro e EPS, eles trazem várias vantagens. A maior densidade sugere uma resistência estrutural aprimorada e maior

durabilidade, o que resulta em um revestimento térmico mais robusto e duradouro. Adicionalmente, o isolamento proporcionado por esses compósitos requer uma espessura de apenas 15 mm para alcançar uma eficiência térmica comparável à de materiais tradicionais, que geralmente necessitam de espessuras maiores. Isso não apenas minimiza o consumo de material, mas também simplifica a instalação em ambientes com restrições de espaço, tornando os compósitos SBR/Couro uma escolha prática e eficiente para aplicações em construção civil.

Portanto, os compósitos SBR/Couro não apenas atendem às exigências de isolamento térmico para aplicações em construção civil, mas também oferecem uma solução eficaz para melhorar o conforto habitacional e a sustentabilidade ambiental. A capacidade desses materiais de oferecer isolamento superior com espessuras reduzidas comparativamente aos materiais isolantes tradicionais demonstra o potencial de inovação e aplicabilidade prática dos compósitos desenvolvidos.

Os resultados obtidos com os compósitos SBR/Couro são notavelmente superiores quando comparados aos materiais de construção tradicionais, tais como placas de construção ( $0,170 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), compensado ( $0,120 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), fibra de vidro, telhado de asfalto e telhas de cimento, cujas condutividades térmicas variam entre  $0,170$  e  $0,800 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Estes compósitos também mostram resultados competitivos quando comparados a outros compósitos, como casca de girassol/cânhamo de linho triturado ( $0,066 - 0,077 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) e cânhamo/concreto ( $0,060 - 0,542 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), e são superiores aos compósitos de poliestireno expandido/gesso ( $0,078 - 0,129 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), fibra de coco verde/bagaço com cola de poliuretano ( $0,140 - 0,170 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) e bagaço/Curauá/Juta com resina de poliuretano ( $0,141 - 0,157 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), entre outros já apresentados.

A incorporação de resíduos de couro como carga nos compósitos não apenas melhora o desempenho térmico, mas também reforça o compromisso com a sustentabilidade ambiental, uma vez que esses compósitos encapsulam eficientemente o cromo trivalente ( $\text{Cr}^{3+}$ ), presente nos resíduos de couro, prevenindo sua oxidação para a forma hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ), conhecida por seus efeitos carcinogênicos e ambientalmente nocivos.

Além disso, a redução da condutividade térmica nos compósitos SBR/Couro estabelece uma barreira eficaz contra a propagação de calor, contribuindo assim para a redução do consumo de energia e melhoria da eficiência térmica em habitações populares. Portanto, esses compósitos não apenas satisfazem os requisitos de desempenho térmico para materiais modernos de construção civil, mas também proporcionam uma solução sustentável, técnica e eficiente.

A integração de resíduos de couro como carga nos compósitos não só demonstra a capacidade de reutilizar materiais que de outra forma seriam descartados, mas também reduz significativamente a necessidade de recursos naturais. Esta abordagem alinha-se com as diretrizes globais para a redução do impacto ambiental, ajudando a diminuir a pegada ecológica associada à produção de materiais de construção.

A aplicação dos compósitos SBR/Couro em revestimentos térmicos para habitações populares vai além de simplesmente atender às demandas técnicas por durabilidade e eficiência; ela representa uma solução profundamente sustentável. O emprego de resíduos industriais de couro na fabricação destes compósitos exemplifica os princípios da economia circular, promovendo o uso responsável de recursos e reduzindo significativamente o impacto ambiental geralmente associado à produção de novos materiais de construção. Portanto, os compósitos de espuma SBR/Couro não se destacam apenas por sua avançada tecnologia, mas também por serem uma escolha ecologicamente consciente, oferecendo um modelo inovador para a modernização das construções em habitações populares.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MIRRAHIMI, S. *et al.* **The effect of building envelope on the thermal comfort and energy saving for high-rise buildings in hot-humid climate.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 1508-1519, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.055>.
- [2] HEAVISIDE, C.; MACINTYRE, H.; VARDOLAKIS, S. **The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment.** *Current Environmental Health Reports*, v. 4, p. 296-305, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>.
- [3] BARBOSA, H. P.; AMORIM, M. C. C. T. **Clima urbano em Presidente Prudente/SP: Diferenças térmicas e higrométricas urbano/rural em episódios de outono.** *Revista Geonorte*, v. 3, n. 9, p. 220-232, 2016.
- [4] IJJADA, N.; NAYAKA, R. R. **Review on properties of some thermal insulating materials providing more comfort in the Building.** *Materials Today: Proceedings*, v. 58, n. 4, p. 1354-1359, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.230>.
- [5] KUMAR, D.; ALAM, M. *et al.* **Comparative analysis of building insulation material properties and performance.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 131, p. 110038, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.
- [6] HETIMY, S. *et al.* **Exploring the potential of sheep wool as an eco-friendly insulation material: A comprehensive review and analytical ranking.** *Sustainable Materials and Technologies*, v. 39, e00812, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00812>.
- [7] CUCE, E.; CUCE, P. M.; WOOD, C. J.; RIFFAT S. B. **Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 34, p. 273-299, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>.
- [8] MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- [9] VIJAYAN, D. S. *et al.* **Evaluation of the impact of thermal performance on various building bricks and blocks: A review.** *Environmental Technology & Innovation*, v. 23, p. 101577, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101577>.
- [10] FERDYN-GRYGIEREK, Joanna; SARNA, Izabela; GRYGIEREK, Krzysztof. **Effects of climate change on thermal comfort and energy demand in a single-family house in Poland.** *Buildings*, v. 11, n. 12, p. 595, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11120595>.
- [11] STONE JR, Brian *et al.* **How blackouts during heat waves amplify mortality and morbidity risk.** *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 22, p. 8245-8255, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09588>.
- [12] AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Energy Efficiency 2018: Analysis and Outlooks to 2040.** Paris: IEA, 2018.
- [13] SHENG, Maggie *et al.* **Assessing thermal resilience of an assisted living facility during heat waves and cold snaps with power outages.** *Building and Environment*, v. 230, p. 110001, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110001>.
- [14] ANTER, Ayman G. *et al.* **Thermal performance and energy saving using phase change materials (PCM) integrated in building walls.** *Journal of Energy Storage*, v. 67, p. 107568, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107568>.

- [15] KOCYIGIT, Fatih *et al.* **Thermal energy saving and physico-mechanical properties of foam concrete incorporating form-stabilized basalt powder/capric acid based composite phase change material.** Journal of Cleaner Production, v. 414, p. 137617, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137617>.
- [16] HUBBE, Martin A. **Sustainable Composites: A Review with Critical Questions to Guide Future Initiatives.** Sustainability, v. 15, n. 14, p. 11088, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151411088>.
- [17] PATI, Anupama; CHAUDHARY, Rubina; SUBRAMANI, Saravanabhavan. **A review on management of chrome-tanned leather shavings: a holistic paradigm to combat the environmental issues.** Environmental Science and Pollution Research, v. 21, p. 11266-11282, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3055-9>.
- [18] SHARMA, Pooja *et al.* **Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction.** Bioengineered, v. 13, n. 3, p. 4923-4938, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273>.
- [19] KILIÇ, Eylem *et al.* **Valorization strategy for leather waste as filler for high-density polyethylene composites: analysis of the thermal stability, insulation properties and chromium leaching.** Polymers, v. 13, n. 19, p. 3313, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13193313>.
- [20] HU, Feng; WU, Siyu; SUN, Yugang. **Hollow-structured materials for thermal insulation.** Advanced Materials, v. 31, n. 38, p. 1801001, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201801001>.
- [21] NEVES DE ALENCAR, L.; PAIVA F. F. G.; OKIMOTO, F. S. *et al.* **Natural rubber/wood composite foam: Thermal insulation and acoustic isolation materials for construction.** Cellular Polymers, v. 42, n. 2, p. 55-72, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/02624893231151364>.
- [22] ULFAT, Wajad *et al.* **Reuse of Buffing Dust-Laden Tanning Waste Hybridized with Poly-Styrene for Fabrication of Thermal Insulation Materials.** Sustainability, v. 15, n. 3, p. 1958, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15031958>.
- [23] GARCIA, Nelissa Goncalves *et al.* **Natural rubber/leather waste composite foam: A new eco-friendly material and recycling approach.** Journal of Applied Polymer Science, v. 132, n. 11, p. 41636, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.41636>.
- [24] NEMATCHOUA, M. K.; OROSA, J. A. **Building construction materials effect in tropical wet and cold climates: A case study of office buildings in Cameroon.** Case Studies in Thermal Engineering, v. 7, p. 55-65, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2016.01.007>.
- [25] OUHAIBI, S. *et al.* **Thermal performance of new ecological material integrated into residential building in semi-arid and cold climates.** Applied Thermal Engineering, v. 181, p. 115933, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115933>.
- [26] CHANG, X. *et al.* **Superelastic carbon aerogels: an emerging material for advanced thermal protection in extreme environments.** Advanced Functional Materials, v. 33, n. 26, p. 2215168, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202215168>.
- [27] CUCE, Erdem; CUCE, Pinar Mert; WOOD, Christopher J.; RIFFAT, Saffa B. **Toward aerogel based thermal superinsulation in buildings: A comprehensive review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 34, p. 273-299, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.017>.
- [28] JESTER, Thomas C. (Ed.). **Twentieth-century building materials: History and conservation.** Los Angeles: Getty Publications, 2014. 320 p.
- [29] SANGMESH, B. *et al.* **Development of sustainable alternative materials for the construction of green buildings using agricultural residues: A review.** Construction and Building Materials, v. 368, p. 130457, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.

- [30] LU, J. *et al.* **Design of fire resistant, sound-absorbing and thermal-insulated expandable polystyrene based lightweight particleboard composites.** Construction and Building Materials, v. 305, p. 124773, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124773>.
- [31] ZHANG, H. *et al.* **Experimental study of the thermal conductivity of polyurethane foams.** Applied Thermal Engineering, v. 115, p. 528-538, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.057>.
- [32] LAKREB, N. *et al.* **Physical properties and thermal conductivity of cork-based sandwich panels for building insulation.** Construction and Building Materials, v. 368, p. 130420, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130420>.
- [33] YAN, Q.; MENG, Z.; LUO, J.; WU, Z. **Experimental study on improving the properties of rock wool and glass wool by silica aerogel.** Energy and Buildings, v. 247, p. 111146, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111146>.
- [34] RAMLI SULONG, N. H.; MUSTAPA, S. A. S.; ABDUL RASHID, M. K. **Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review.** Journal of Applied Polymer Science, v. 136, p. 47529, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.47529>.
- [35] LIUZZI, S. *et al.* **Straw based materials for building retrofitting and energy efficiency.** Key Engineering Materials, v. 678, p. 50-63, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.678.50>.
- [36] MAHIEU, A.; ALIX, S.; LEBLANC, N. **Properties of particleboards made of agricultural by-products with a classical binder or self-bound.** Industrial Crops and Products, v. 130, p. 371-379, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.094>.
- [37] WALKER, R.; PAVIA, S. **Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes.** Construction and Building Materials, v. 64, p. 270-276, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>.
- [38] SAN-ANTONIO-GONZÁLEZ, Alicia *et al.* **Lightweight material made with gypsum and EPS waste with enhanced mechanical strength.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 2, 04015101, 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001382).
- [39] SUTCU, M. *et al.* **Effect of olive mill waste addition on the properties of porous fired clay bricks using Taguchi method.** Journal of Environmental Management, v. 181, p. 185-192, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.023>.
- [40] GUNA, Vijaykumar *et al.* **Engineering sustainable waste wool biocomposites with high flame resistance and noise insulation for green building and automotive applications.** Journal of Natural Fibers, v. 18, n. 11, p. 1871-1881, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1701610>.
- [41] ALI, M. *et al.* **Characteristics of agro waste fibers as new thermal insulation and sound absorbing materials: hybrid of date palm tree leaves and wheat straw fibers.** Journal of Natural Fibers, v. 19, n. 13, p. 6576-6594, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1929647>.
- [42] GUNA, Vijaykumar *et al.* **Wool and coir fiber reinforced gypsum ceiling tiles with enhanced stability and acoustic and thermal resistance.** Journal of Building Engineering, v. 41, p. 102433, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102433>.
- [43] PEDREÑO-ROJAS, M. A. *et al.* **Eco-efficient acoustic and thermal conditioning using false ceiling plates made from plaster and wood waste.** Journal of Cleaner Production, v. 166, p. 690-705, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.077>.
- [44] LIUZZI, S.; STEFANIZZI, P. **Experimental investigation on lightweight and lime stabilized earth composites.** Key Engineering Materials, v. 666, p. 31-45, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.666.31>.

- [45] PINTO, C. C.; CARVALHO, R. F. *Thermal performance evaluation of a low-cost housing ceiling prototype made with gypsum and sisal fibre panels*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 296, n. 1, p. 012015, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/296/1/012015.
- [46] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [47] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ASHRAE Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings*. Atlanta: ASHRAE, 2019.
- [48] INTERNATIONAL CODE COUNCIL. *International Energy Conservation Code (IECC)*. Country Club Hills, IL: ICC, 2021.
- [49] 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, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>.
- [50] ASDRUBALI, Francesco; D'ALESSANDRO, Francesco; SCHIAVONI, Samuele. *A review of unconventional sustainable building insulation materials*. Sustainable Materials and Technologies, v. 4, p. 1-17, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.
- [51] HADDADI, Manel *et al. Experimental and modeling study of effective thermal conductivity of polymer filled with date palm fibers*. Polymer Composites, v. 28, n. 8, p. 1712-1719, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23741>.
- [52] COLUSSO, Izabele. *Forças regionais, formas urbanas e estrutura interna da cidade: um estudo de relações*. 2015. 192 f. Tese (Doutorado em Urbanismo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- [53] BINICI, H.; AKSOĞAN, O. *Eco-friendly insulation material production with waste olive seeds, ground PVC and wood chips*. Journal of Building Engineering, v. 5, p. 260-266, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.01.008>.
- [54] PISELLO, A. L. *et al. Traditional and Innovative Materials for Energy Efficiency in Buildings*. Key Engineering Materials, v. 678, p. 14-34, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.678.14>.
- [55] PUGH, R. J. *Foaming, foam films, antifoaming and defoaming*. Advances in Colloid and Interface Science, v. 64, p. 67-142, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(95\)00280-4](https://doi.org/10.1016/0001-8686(95)00280-4).
- [56] ISLAM, M. M. U. *et al. Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles*. Construction and Building Materials, v. 408, p. 133658, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133658>.
- [57] ZÁLESKÁ, M. *et al. Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability*. Construction and Building Materials, v. 225, p. 709-722, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168>.
- [58] CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2007.
- [59] VIJAYKUMAR, K. C. K.; SRINIVASAN, P. S. S.; DHANDAPANI, S. *A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer*. Energy and Buildings, v. 39, p. 886, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.009>.

- [60] BOONKERDRATTANASAK, T. *Measurement of thermal conductivity of construction materials using transient hot wire probe*. MEng Thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, p. 7, 2007.
- [61] ARKAR, C.; DOMJAN, S.; MEDVED, S. *Lightweight composite timber façade wall with improved thermal response*. Sustainable Cities and Society, v. 38, p. 25-332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.011>.
- [62] LIU, K. *et al.* *Effect of physicochemical structure of natural fiber on transverse thermal conductivity of unidirectional abaca/bamboo fiber composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 43, n. 8, p. 1234-1241, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.02.020>.
- [63] HO, T. H. *et al.* *Structural, mechanical, electronic and thermodynamic analysis of calcium aluminum silicate crystalline phases in stone wool insulation materials: A first-principles study*. Materials Today Communications, v. 38, p. 107845, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107845>.
- [64] DAI, H.; GAO, H.; YANG, P.; MO, J.; ZHANG, H.; LEI, S.; WANG, L. *Thermal insulation performance of rock wool reinforced kaolinite-based porous geopolymer*. Applied Clay Science, v. 2446, p. 107176, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107176>.
- [65] YIN, Y. *et al.* *Thermal environment analysis of enclosed dome with double-layered PTFE fabric roof integrated with aerogel-glass wool insulation mats: On-site test and numerical simulation*. Energy and Buildings, v. 254, p. 111621, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111621>.
- [66] PENG, S. *et al.* *Experimental research on employed expanded polystyrene (EPS) for lightened sulfate heave of subgrade by thermal insulation properties*. Geotextiles and Geomembranes, v. 48, n. 4, p. 516-523, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.02.009>.
- [67] HU, L. *et al.* *Design and preparation of shape memory phenol-formaldehyde foam composites with excellent thermal stability and mechanical properties*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 174, p. 107738, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107738>.
- [68] STERNBERG, J.; SEQUERTH, O.; PILLA, S. *Structure-property relationships in flexible and rigid lignin-derived polyurethane foams: A review*. Materials Today Sustainability, v. 25, p. 100643, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100643>.
- [69] REINERTE, S.; CABULIS, U.; VIKSNA, A. *The quantification of gaseous chemical compounds in the smoke from rigid polyurethane and rigid polyisocyanurate foam by a standardless evolved gas analysis method*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 177, p. 106270, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106270>.
- [70] LIAO, J. *et al.* *Lightweight and recyclable hybrid multifunctional foam based cellulose fibers with excellent flame retardant, thermal, and acoustic insulation property*. Composites Science and Technology, v. 244, p. 110315, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110315>.
- [71] GAMA, N.; FERREIRA, A.; BARROS-TIMMONS, A. *3D printed cork/polyurethane composite foams*. Materials & Design, v. 179, p. 107905, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107905>.
- [72] RASHAD, Alaa M. *Lightweight expanded clay aggregate as a building material—An overview*. Construction and Building Materials, v. 170, p. 757-775, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.009>.
- [73] LIU, J. *et al.* *Foam concrete nanocomposites synergistic integration of ultrasonically exfoliated two-dimensional vermiculite nanoplatelets and expanded vermiculite: Mechanical and thermal performance optimisation*. Journal of Building Engineering, v. 82, p. 108272, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108272>.

- [74] RECUPIDO, F. *et al.* **Rigid composite bio-based polyurethane foams: From synthesis to LCA analysis.** *Polymer*, v. 267, p. 125674, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125674>.
- [75] VALÉRIE GRENON, V.; WAHID MAREF, W.; OUELLET-PLAMONDON, C. M. **Multi-property characterization of an experimental material composed of *Pleurotus ostreatus* mycelium and ash wood chips compared with glass wool and hemp wool.** *Construction and Building Materials*, v. 409, p. 133941, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133941>.
- [76] MLHEM, A. *et al.* **High-performance, renewable thermal insulators based on silylated date palm fiber-reinforced poly( $\beta$ -hydroxybutyrate) composites.** *Developments in the Built Environment*, v. 16, p. 100240, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100240>.
- [77] DUBOIS, V. *et al.* **Performances of flax shive-based lightweight composites with rapid hardening.** *Construction and Building Materials*, v. 165, p. 17-27, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.239>.
- [78] BALLAGH, K. O. **Acoustical properties of wool.** *Applied Acoustics*, v. 48, n. 2, p. 101-120, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(95\)00042-8](https://doi.org/10.1016/0003-682X(95)00042-8).
- [79] SIGI KUMAR, T. S. *et al.* **Experimental evaluation of the thermal performance of coir mat and green facade as wall insulation in a tropical climate.** *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 40, p. 101757, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101757>.
- [80] JI, Y.; SUN, Q. **Experimental and numerical investigation of recycled rubber foam concrete.** *Alexandria Engineering Journal*, v. 76, p. 573-594, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.057>.
- [81] JIN, Z. *et al.* **Characterization of multifunctional panels from jute fibers for interior wall covering.** *Industrial Crops and Products*, v. 167, p. 113530, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113530>.
- [82] ASDRUBALI, F. *et al.* **Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment.** *Building and Environment*, v. 95, p. 145-159, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.003>.
- [83] MERILLAS, B. *et al.* **Polyurethane foam scaffold for silica aerogels: effect of cell size on the mechanical properties and thermal insulation.** *Materials Today Chemistry*, v. 26, p. 101257, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2022.101257>.
- [84] CHEN, W. *et al.* **Fabrication and characterization of gefitinib-releasing polyurethane foam as a coating for drug-eluting stent in the treatment of bronchotracheal cancer.** *International Journal of Pharmaceutics*, v. 548, p. 803-811, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2017.10.026>.
- [85] IDOWU, A. *et al.* **3D graphene foam-reinforced polymer composites-a review.** *Carbon*, v. 135, p. 52-71, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.04.024>.
- [86] HU, T. *et al.* **Stretchable and magneto-sensitive strain sensor based on silver nanowire polyurethane sponge enhanced magnetorheological elastomer.** *Materials and Design*, v. 156, p. 528-537, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.024>.
- [87] JI, Z. *et al.* **Improved dimensional stability of styrene butadiene rubber/ethylene vinyl acetate composite foams with skeleton support structure based on alternately cross-linking process.** *Polymer*, v. 157, p. 103-110, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.028>.
- [88] XIANG, B. *et al.* **Microcellular silicone rubber foams: The influence of reinforcing agent on cellular morphology and nucleation.** *Polymer Engineering & Science*, v. 59, n. 1, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.24857>.

- [89] XU, Y. *et al.* **Fabrication and mechanism of poly(butylene succinate) urethane ionomer microcellular foams with high thermal insulation and compressive feature.** European Polymer Journal, v. 99, p. 250-258, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.12.032>.
- [90] JI, J. *et al.* **Enhanced dimensional stability and mechanical properties of SBR/EVA foam by a scaffold structure constructed in the bubble cavity-wall.** Composites Science and Technology, v. 213, p. 108936, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.108936>.
- [91] EZ-ZAHRAOUI, S. *et al.* **Strengthening effect of phosphate sludge by-product and styrene-butadiene rubber on the properties of high-density polyethylene composites.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 166, p. 107378, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107378>.
- [92] BÉLANGER, N.; MACEK, H. *et al.* **Evaluating corn-based biochar as an alternative to carbon black in styrene-butadiene rubber composites.** Materials Today Communications, v. 34, p. 105218, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105218>.
- [93] BALACHANDRAKURUP, V.; GOPALAKRISHNAN, J. **Enhanced performance of cellulose nanofibre reinforced styrene butadiene rubber nanocomposites modified with epoxidised natural rubber.** Industrial Crops and Products, v. 183, p. 114935, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114935>.
- [94] JIANG, C. *et al.* **Converting waste lignin into nano-biochar as a renewable substitute of carbon black for reinforcing styrene-butadiene rubber.** Waste Management, v. 102, p. 732-742, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.019>.
- [95] REMESH, A. *et al.* **Effect of Boron Carbide on Physical Properties of Styrene Butadiene Rubber.** Materials Today: Proceedings, v. 24, n. 4, p. 2085-2093, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.665>.
- [96] JAFARPOURA, E.; SHOJAIEIA, A.; AHMADIJOKANI, F. **High-performance styrene-butadiene rubber nanocomposites based on carbon nanotube/nanodiamond hybrid with synergistic thermal conduction characteristics and electrically insulating properties.** Polymer, v. 196, p. 122470, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122470>.
- [97] SALKHI KHASRAGHI, S.; MOMENILANDI, M.; SHOJAEI, A. **Tire tread performance of silica-filled SBR/BR rubber composites incorporated with nanodiamond and nanodiamond/nano-SiO<sub>2</sub> hybrid nanoparticle.** Diamond and Related Materials, v. 126, p. 109068, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109068>.
- [98] RYBIŃSKI, P.; MIRKHODJAEV, U. Z. *et al.* **The effect of the lignocellulosic filler on the reduction of fire hazard of styrene-butadiene rubber composites, including the reduction of smoke, PCDD/F, PAH emissions and toxicity during its thermal decomposition.** Polymer Testing, v. 118, p. 107900, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107900>.
- [99] SANTOS, R. J. dos *et al.* **Sugarcane bagasse ash: new filler to natural rubber composite.** Polímeros, v. 24, n. 6, p. 646-653, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.1547>.
- [100] CANHADA, J. C. S. *et al.* **Production of new concrete with leather tannery waste used as partial replacement of the natural sand.** Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 25, p. 944-953, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01586-4>.
- [101] SANTOS, R. J.; AGOSTINI, D. L. S. *et al.* **Recycling leather waste: Preparing and studying on the microstructure, mechanical, and rheological properties of leather waste/rubber composite.** Polymer Composites, v. 36, n. 12, p. 2275-2281, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.23140>.
- [102] HIRANOBE, Carlos T. *et al.* **Evaluation of the properties of natural rubber bio composite and guava residue (*Psidium guajava L.*) as sustainable application.** Materials Research, v. 26, n. 1, e20220515, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2022-0515>.

- [103] HAO, D. *et al.* **Sustainable leather making-Anamphoteric organic chrome-free tanning agents based on recycling waste leather.** Science of the Total Environment, v. 867, p. 161531, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161531>.
- [104] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES (ABIEC). **BEEF REPORT 2023: Perfil da Pecuária no Brasil.** São Paulo: ABIEC, 2023. Disponível em: <https://www.abiec.com.br/wp-content/uploads/Final-Beef-Report-2023-Completo-Versao-web.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- [105] CARDOSO, Abmael da Silva *et al.* **Intensification: A Key Strategy to Achieve Great Animal and Environmental Beef Cattle Production Sustainability in Brachiaria Grasslands.** Sustainability, v. 12, n. 16, p. 6656, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12166656>.
- [106] MARTIN, Guillaume; BARTH, Kerstin; BENOIT, Marc *et al.* **Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review.** Agricultural Systems, v. 181, p. 102821, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102821>.
- [107] MANCINI, Sandro D.; MEDEIROS, Gerson A.; PAES, Michel X. *et al.* **Circular Economy and Solid Waste Management: Challenges and Opportunities in Brazil.** Circular Economy and Sustainability, v. 1, p. 261-282, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00031-2>.
- [108] ALVES, Jean Carlos Machado. **Desenvolvimento de consciência socioambiental em cadeias produtivas de base artesanal: uma proposta metodológica.** 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- [109] PRIEBE, Guilherme Pantaleão da Silva. **Avaliação das condições operacionais da produção de oleína obtida a partir de tecido subcutâneo de peles bovinas.** 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- [110] PEREIRA, Samanta Vieira. **Obtenção de cromato de sódio a partir das cinzas de incineração de resíduos de couro do setor calçadista visando à produção de sulfato básico de cromo.** 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [111] GUTTERRES, Mariliz. **Tendencias emergentes en la industria del cuero.** Boletín Técnico de la Asociación Química Española de la Industria de Couro, v. 57, p. 22-27, 2006.
- [112] FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Guia técnico do setor de curtumes.** Belo Horizonte: Feam, 2018. 58 p.
- [113] CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Produção e descarte de pó de rebaixadeira na indústria de curtume.** São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <https://www.cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 13 abr. 2024.
- [114] BRASIL. Decreto nº 8468, de 8 de setembro de 1976. **Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 set. 1976. Seção 1, p. 12987.
- [115] BRASIL. Decreto nº 15425, de 25 de janeiro de 1980. **Altera a redação do art. 51 a 55 do Decreto 8468/76 que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 26 jan. 1980. Seção 1, p. 1550.
- [116] ESTADOS UNIDOS. **Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act of 1980 (CERCLA).** Pub. L. No. 96-510, 94 Stat. 2767, 1980. Alterada por Pub. L. No. 113-2, 2013. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 13 abr. 2024.

- [117] OLIVEIRA, L. C. A. *et al.* **Preparation of activated carbon from leather waste: a new material containing small particle of chromium oxide.** *Materials Letters*, v. 62, n. 21-22, p. 3710-3712, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.04.064>.
- [118] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.
- [119] BINI, C.; MALECI, L.; ROMANIN, A. **The chromium issue in soils of the leather tannery district in Italy.** *Journal of Geochemical Exploration*, v. 96, n. 2-3, p. 194-202, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2007.03.008>.
- [120] NASR, M. M.; GONDAL, Mohammed Ashraf; SEDDIGI, Z. S. **Detection of hazardous pollutants in chrome-tanned leather using locally developed laser-induced breakdown spectrometer.** *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 175, p. 387-395, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1538-9>.
- [121] GONG, Ying; LIU, Xiaoling; HUANG, Li; CHEN, Wuyong. **Stabilization of chromium: An alternative to make safe leathers.** *Journal of Hazardous Materials*, v. 179, n. 1-3, p. 540-544, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.037>.
- [122] FUCK, Wagner Fernando. **Influência do teor de cromo e do tipo de óleo na formação do cromo hexavalente no couro.** 2008. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre.
- [123] SHAMS, Khaled Mahmud *et al.* **Soil contamination from tannery wastes with emphasis on the fate and distribution of tri- and hexavalent chromium.** *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 199, p. 123-137, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9865-y>.
- [124] FERNANDES, H. R.; FERREIRA, J. M. F. **Recycling of chromium-rich leather ashes in porcelain tiles production.** *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, n. 16, p. 4657-4663, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.03.037>.
- [125] FERREIRA, M. J.; ALMEIDA, M. F. **Recycling of Leather Waste Containing Chromium—A Review.** *Materials Science Research Journal*, v. 5, n. 4, p. 327-381, 2011. URL: <https://hdl.handle.net/10216/123772>.
- [126] PARISI, M.; NANNI, A.; COLONNA, M. **Recycling of Chrome-Tanned Leather and Its Utilization as Polymeric Materials and in Polymer-Based Composites: A Review.** *Polymers*, v. 13, p. 429, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13030429>.
- [127] AMBONE, T.; JOSEPH, S.; DEENADAYALAN, E.; MISHRA, S.; JAISANKAR, S.; SARAVANAN, P. **Polylactic Acid (PLA) Biocomposites Filled with Waste Leather Buff (WLB).** *Journal of Polymer Environment*, v. 25, p. 1099-1109, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0891-3>.
- [128] RAVICHANDRAN, K.; NATCHIMUTHU, N. **Natural rubber: leather composites.** *Polímeros*, v. 15, n. 2, p. 102-108, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282005000200008>.
- [129] EL-SABBAGH, S. H.; MOHAMED, O. A. **Recycling of Chrome-tanned Leather Waste in Acrylonitrile Butadiene Rubber.** *Journal of Applied Polymer Science*, v. 121, p. 979-988, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.33692>.
- [130] MEŞE, P.; KARAAGAÇ, B.; UYANIK, N. **Investigating Effect of Chrome Tanned Leather Scraps in Ethylene Propylene Diene Monomer Rubber.** *Progress in Rubber Plastics Recycling Technology*, v. 34, n. 2, p. 89-103, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/147776061803400202>.

- [131] SHABANI, I.; ARANI, A. J.; DAKHEL, H. R.; IRANMEHR, G. *Using of Leather Fibers as and Additive in Elastomeric Compounds: Its Effect on Curing Behavior and Physico-Mechanical Properties*. Journal of Applied Polymer Science, v. 111, p. 1670–1675, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.29159>.
- [132] KANT, N.; SINGH, P. *Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development*. Materials Today: Proceedings, v. 56, n. 6, p. 3460-3470, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.116>.
- [133] KUMAR, A.; MOHANTY, S.; GUPTA, V. K. *Butadiene rubber: synthesis, microstructure, and role of catalysts*. Rubber Chemistry and Technology, v. 94, n. 3, p. 393-409, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5254/rct.21.79948>.
- [134] NORTON, M. G. *Rubber—The Material of Possibilities. In: Ten Materials That Shaped Our World*. Springer, Cham, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75213-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75213-2_8).
- [135] SURYA, K. P.; BHOWMICK, Anil K. *Mechanical properties of natural rubber and styrene–butadiene rubber nanocomposites with nanofillers having different dimensions and shapes at low filler loading*. Rubber Chemistry and Technology, v. 95, n. 3, p. 385–412, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5254/rct.22.77933>.
- [136] EL-WAKIL, Abd El-Aziz; ABD-ELBASSEER, Mohammed; EL-BASHEER, Tarek M. *Mechanical and acoustical properties of Eichhornia crassipes (water hyacinth) fiber-reinforced styrene butadiene rubber*. Polymer Composites, v. 42, n. 8, p. 3732-3745, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.26088>.
- [137] MA, Y.; WANG, S. *et al.* *Potential alternative to styrene–butadiene–styrene for asphalt modification using recycled rubber–plastic blends*. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 33, n. 12, p. 04021341, 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003946](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003946).
- [138] CAETANO, M. J. L. *Borracha de Estireno Butadieno (SBR)*. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/materias-primas/borrachas/borrachas-sinteticas/borracha-de-estireno-butadieno-sbr/>. Acesso em: 14 nov. 2020.
- [139] MONTEIRO, Alceu Edinardo Gusmão. *Estudo das propriedades reológicas, térmicas e mecânicas do compósito poli-3-hidroxi-butirato (PHB)/negro de fumo*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil.
- [140] TORBATI-FARD, N.; GHOREISHY, Mir H. R.; NADERI, G.; HOSSEINI, S. M. *Enhancement of mechanical properties of styrene-butadiene rubber composites by carbon black/silicone carbide hybrid filler networking*. Polymer Composites, v. 43, n. 7, p. 4255-4267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.26686>.
- [141] WANG, Weijiang; ZHANG, Yinmin; ZHANG, Yongfeng; SUN, Junmin. *Vulcanization, static mechanical properties, and thermal stability of activated calcium silicate/styrene-butadiene rubber composites prepared via a latex compounding method*. Journal of Applied Polymer Science, v. 139, n. 2, p. 51462, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.51462>.
- [142] SIRQUEIRA, Alex S.; SOARES, Bluma G. *O efeito de EPDM modificado com grupos mercapto ou tioacetato na cinética de vulcanização de misturas NR/EPDM*. Polímeros, v. 16, p. 299-304, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000400009>.
- [143] MARIANO, R. M.; VISCONTE, L. L.; OLIVEIRA, M. R.; RUBINGER, M. M. *Evaluation of tetrabutyl ammonium bis(4-methylphenyldithiocarbamate)zincate(II) as accelerator in natural rubber (NR) compounds*. Polymers, v. 18, p. 297-301, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000400007>.
- [144] ZHANG, T.; HUANG, H.; LI, W. *et al.* *Vulcanization Modeling and Mechanism for Improved Tribological Performance of Styrene-Butadiene Rubber at the Atomic Scale*. Tribology Letters, v. 68, n. 3, p. 83, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01321-w>.

- [145] THITITHAMMAWONG, Anoma *et al.* **Effect of different types of peroxides on rheological, mechanical, and morphological properties of thermoplastic vulcanizates based on natural rubber/polypropylene blends.** *Polymer Testing*, v. 26, n. 4, p. 537-546, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.02.002>.
- [146] MISHRA, Joy K.; CHANG, Young-Wook; KIM, Wonho. **The effect of peroxide crosslinking on thermal, mechanical, and rheological properties of polycaprolactone/epoxidized natural rubber blends.** *Polymer Bulletin*, v. 66, p. 673-681, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0376-9>.
- [147] RIBEIRO, G. D.; HIRANOBE, C. T. *et al.* **Physical-Mechanical Properties of Chartwell® Coupling Agent-Treated Calcium Carbonate and Silica-Reinforced Hybrid Natural Rubber Composites.** *Crystals*, v. 12, p. 1552, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12111552>.
- [148] COSTA, Helson M. da *et al.* **Historical aspects of vulcanization.** *Polymers*, v. 13, n. 2, p. 125-129, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000200011>.
- [149] ZHANG, H.; ZHANG, G.; TANG, M. *et al.* **Synergistic effect of carbon nanotube and graphene nanoplates on the mechanical, electrical and electromagnetic interference shielding properties of polymer composites and Polymer composite foams.** *Chem. Eng. J.*, v. 353, p. 381-393, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.144>.
- [150] KUANG, T.; CHANG, L.; CHEN, F. *et al.* **Facile preparation of lightweight high-strength biodegradable polymer/multi-walled carbon nanotubes nanocomposite foams for electromagnetic interference shielding.** *Carbon*, v. 105, p. 305-313, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.04.052>.
- [151] MA, J.; ZHAN, M.; WANG, K. **Ultralightweight silver nanowires hybrid polyimide composite foams for high-performance electromagnetic interference shielding.** *ACS Appl. Mater. Interfaces*, v. 7, p. 563-576, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1021/am5067095>.
- [152] MA, Haoyu; GONG, Pengjian; ZHAI, Shuo; HUANG, Yajiang; NIU, Yanhua; PARK, Chul B.; LI, Guangxian. **Multi-Dimensional Analysis of Micro-/Nano-Polymeric Foams by Confocal Laser Scanning Microscopy and Foam Simulations.** *Chemical Engineering Science*, v. 207, p. 892-902, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.007>.
- [153] WEI, Y.; ZHOU, H.; DENG, H. *et al.* **“Toolbox” for the Processing of Functional Polymer Composites.** *Nano-Micro Lett.*, v. 14, p. 35, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00774-5>.
- [154] DONG, M.; WANG, G.; ZHANG, X. *et al.* **An overview of polymer foaming assisted by supercritical fluid.** *Adv Compos Hybrid Mater.*, v. 6, p. 207, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-023-00790-6>.
- [155] YU, Jiaqi; SONG, Lin; CHEN, Feng; FAN, Ping; SUN, Li; ZHONG, Mingqiang; YANG, Jintao. **Preparation of polymer foams with a gradient of cell size: Further exploring the nucleation effect of porous inorganic materials in polymer foaming.** *Materials Today Communications*, v. 9, p. 1-6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2016.08.006>.
- [156] ROSTAMI-TAPEH-ESMAEIL, E.; VAHIDIFAR, A.; ESMIZADEH, E.; RODRIGUE, D. **Chemistry, Processing, Properties, and Applications of Rubber Foams.** *Polymers*, v. 13, n. 10, p. 1565, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13101565>.
- [157] JI, Z.; MA, J. *et al.* **Improved dimensional stability of styrene butadiene rubber/ethylene vinyl acetate composite foams with skeleton support structure based on alternately cross-linking process.** *Polymer*, v. 157, p. 103-110, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.10.028>.
- [158] LI, L.; JIANG, H. *et al.* **Improvement of thermal conductivity and wear property of Gr/EP composites with CNTs/Cu foam as 3-dimensional reinforcing skeleton.** *Journal of Materials Research and Technology*, v. 29, p. 1172-1182, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.193>.

- [159] SONG S.; ZHANG, Y. *Carbon nanotube/reduced graphene oxide hybrid for simultaneously enhancing the thermal conductivity and mechanical properties of styrene-butadiene rubber*. Carbon, v. 123, p. 158-167, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.07.057>.
- [160] EYSSA, H. M.; EL MOGY, S. A.; YOUSSEF, H. A. *Impact of foaming agent and nanoparticle fillers on the properties of irradiated rubber*. Radiochimica Acta, v. 109, n. 2, p. 127-142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/ract-2020-0015>.
- [161] CZŁONKA, S.; STRĄKOWSKA, A.; STRZELEC, K.; KAIRYTĖ, A.; VAITKUS, S. *Composites of rigid polyurethane foams and silica powder filler enhanced with ionic liquid*. Polymer Testing, v. 75, p. 12-25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.021>.
- [162] CHOE, H.; CHOI, Y.; KIM, Y.; HYEUN, J. *Threshold cell diameter for high thermal insulation of water-blown rigid polyurethane foams*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, v. 73, p. 344-350, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.02.003>.
- [163] CHEN, G.; GUPTA, A.; MEKONNEN, T. H. *Effects of wood fiber loading, silane modification and crosslinking on the thermomechanical properties and thermal conductivity of EPDM biocomposite foams*. Industrial Crops and Products, v. 200, Part B, p. 116911, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116911>.
- [164] WANG, Y.; LI, J.; WAN, L.; WANG, L.; LI, K. *A lightweight rubber foaming insulation reinforced by carbon nanotubes and carbon fibers for solid rocket motors*. Acta Astronautica, v. 208, p. 270-280, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.04.019>.
- [165] COSTE, G.; NEGRELL, C.; CAILLOL, S. *From gas release to foam synthesis, the second breath of blowing agents*. European Polymer Journal, v. 140, p. 110029, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.110029>.
- [166] SOARES, Franciela A.; NACHTIGALL, Sônia Marli B. *Effect of chemical and physical foaming additives on the properties of PP/wood flour composites*. Polymer Testing, v. 32, n. 4, p. 640-646, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.02.009>.
- [167] BARU, F.; SAIWARI, S.; HAYEEMASAE, N. *Classification of natural rubber foam grades by optimising the azodicarbonamide content*. Polímeros, v. 32, n. 2, p. e2022014, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.20210111>.
- [168] REYES-LABARTA, J. A.; MARCILLA, A. *Thermal Treatment and Degradation of Cross-Linked Ethylene Vinyl Acetate-Polyethylene-Azodicarbonamide-ZnO Foams*. Complete Kinetic Modeling and Analysis. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, n. 28, p. 9595-9530, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie3006935>.
- [169] PEREIRA, Paula Filipa Coutinho. *Fatores que influenciam a decomposição da azodicarbonamida nas espumas de PVC-plastisol*. 2014. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- [170] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 1382:2012. Rubber - Vocabulary*. 2012.
- [171] SANTOS, Renivaldo José dos. *Obtenção de compósitos de borracha natural com resíduo industrial de couro reticulados com diferentes peróxidos*. 2014. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP, 2014.
- [172] BOONSTRA, B. B. *Role of particulate fillers in elastomer reinforcement: a review*. Polymer, v. 20, n. 6, p. 691-704, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(79\)90243-X](https://doi.org/10.1016/0032-3861(79)90243-X).

- [173] BACARIN G. B.; DOGNANI G.; DOS SANTOS R. J. *et al.* **Natural rubber composites with Grits residue from cellulose industry.** J. Mat Cycl and Res Manag, v. 22, n. 22, p. 1126-1139, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01011-8>.
- [174] SALMAZO, L. O.; LOPEZ-GIL, A.; ARIFF, Z. M. *et al.* **Influence of the irradiation dose in the cellular structure of natural rubber foams cross-linked by electron beam irradiation.** Ind Crops and Prod, v. 89, p. 339-349, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.05.023>.
- [175] SALMAZO, L. O.; LOPEZ-GIL, A.; ARIFF, Z. M.; JOB, A. E.; RODRIGUEZ-PEREZ, M. A. **Study of the foaming kinetics in epoxidized natural rubber foams crosslinked by electron beam irradiation.** Macromol Che and Phy, v. 219, n. 21, p. 1800295, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.201800295>.
- [176] HIRANOBE, Carlos T.; RIBEIRO, Gabriel D. *et al.* **Cross-Linked Density Determination of Natural Rubber Compounds by Different Analytical Techniques.** Materials Research, v. 24, n. 1, p. e20210041, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0041>.
- [177] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3182: Standard practice for rubber—materials, equipment, and procedures for mixing standard compounds and preparing standard vulcanized sheets.** West Conshohocken: ASTM, 2007.
- [178] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3182-21a: Standard practice for rubber: materials, equipment, and procedures for mixing standard compounds and preparing standard vulcanized sheets.** West Conshohocken: ASTM, 2021.
- [179] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2084-19a: Standard test method for rubber property: vulcanization using oscillating disk cure meter.** West Conshohocken: ASTM, 2019.
- [180] SHAW, Montgomery T.; MACKNIGHT, William J. **Introduction to polymer viscoelasticity.** Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. 360 p.
- [181] LEE B. L. **Reinforcement of uncured and cured rubber composites and its relationship to dispersive mixing: an interpretation of cure meter rheographs of carbon black loaded SBR and cis-polybutadiene compounds.** Rubber Chem Technol, v. 52, n. 5, p. 1019-29, 1979. DOI: <http://dx.doi.org/10.5254/1.3535250>.
- [182] PAUL, J. F.; JOHN, R. J. **Statistical mechanics of cross-linked polymer networks. I. Rubberlike elasticity.** J Chem Phys, v. 11, p. 512-517, 1943.
- [183] VIEYRES, Arnaud *et al.* **Sulfur-cured natural rubber elastomer networks: correlating cross-link density, chain orientation, and mechanical response by combined techniques.** Macromolecules, v. 46, n. 3, p. 889-899, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma302563z>.
- [184] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D297-21: Standard test methods for rubber products: chemical analysis.** West Conshohocken: ASTM, 2022.
- [185] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D792: Standard test methods for density and specific gravity (Relative Density) of plastics.** West Conshohocken: ASTM, 2014.
- [186] AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. **ASTM D1622/D1622M-14: Standard test method for apparent density of rigid cellular plastics.** West Conshohocken: ASTM, 2014.
- [187] RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. F. **Borracha natural e nanocompósitos com argila.** Química Nova, v. 32, p. 818-826, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300024>.
- [188] AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. **ASTM D3574-11/X6: Standard test method for flexible cellular materials—slab, bonded, and molded urethane foams.** West Conshohocken: ASTM, 2013.

- [189] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D5963-04: Standard test method for rubber property: abrasion resistance (Rotary Drum Abrader)*. West Conshohocken: ASTM, 2019.
- [190] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D2240-15: Standard test method for rubber property: durometer hardness*. West Conshohocken: ASTM, 2021.
- [191] GODINHO, B.; GAMA, N.; BARROS-TIMMONS, A.; FERREIRA, A. *Recycling of different types of polyurethane foam wastes via acidolysis to produce polyurethane coatings*. Sustainable Mat and Tech, v. 29, p. e00330, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00330>.
- [192] CUI, K.; JIANG, G.; XIE, C. *et al. A novel temperature-sensitive expandable lost circulation material based on shape memory epoxy foams to prevent losses in geothermal drilling*. Geothermics, v. 95, p. 102145, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102145>.
- [193] MADIVOLI, E. S.; KARERU, P. G.; GACHANJA, A. N.; MUGO, S. M.; MAKHANU, D. S. *Synthesis and characterization of dialdehyde cellulose nanofibers from O. sativa husks*. SN Applied Sciences, v. 1, n. 7, p. 723, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0769-9>.
- [194] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D6370-99: Standard test method for rubber: compositional analysis by Thermogravimetry (TGA)*. West Conshohocken: ASTM, 2019.
- [195] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C518: Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus*. West Conshohocken: ASTM, 2021.
- [196] ISMAIL, Tuan Noor Maznee Tuan *et al. Investigating the potential of dihydroxystearic acid as feedstock for rigid polyurethane foam*. Industrial Crops and Products, v. 209, p. 118067, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118067>.
- [197] YOU, J.; CAI, L.; YU, R. *et al. High-performance chlorinated polyvinyl chloride/polyurea nanocomposite foam with excellent solvent resistance, flame-triggered shape memory effect and its upcycling*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 177, p. 107931, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107931>.
- [198] JIN, D.; CHOI, J. Y.; NAM, J.; YUK, H.; KIM, S. *Innovative building materials by upcycling clothing waste into thermal energy storage matrix with phase change materials*. Waste Management, v. 175, p. 328-338, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.01.021>.
- [199] SARKAR, A.; ISLAM, A.; ZHU, L.; REN, S. *Flame-retardant cellulose-aerogel composite from agriculture waste for building insulation*. Applied Materials Today, v. 36, p. 102080, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2024.102080>.
- [200] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM C1363: Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of a hot box apparatus*. West Conshohocken: ASTM, 2019.
- [201] PALANI, Hevar; KARATAS, Aslihan. *Investigating the disparities between experimental and computational analyses of thermal performance in prefabricated wall panels*. Applied Thermal Engineering, v. 236(B), p. 121568, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121568>.
- [202] KHALEGHI, Hamed; KARATAS, Aslihan. *Assessing the dynamic thermal performance of prefabricated wall panels in extreme hot weather conditions*. Journal of Building Engineering, v. 82, p. 108351, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.108351>.
- [203] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E1050-10: Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones, and a digital frequency analysis system*. West Conshohocken: ASTM, 2012.

- [204] VANKAYALA, R.; SARAVANAN, R.; LAKSHMIKANTHAN, C. *Reduction of noise in the vehicle cabin by using natural fibres with polyurethane and comparison with other acoustic materials*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, v. 577, p. 012013, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012013>.
- [205] VIEYRES, A.; PÉREZ-APARICIO, R. *et al.* *Sulfur-Cured Natural Rubber Elastomer Networks: Correlating Cross-Link Density, Chain Orientation, and Mechanical Response by Combined Techniques*. *Macromolecules*, v. 46, n. 3, p. 889-899, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma302563z>.
- [206] DE MARIA, V. P. K.; DE PAIVA, F. F. G. *et al.* *Mechanical and rheological properties of partial replacement of carbon black by treated ultrafine calcium carbonate in natural rubber compounds*. *Polymer Bulletin*, v. 79, p. 7969-7987, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03891-8>.
- [207] HERMAMA, C.; BENSIALI, B.; LAHBABI, S.; MALIKI, A. E. *Effect of the shape and the distribution of cells on the effective thermal conductivity of polyurethane foam*. *Polym Eng Sci*, v. 63, p. 2278-2294, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/pen.26376>.
- [208] HU, Yang; FANG, Qin-Zhi; YU, Huimin; HU, Qinwei. *Numerical simulation on thermal properties of closed-cell metal foams with different cell size distributions and cell shapes*. *Materials Today Communications*, v. 24, p. 100968, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100968>.
- [209] CAO, S.; *et al.* *B. amyloliquefaciens TCCC 11319, a new Cr(III)-tolerant bacterium for chromium-tanned leather shaving disposal*. *RSC Advances*, v. 7, p. 11455-11461, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1039/C6RA27954F>.
- [210] RIBEIRO, Daniel; YUAN, Shih; MORELLI, Márcio. *Effect of chemically treated shave leather addition on the characteristics of Portland cement pastes*. *Química Nova*, v. 34, p. 979-983, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000600012>.
- [211] LARKIN, Peter. *Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier, 2017.
- [212] CAMPANELLA, B.; PALLESCHI, V.; LEGNAIOLI, S. *Introduction to vibrational spectroscopies*. *ChemTexts*, v. 7, n. 5, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40828-020-00129-4>.
- [213] AHMED, M.; KANDIL, U.; SHAKER, N.; HASHEM, A. *The overall effect of reactive rubber nanoparticles and nano clay on the mechanical properties of epoxy resin*. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, v. 8, n. 4, p. 549-561, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.010>.
- [214] ZANG, Jinlong *et al.* *Compatibility of waste rubber powder/polystyrene blends by the addition of styrene grafted styrene butadiene rubber copolymer: Effect on morphology and properties*. *Polymer Bulletin*, v. 70, p. 2829-2841, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00289-013-0991-3>.
- [215] FERNÁNDEZ-BERRIDI, María José; GONZÁLEZ, Nekane; MUGICA, Agurtzane; BERNICOT, Caroline. *Pyrolysis-FTIR and TGA techniques as tools in the characterization of blends of natural rubber and SBR*. *Thermochimica Acta*, v. 444, n. 1, p. 65-70, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.02.027>.
- [216] GHEBREMESKEL, Ghebrehwet N.; SHIELD, Stephanie R. *Characterization of binary/tertiary blends of SBR, NBR and PVC by IR spectroscopy*. *Rubber world*, v. 227, n. 4, p. 26-30, 2003.
- [217] CHUDZIK, Joanna *et al.* *Influence of Modified Epoxy Resins on Peroxide Curing, Mechanical Properties and Adhesion of SBR, NBR and XNBR to Silver Wires—Part II: Application of Carboxy-Containing Peroxy Oligomer (CPO)*. *Materials*, v. 14, p. 1285, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051285>.
- [218] AGOSTINI, D. L. S.; CONSTANTINO, C. J. L.; JOB, A. E. *Structural investigation of the latex and natural rubber membrane used in the angiogenesis formation*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 91, p. 1388-6150, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-007-8351-x>.

- [219] FEDELICH, Nicolas. *A novel TG–GC/MS system: Quantification of low-content styrene–butadiene rubber in natural rubber*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 127, n. 1, p. 947-954, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5773-3>.
- [220] BAETA, D. A.; ZATTERA, J. A.; OLIVEIRA, M. G.; OLIVEIRA, P. J. *The use of styrene-butadiene rubber waste as a potential filler in nitrile rubber: order of addition and size of waste particles*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 26, p. 23-31, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322009000100003>.
- [221] SANTOS, J. D. S., CABRERA, F. C., AGOSTINI, D. L. D. S., BUDEMBERG, E. R., JOB, A. E. *Upcycling leather waste*. SPE Plastics Research Online, v. 1, p. 1, 2014. DOI: <http://hdl.handle.net/11449/135722>.
- [222] GULMINE, J. V.; AKCELRUD, L. *Correlations between the processing variables and morphology of crosslinked polyethylene*. Journal of Applied Polymer Science, v. 94, n. 1, p. 222-230, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.20863>.
- [223] NANNI, A. *et al.* *Thermo-mechanical and morphological properties of polymer composites reinforced by natural fibers derived from wet blue leather wastes: a comparative study*. Polymers, v. 13, n. 11, p. 1837, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13111837>.
- [224] FALCÃO, Lina; ARAÚJO, Maria Eduarda M. *Tannins characterization in historic leathers by complementary analytical techniques ATR-FTIR, UV-Vis and chemical tests*. Journal of Cultural Heritage, v. 14, n. 6, p. 499-508, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.11.003>.
- [225] LI, Y. *et al.* *Highly compressible macroporous graphene monoliths via an improved hydrothermal process*. Advanced Materials, v. 26, n. 28, p. 4789-4793, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201400657>.
- [226] GIBSON, L. J. *Cellular Solids*. MRS Bulletin, v. 28, n. 4, p. 270-274, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs2003.79>.
- [227] SANG, Zhen *et al.* *Design Strategy for Porous Composites Aimed at Pressure Sensor Application*. Small, v. 15, n. 45, p. 1903487, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/sml.201903487>.
- [228] HOU, Chun *et al.* *Mechanical response of hard bio-based PU foams under cyclic quasi-static compressive loading conditions*. International Journal of Fatigue, v. 59, p. 76-89, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.09.012>.
- [229] PENG, N. *et al.* *Superelastic Graphene Aerogel/Poly(3,4-Ethylenedioxythiophene)/MnO<sub>2</sub> Composite as Compression-Tolerant Electrode for Electrochemical Capacitors*. Materials, v. 10, n. 12, p. 1353, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10121353>.
- [230] SALEM, J. *Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites IV*. Volume 30, Issue 2. John Wiley & Sons, 2009.
- [231] FERATOĞLU, K. *et al.* *Effect of Carbon Nanotube Reinforcement on Creep and Recovery Behavior of Additively Manufactured Polymers: An Experimental and Prediction Study*. Arabian Journal for Science and Engineering, p. 1-22, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08855-4>
- [232] RAJU, Benjamin; HIREMATH, S. R.; MAHAPATRA, D. Roy. *A review of micromechanics based models for effective elastic properties of reinforced polymer matrix composites*. Composite Structures, v. 204, p. 607-619, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.125>.
- [233] RAJASEKAR, R. *et al.* *Development of nitrile butadiene rubber–nanoclay composites with epoxidized natural rubber as compatibilizer*. Materials and Design, v. 30, n. 9, p. 3839-3845, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.03.014>.

- [234] DAS, Amit *et al.* **Nanocomposites based on chloroprene rubber: effect of chemical nature and organic modification of nanoclay on the vulcanizate properties.** European Polymer Journal, v. 44, n. 11, p. 3456-3465, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.08.025>.
- [235] DALL'ANTONIA, Ana C. *et al.* **Caracterização Mecânica e Térmica da Borracha Natural Formulada e Vulcanizada dos Clones: GT 1, IAN 873, PB 235 e RRIM 600.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 19, n. 1, p. 63-71, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282009000100015>.
- [236] SCHABER, P. M. *et al.* **Thermal decomposition (pyrolysis) of urea in an open reaction vessel.** Thermochemica Acta, v. 424, n. 1-2, p. 131-142, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2004.05.018>.
- [237] CHAHINE, Claire. **Changes in hydrothermal stability of leather and parchment with deterioration: a DSC study.** Thermochemica Acta, v. 365, n. 1-2, p. 101-110, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00617-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00617-1).
- [238] OWEN, M. M. *et al.* **Improving the thermal stability and impact strength of leather wastes-ABS composites via robust experimental design.** Journal of Materials and Environmental Science, v. 12, n. 5, p. 673-685, 2021. URL: <https://www.researchgate.net/publication/351942606>.
- [239] STARK, Nicole M.; ROWLANDS, Robert E. **Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites.** Wood and fiber science, v. 35, n. 2, p. 167-174, 2003.
- [240] DRZEŹDŹON, Joanna *et al.* **Characterization of polymers based on differential scanning calorimetry based techniques.** TrAC Trends in Analytical Chemistry, v. 110, p. 51-56, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.037>.
- [241] DENARI, Gabriela Bueno; CAVALHEIRO, Éder Tadeu Gomes. **Princípios e aplicações de análise térmica.** São Carlos: IQSC, p. 40, 2012.
- [242] GEITH, Janna *et al.* **Pyrolysis experiments and thermochemistry of mononitrobiuret (MNB) and 1, 5-dinitrobiuret (DNB).** Combustion and flame, v. 139, n. 4, p. 358-366, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.09.008>.
- [243] TISCHER, S. *et al.* **Thermodynamics and reaction mechanism of urea decomposition. Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 21, p. 16785-16797, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9CP01529A>.
- [244] DUTRA, Rita C. L. *et al.* **Determinação do teor de NR/SBR em misturas: associação de dados DTG e FT-IR.** Polímeros, v. 14, n. 5, p. 334-348, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282004000500011>.
- [245] WANG, Y. *et al.* **A lightweight rubber foaming insulation reinforced by carbon nanotubes and carbon fibers for solid rocket motors.** Acta Astronautica, v. 208, p. 270-280, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.04.019>.
- [246] GAO, J. *et al.* **Preparation and properties of hollow glass bead filled silicone rubber foams with low thermal conductivity.** Materials & Design (1980-2015), v. 46, p. 491-496, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.070>.
- [247] EYSSA, H. M. *et al.* **Impact of foaming agent and nanoparticle fillers on the properties of irradiated rubber.** Radiochimica Acta, v. 109, n. 2, p. 127-142, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1515/ract-2020-0015>.
- [248] CAO, Z. J. *et al.* **Polyurethane foams with functionalized graphene towards high fire-resistance, low smoke release, superior thermal insulation.** Chemical Engineering Journal, v. 361, p. 1245-1254, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.176>.
- [249] CZŁONKA, S. *et al.* **Composites of rigid polyurethane foams and silica powder filler enhanced with ionic liquid.** Polymer Testing, v. 75, p. 12-25, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.021>.

- [250] XIE, Z.; CAI, Y. *et al.* **Thermal insulating rubber foams embedded with segregated carbon nanotube networks for electromagnetic shielding applications.** Chemical Engineering Journal, v. 435, n. 3, p. 135118, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135118>.
- [251] CHEN, G. *et al.* **Effects of wood fiber loading, silane modification and crosslinking on the thermomechanical properties and thermal conductivity of EPDM biocomposite foams.** Industrial Crops and Products, v. 200, Part B, p. 116911, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116911>.
- [252] ZÁLESKÁ, M. *et al.* **Eco-friendly concrete with scrap-tyre-rubber-based aggregate – Properties and thermal stability.** Construction and Building Materials, v. 225, p. 709-722, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.168>.
- [253] ISLAM, M. M. U. *et al.* **Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles.** Construction and Building Materials, v. 408, p. 133658, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133658>.
- [254] LIU, K. *et al.* **Effect of physicochemical structure of natural fiber on transverse thermal conductivity of unidirectional abaca/bamboo fiber composites.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, v. 43, n. 8, p. 1234-1241, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.02.020>.
- [255] VIJAYKUMAR, K. C. K. *et al.* **A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer.** Energy and Buildings, v. 39, p. 886, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.05.009>.
- [256] ARKAR, C.; DOMJAN, S.; MEDVED, S. **Lightweight composite timber façade wall with improved thermal response.** Sustainable Cities and Society, v. 38, p. 25-332, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.011>.
- [257] SONDEREGGER, W.; NIEMZ, P. **Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials.** European Journal of Wood and Wood Products, v. 67, p. 313-321, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0304-y>.
- [258] TROPPOVÁ, E.; ŠVEHLÍK, M.; TIPPNER, J. *et al.* **Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards.** Materials and Structures, v. 48, p. 4077-4083, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0467-4>.
- [259] KALNÆS, Simen Edsjø; JELLE, Bjørn Petter. **Vacuum insulation panel products: A state-of-the-art review and future research pathways.** Applied Energy, v. 116, p. 355-375, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.11.032>.
- [260] SAGARTZAZU, X.; HERVELLA-NIETO, L.; PAGALDAY, J. M. **Review in Sound Absorbing Materials.** Archives of Computational Methods in Engineering, v. 15, p. 311-342, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-008-9022-1>.