

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS - PPGCM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILTRO DE CARVÃO ATIVADO COMO CARGA DE
SEMI-REFORÇO EM COMPÓSITOS DE BORRACHA VULCANIZADA

ILHA SOLTEIRA
2025



VIVIANE CHAVES DE SOUZA

REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILTRO DE CARVÃO ATIVADO COMO CARGA DE
SEMI-REFORÇO EM COMPÓSITOS DE BORRACHA VULCANIZADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus de Ilha Solteira, na linha de pesquisa Materiais Poliméricos, Híbridos e Nanoestruturados para obtenção do título de Mestre. Apresenta-se estudos voltados à reutilização de resíduos sólidos, com ênfase na valorização de materiais descartados como carvão ativado residual, aplicando-os como carga alternativa em compósitos de borracha vulcanizada. Suas investigações envolvem caracterização física, química e mecânica, além de análises reológicas e morfológicas, com foco em sustentabilidade, inovação tecnológica e economia circular no setor de materiais poliméricos, sob a orientação do Prof. Dr. Flavio Cabrera.

ILHA SOLTEIRA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

- S729r Souza, Viviane Chaves de.
Reutilização de resíduos de filtro de carvão ativado como carga de semi-reforço em compósitos de borracha vulcanizada / Viviane Chaves de Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
122 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Física da Matéria Codensada, 2025
Orientador: Flávio Camargo Cabrera
Inclui bibliografia
1. Carvão ativado residual. 2. Borracha natural. 3. Compósitos elastoméricos. 4. Sustentabilidade. 5. Reaproveitamento de resíduos.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DE FILTRO DE CARVÃO ATIVADO
COMO CARGA DE SEMI-REFORÇO EM COMPÓSITOS DE BORRACHA
VULCANIZADA

AUTORA: VIVIANE CHAVES DE SOUZA

ORIENTADOR: FLÁVIO CAMARGO CABRERA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência dos Materiais,
área: Física da Matéria Condensada pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
FLAVIO CAMARGO CABRERA
Data: 15/12/2025 15:50:49-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. FLÁVIO CAMARGO CABRERA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Rosana - FEC

 Documento assinado digitalmente
RENIVALDO JOSE DOS SANTOS
Data: 15/12/2025 15:57:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. RENIVALDO JOSÉ DOS SANTOS (Participação Virtual)
Diretoria / UNESP / Câmpus de Rosana - FEC

 Documento assinado digitalmente
DEUBER LINCON DA SILVA AGOSTINI
Data: 15/12/2025 15:44:42-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. DEUBER LINCON DA SILVA AGOSTINI (Participação Virtual)
Departamento de Física / UNESP / Câmpus de Presidente Prudente - FCT

Ilha Solteira, 15 de dezembro de 2025.

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos, pilares essenciais que transformaram esforço, renúncias e persistência em conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conceder força, serenidade e sabedoria ao longo de toda esta trajetória, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Camargo Cabrera, pela orientação segura, pelo rigor científico, pela disponibilidade constante e pelas contribuições fundamentais que possibilitaram o desenvolvimento e a consolidação deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelas valiosas contribuições, sugestões e pela atenção dedicada à avaliação deste estudo, que certamente contribuíram para o seu aprimoramento.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, pelo suporte acadêmico, pela infraestrutura disponibilizada e pela formação oferecida ao longo do curso.

Aos professores do programa, pelos ensinamentos transmitidos, pelas discussões enriquecedoras e pela contribuição para minha formação científica e acadêmica.

Aos colegas e amigos, pela troca de conhecimentos, pelo apoio, incentivo e companheirismo ao longo desta caminhada.

À minha família — meus pais, meus irmãos, meu marido e meus filhos — pelo amor, pela compreensão, pelo apoio incondicional e por estarem presentes em todos os momentos desta jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - Código de Financiamento 001.

*“Não foi sorte, foi constância: transformei desafios em
aprendizado e aprendizado em conquista.”*

Trabalhos apresentados em Congressos durante a execução desta dissertação durante o período de desenvolvimento desta dissertação, os seguintes trabalhos foram apresentados em eventos científicos:

- Reutilização de resíduo de filtro de carvão ativado como carga em compósito de borracha vulcanizada. Apresentação oral no VI Encontro de Pesquisadores em Ciência e Engenharia de Materiais (VI EPCEM), realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, no período de 28 a 30 de agosto de 2025.
- Reutilização de resíduos de filtros de carvão ativado como enchimento em compósitos de borracha vulcanizada. Apresentação no Workshop Materiais na Sociedade, realizado em 17 de junho de 2025, na Faculdade de Engenharia e Ciências (FEC) – UNESP, Câmpus Rosana.

Resumo

A crescente geração de resíduos sólidos urbanos, aliada à necessidade de reduzir o uso de insumos petroquímicos na indústria de polímeros, impulsiona a busca por alternativas sustentáveis de aproveitamento de materiais descartados. Neste contexto, esta dissertação investigou a viabilidade técnica e ambiental da reutilização de carvão ativado residual (CA), proveniente de filtros de água saturados, como carga funcional em compósitos de borracha natural (BN) vulcanizada. A metodologia envolveu a preparação de formulações com diferentes teores de CA (5, 10, 15 e 20 phr), bem como a realização de análises físico-químicas (XRF e pH), morfológicas (MEV) e mecânicas (resistência à tração, dureza Shore A, massa específica, reometria e resistência à abrasão). Os resultados indicaram que a adição de CA promoveu reforço mecânico até 10 phr, com aumento de densidade de ligações cruzadas, sem grandes alterações no tempo de cura. A caracterização elementar revelou que o resíduo é composto principalmente de carbono contendo baixas concentrações de metais, alguns potencialmente tóxicos, reforçando a importância do reuso do resíduo. Amostras com 10 phr de resíduo atingiram 13,9 Mpa no ensaio mecânico de tração vs. deformação, comparado a 11,4 MPa da goma pura (sem resíduo) e 14,4 MPa para os compósitos contendo BN e 5 phr de N330, carga comercial tradicionalmente empregada como reforçante. Os resultados indicam que o CA residual é uma alternativa viável, eficiente e ambientalmente estratégica para o desenvolvimento de materiais elastoméricos sustentáveis, sugerindo potencial para uso em sistemas híbridos com o N330, substituindo parcialmente a carga comercial.

Palavras-chave: carvão ativado residual; borracha natural; compósitos elastoméricos; sustentabilidade; reaproveitamento de resíduos.

ABSTRACT

The increasing generation of municipal solid waste, combined with the need to reduce petrochemical inputs in the polymer industry, drives the search for sustainable alternatives for the reuse of discarded materials. In this context, this dissertation investigated the technical and environmental feasibility of reusing residual activated carbon (AC), obtained from saturated water filters, as a functional filler in vulcanized natural rubber (NR) composites. The methodology involved the preparation of formulations with different AC loadings (5, 10, 15, and 20 phr), as well as physicochemical (XRF and pH), morphological (SEM), and mechanical analyses (tensile strength, Shore A hardness, specific gravity, rheometry, and abrasion resistance). The results indicated that the addition of AC provided mechanical reinforcement up to 10 phr, with increased crosslink density and no significant changes in cure time. Elemental characterization revealed that the residue is composed mainly of carbon with low concentrations of metals, some potentially toxic, reinforcing the importance of reuse. Samples containing 10 phr of AC achieved 13.9 MPa in the tensile test compared to 11.4 MPa for pure gum (without filler) and 14.4 MPa for composites with 5 phr of carbon black (NF 330), a conventional commercial reinforcing filler. It is concluded that residual AC is a viable, efficient, and environmentally strategic alternative for the development of sustainable elastomeric materials and can be used in hybrid systems with carbon black, partially replacing this conventional filler.

Keywords: residual activated carbon; natural rubber; elastomeric composites; sustainability; waste reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Aplicações domésticas, comerciais e industriais do carvão ativado, o carvão ativado é empregado em diversas escalas de uso: (a) filtros domésticos de água, compostos por blocos ou cartuchos com carvão granulado; (b) sistemas comerciais de purificação de ar e água, aplicados em ambientes como restaurantes e clínicas; e (c) colunas industriais de adsorção, utilizadas no tratamento de efluentes líquidos e gasosos.	14
Figura 2. Estrutura repetitiva do polímero cis-1,4-poliisopreno, unidade fundamental da borracha natural.	31
Figura 3. Extração (sangria) do látex da <i>Hevea brasiliensis</i>	32
Figura 4. Fluxograma das etapas físicas do processamento da BN.	33
Figura 5. Representação esquemática da reação entre o poliisopreno e o enxofre (S_8), mostrando a formação de ligações cruzadas (cross-links).....	34
Figura 6. Ligações cruzadas mono-, di- e polissulfídicas formadas durante a vulcanização convencional.	35
Figura 7. Formação do estearato de zinco a partir da reação entre e ácido esteárico.	36
Figura 8. Etapas experimentais da determinação do pH do carvão ativado residual (CA).....	50
Figura 9. Etapas do ensaio de absorção de tolueno para determinação da densidade de ligações cruzadas.	51
Figura 10. Máquina universal de ensaios Biopdi utilizada nos ensaios de tração (ASTM D412): (a) visão geral do equipamento; (b) detalhe das garras pneumáticas para fixação dos corpos de prova.	52
Figura 11. Medição da dureza Shore A em amostra de borracha natural vulcanizada.	53
Figura 12. Equipamento utilizado para determinação da massa específica pelo método do empuxo hidrostático.....	55
Figura 13. Ensaio qualitativo de dispersão em meio aquoso do carvão ativado residual, evidenciando a formação de aglomerados e a tendência à sedimentação após 5 minutos de repouso	56
Figura 14. Micrografias de MEV do carvão ativado residual: (a) visão geral da morfologia; (b) ampliação da região destacada, evidenciando poros irregulares.	61
Figura 15. Micrografia de MEV da borracha natural pura, evidenciando superfície lisa e morfologia homogênea.	62
Figura 16. Micrografia de MEV do compósito BN/CA _{5phr} , evidenciando a dispersão das partículas de carvão ativado residual na matriz de borracha natural.....	63
Figura 17. Micrografias de MEV do compósito BN/CA _{10phr} : (a) visão geral da morfologia; (b) ampliação da região de interface matriz–carga.	64

Figura 18. Micrografias de MEV dos compósitos (a) BN/CA _{15phr} e (b) BN/CA _{20phr} , evidenciando aumento da rugosidade superficial e da concentração de partículas com o aumento do teor de carvão ativado residual.....	65
Figura 19. Distribuição do tamanho de partículas observadas nas micrografias de MEV.....	66
Figura 20. Variação do torque mínimo (ML) em função do teor de carga de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN).....	67
Figura 21. Variação do torque máximo (MH) em função do teor de carga de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN).....	69
Figura 22. Variação do torque diferencial (ΔM) em função da quantidade de resíduo adicionada aos compósitos de borracha natural.	70
Figura 23. Variação do tempo de pré-cura (t_{s1}) em função do teor de carga de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN).....	71
Figura 24. Variação do tempo ótimo de cura (t_{90}) em função do teor de carvão ativado residual (CA) e de negro de fumo (NC) em compósitos de borracha natural (BN).	Erro! Indicador não definido.
Figura 25. Densidade de ligações cruzadas dos compósitos de borracha natural com diferentes teores de carvão ativado residual, determinada pelo modelo de Flory–Rehner.	75
Figura 26. Resistência à tração dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.	78
Figura 27. Deformação na ruptura dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.	78
Figura 28. Dureza Shore A dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.	82
Figura 29. Massa específica dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.	84
Figura 30. Perda volumétrica por abrasão ($\text{mm}^3 \cdot 40 \text{ m}^{-1}$) dos compósitos de borracha natural (BN) em função do teor de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC).....	87

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Formulações dos compósitos de borracha natural contendo diferentes teores de negro de carbono (NC) e carvão ativado residual (CA) com sistema de cura padronizado	46
Tabela 2. Composição elementar do carvão ativado residual obtida por fluorescência de raios X (XRF).	57
Tabela 3. Parâmetros reométricos dos compósitos de borracha natural (BN) com diferentes teores de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC).....	73
Tabela 4. Densidade de ligações cruzadas (mol/cm^3) dos compósitos com diferentes teores de CA	74
Tabela 5. Resistência à tração e deformação dos compósitos de borracha natural com diferentes proporções de negro de carbono (NC) e carvão ativado residual (CA)	77
Tabela 6. <i>Dureza Shore A dos compósitos com carvão ativado (CA) e negro de carbono (NC)</i>	81
Tabela 7. Massa específica dos compósitos de NR com diferentes teores de CA e NC	83
Tabela 8. Perda volumétrica por abrasão ($\text{mm}^3 \cdot 40 \text{ m}^{-1}$) dos compósitos de borracha natural (BN) com diferentes teores de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC).....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Sigla/Abreviação	Significado
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer–Emmett–Teller
BN	Borracha Natural (Natural Rubber)
CA5phr, CA10phr, CA15phr, CA20ph	Carvão Ativado em diferentes proporções (expressões derivadas de “phr”)
CA	Carvão Ativado
CAT	Carvão Ativado Tratado
CN	Celulose Nanocristalina
CO ₂	Dióxido de Carbono
COVs	compostos orgânicos voláteis
DMA	Análise Dinâmico-Mecânica (Dynamic Mechanical Analysis)
DRX	Difração de Raios X
E'	Módulo de Armazenamento
EDS	Espectroscopia de Energia Dispersiva
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
H ₃ PO ₄	Ácido Fosfórico
HNO ₃	Ácido Nítrico
KOH	Hidróxido de Potássio

MBTS	dissulfeto de dibenzotiazol (Mercaptobenzotiazol Dissulfeto).
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MH	Torque Máximo
ML	Torque Mínimo
NMR	Ressonância Magnética Nuclear (Nuclear Magnetic Resonance)
NC	Negro de Carbono
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PEG	Polietilenoglicol
POE	Ponto de entrada
POU	Ponto de uso
phr	Partes por cem de borracha (parts per hundred rubber)
pH _{pzc}	pH no Ponto de Carga Zero
SEM	Scanning Electron Microscopy
TGA	Análise Termogravimétrica (Thermogravimetric Analysis)
Tg	Temperatura de Transição Vítrea
XRF	Fluorescência de Raios X (X-ray Fluorescence)

Sumário

1 – INTRODUÇÃO	10
2 – OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 – Filtros de Carvão Ativado: Tipos, Usos e Impactos Ambientais	14
3.1.1 – Aplicações domésticas, comerciais e industriais	14
3.1.2 – Composição dos filtros: materiais constituintes e propriedades	16
3.1.3 – Quantidade fabricada e descarte global e nacional: impactos ambientais	18
3.1.4 – Vida útil dos filtros e fatores que afetam sua saturação.....	21
3.1.5 – Tecnologias de regeneração e reaproveitamento de filtros exauridos	24
3.1.7 – Normas técnicas e regulamentações aplicáveis ao uso e descarte de filtros de carvão ativado	26
3.1.8 – Influência das características físico-químicas do carvão ativado no desempenho adsorativo	28
3.2 – Borracha Natural: Estrutura, Processamento e Modificações.....	30
3.2.1 – Composição e propriedades da borracha natural (BN).....	30
3.2.2 – Origem do látex e tipos comerciais.....	31
3.2.3 – Processamento físico: mastigação, mistura e formulação.....	32
3.2.4 – Vulcanização: formação da rede tridimensional elastomérica.....	33
3.2.5 – Sistemas de cura e controle reométrico	36
3.2.6 – Compatibilização e interações matrizes–carga	37
3.2.7 – Desempenho e sustentabilidade	37
3.3 – Compósitos de Borracha com Cargas de Resíduos.....	37
3.3.1 – Cargas minerais e convencionais: negro de carbono, sílica, caulim	37
3.3.2 – Resíduos orgânicos como carga: potencial de reforço e sustentabilidade	39
3.3.3 – Resíduos carbonáceos como cargas funcionais: biochars, cinzas e carvão ativado residual em compósitos elastoméricos	40
3.3.4 – Resíduos industriais como cargas alternativas: Grits, Dregs, cinzas e couro	42
3.3.5 – Interações matriz–carga em compósitos de borracha natural com resíduos	44

4 – Metodologia Experimental	45
4.1 – Materiais	45
4.2 – Métodos de Preparação dos Compósitos	47
4.3 – Caracterização.....	48
4.3.1 – Análise Elementar por Fluorescência de Raios X (XRF)	48
4.3.2 – Determinação de pH dos Resíduos	49
4.3.3 – Ensaio de Absorção de Tolueno e Estimativa da Densidade de Ligações Cruzadas	50
4.3.5 – Ensaio de Tração (ASTM D412)	52
4.3.6 – Dureza Shore A (ASTM D2240)	53
4.3.7 – Determinação da Massa Específica (ASTM D792).....	54
4.3.8 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	55
4.3.9 – Ensaio Qualitativo de Dispersão em Meio Aquoso	55
5. – Resultado e Discussão	57
5.1.1 – Análise Elementar por XRF.....	57
5.1.2 – pH das amostras e implicações na química de superfície	58
5.1.3 – Comportamento em meio aquoso e afinidade superficial.....	59
5.1.4 – Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	60
5.2 – Propriedades reométricas.....	67
5.3 – Densidade de ligações cruzadas.....	74
5.4 – Propriedades mecânicas dos compósitos	77
5.4.1 – Resistência à tração e alongamento na ruptura.....	77
5.4.2 – Dureza Shore A.....	80
5.4.3 – Massa específica (densidade).....	83
5.4.4 – Resistência à abrasão	85
5.5 – Considerações finais sobre desempenho técnico e sustentabilidade.....	88
6. Conclusão	89
7. Referências	90

1 – INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o intenso crescimento industrial e urbano tem promovido um aumento considerável na geração de efluentes contendo contaminantes orgânicos e inorgânicos persistentes, provenientes especialmente dos setores químico, farmacêutico, hospitalar e alimentício. Esses efluentes apresentam ampla variedade de poluentes, entre os quais se destacam os metais pesados, como Cu^{2+} , Pb^{2+} e Cd^{2+} , que mesmo em baixas concentrações podem desencadear efeitos tóxicos significativos. Estudos apontam que tais metais comprometem a saúde humana por meio de mecanismos de estresse oxidativo, bioacumulação em tecidos e indução de processos carcinogênicos (Azeh Engwa et al., 2019), além de afetarem o desempenho produtivo e reprodutivo de animais expostos pela cadeia alimentar (Afzal; Mahreen, 2024). Em ambientes aquáticos, esses compostos causam sérios impactos na fauna e flora, incluindo bioacumulação e amplificação trófica, bem como alterações genéticas e danos ao DNA de organismos expostos (Santhosh et al., 2024).

Frente a esse desafio ambiental, torna-se crucial o desenvolvimento de tecnologias acessíveis, eficientes e sustentáveis para a remoção de tais contaminantes. A adsorção utilizando carvão ativado (CA) é uma das soluções mais empregadas e estudadas, devido à sua elevada área superficial, abundância de microporos e presença de grupos funcionais capazes de interagir com compostos polares e apolares (Ferreira, 2022; Sabitov et al., 2024). Sua versatilidade tem permitido aplicações no tratamento de água potável, esgoto doméstico, efluentes industriais e até na descontaminação de resíduos hospitalares (Alves et al., 2021). Entretanto, estudos mostram que, embora o CA apresente eficiência relevante para determinados contaminantes, sua capacidade de remoção de metais pesados em sistemas de filtração doméstica é limitada, quando comparada, por exemplo, à osmose reversa, que alcança taxas superiores a 95% de remoção (Yu; Gupta; Zhou, 2024).

No Brasil, a utilização de filtros domésticos contendo CA, remonta a décadas, tendo sido avaliados em estudos que demonstraram eficiência parcial na retenção de parâmetros físico-químicos da água, como cor, turbidez e ferro, mas baixa eficiência para carbonatos, dureza e fluoretos (Aparecida et al., 1997). Esses dispositivos, ainda amplamente utilizados, são responsáveis pela geração contínua de resíduos sólidos saturados, cuja destinação inadequada pode transformar-se em uma fonte secundária de poluição.

Contudo, a utilização recorrente de filtros de CA gera uma quantidade crescente de resíduos sólidos saturados, que podem se tornar fontes secundárias de poluição se descartados de maneira inadequada. A regeneração desses materiais, seja por processos térmicos, oxidativos ou biológicos, ainda enfrenta limitações técnicas, econômicas e ambientais (El Gamal et al., 2018b; Liu et al., 2024). A ausência de normativas específicas no Brasil quanto à disposição e reaproveitamento de CA compromete ações de logística reversa e a aplicação plena dos princípios da economia circular (Marszałek; Puszczalo, 2023).

Diante desse contexto, a reutilização de CA residual como carga funcional em materiais compósitos configura-se como uma alternativa tecnológica promissora. Quando incorporado à borracha natural (BN), o CA residual pode atuar como agente de reforço, promovendo melhorias nas propriedades físico-mecânicas e contribuindo para o desempenho global do compósito, ao mesmo tempo em que reduz impactos ambientais e a dependência de insumos petroquímicos. Estudos recentes, como os de Kędzia; Haponiuk; Formela, (2024), demonstram a viabilidade da reutilização de resíduos de látex de BN, evidenciando que processos de desvulcanização e revulcanização permitem recuperar propriedades comparáveis às da borracha virgem, o que reforça a lógica de valorização de resíduos em formulações poliméricas. De forma complementar, Wong et al., (2024), destacam avanços no desenvolvimento de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, enfatizando seu papel na redução do uso de recursos não renováveis e na consolidação do conceito de compósitos sustentáveis. Na mesma linha, Öncel et al., (2024) investigaram a utilização de borra de café residual como substituto do negro de carbono (NC) em borracha de acrilonitrila-butadieno, obtendo ganhos em propriedades mecânicas e processabilidade, o que ilustra o potencial de resíduos carbonáceos alternativos no reforço de elastômeros.

A literatura também contempla o emprego de resíduos lignocelulósicos e carbonáceos, como casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos de madeira, tradicionalmente avaliados como bioenchimentos alternativos ao NC. Nesse sentido, Prochnow, (2023) ressalta a relevância do biochar derivado de resíduos orgânicos como material de alto potencial para aplicações sustentáveis, associado às estratégias de economia circular e aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Do mesmo modo, Da Silva, (2009) reporta propriedades físico-químicas e estruturais do CA obtido a partir de casca de arroz, destacando sua elevada área superficial, mesoporosidade e capacidade adsorptiva, aplicável inclusive em barreiras reativas para remediação ambiental.

Embora esses estudos reforcem a pertinência da valorização de resíduos como cargas funcionais em elastômeros, observa-se que a exploração do carvão ativado residual proveniente de processos industriais de adsorção representa ainda um campo pouco explorado. A originalidade

do presente estudo reside justamente nesse enfoque, ao investigar um resíduo de elevado valor agregado e com características físico-químicas singulares, como estabilidade térmica e elevada densidade de sítios ativos, raramente discutidas na literatura sobre compósitos elastoméricos (Djezzar et al., 2024; Liu et al., 2024b). Assim, busca-se consolidar uma contribuição inédita para a área, ampliando as possibilidades de aplicação de resíduos tecnológicos em materiais poliméricos sustentáveis.

Esses materiais têm demonstrado resultados satisfatórios em termos de resistência à tração, dureza Shore A, densidade de ligações cruzadas e estabilidade térmica, especialmente quando cargas de origem vegetal ou resíduos carbonáceos são incorporados à matriz elastomérica (Barrera Torres et al., 2025; Gobetti et al., 2024a; Öncel et al., 2024). Além disso, a presença de grupos funcionais na superfície do CA residual, como hidroxilas, carbonilas e aminas, favorece interações físico-químicas com a matriz polimérica, ampliando a coesão da rede vulcanizada e otimizando as propriedades finais do material (Bülbül; Ergün, 2024a; Charoeythornkhajhornchai et al., 2025; Xu et al., 2025).

Nesse panorama, o aproveitamento de resíduos de filtros saturados de CA, amplamente descartados em processos industriais e domésticos, representa uma estratégia promissora para mitigar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. Além de proporcionar um destino tecnicamente viável para esses resíduos, sua incorporação como cargas alternativas em compósitos elastoméricos pode reduzir custos de produção e agregar valor comercial ao material residual. Essa abordagem está fortemente alinhada aos princípios da química verde e da economia circular, ao promover a valorização de subprodutos e a redução da dependência de insumos de origem fóssil (Shanmugam et al., 2021; Wiśniewska et al., 2023). Segundo Colom; Cañavate; Carrillo-Navarrete, (2022), o uso de resíduos como cargas em matrizes poliméricas contribui para a transição industrial rumo a modelos mais sustentáveis e tecnicamente eficientes.

Diversos estudos, reforçam essa tendência de substituição de cargas convencionais por resíduos industriais e biogênicos. Laithong et al., (2025b), demonstraram que o NC reciclado (RCB), tratado quimicamente, pode substituir até 50 % do NC virgem (N330), mantendo propriedades mecânicas semelhantes. De forma semelhante, a escória de forno a arco elétrico (EAF), principal subproduto da siderurgia, foi aplicada com sucesso como enchimento em compósitos de borracha nitrílica, apresentando desempenho reológico e mecânico comparável ao de formulações padrão (Gobetti et al., 2024). Além disso, o uso de cargas lignocelulósicas de origem vegetal, como os bioenchimentos extraídos de vagens de *Cassia bakeriana* e *Cassia fistula*, mostrou viabilidade técnica para aplicações não críticas, associando reforço moderado a benefícios ambientais evidentes (Yodpanya et al., 2025). Portanto, o presente estudo propõe avaliar o

reaproveitamento de CA, saturado como carga alternativa na formulação de compósitos de BN vulcanizada. Serão analisadas propriedades como comportamento reométrico, resistência à tração, dureza Shore A, deformação na ruptura, densidade de ligações cruzadas e morfologia superficial. A BN, tipo crepe claro, amplamente utilizada na indústria nacional, foi selecionada devido à sua alta pureza, excelente processabilidade e boa compatibilidade com cargas particuladas (De Paiva et al., 2019; Formela et al., 2016; Pittayavinai; Thanawan; Amornsakchai, 2016).

Ao final, espera-se demonstrar a viabilidade técnica da incorporação de CA residual como carga em compósitos elastoméricos, propondo caminhos sustentáveis para valorização de resíduos sólidos e redução do impacto ambiental na cadeia produtiva de borracha.

2 – OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar o potencial de reutilização de resíduos provenientes de filtros de CA saturados como carga de reforço em compósitos de BN vulcanizada, analisando seus efeitos sobre as propriedades reológicas, mecânicas, térmicas, morfológicas e de inchamento, em comparação com formulações padrão contendo NC comercial.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver compósitos de BN com diferentes proporções de CA residual, substituindo, ainda que parcialmente, o NC;
- Avaliar o comportamento reológico das formulações por meio de ensaios em reômetro de disco oscilatório;
- Determinar as propriedades físico-mecânicas dos compósitos, incluindo dureza Shore A, resistência à tração, alongamento na ruptura e massa específica;
- Investigar a densidade de ligações cruzadas das formulações, por meio de ensaio de inchamento em solvente e aplicação da equação de Flory–Rehner;
- Caracterizar a morfologia dos compósitos e distribuição das cargas com base em imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Comparar os resultados entre as formulações com CA residual e aquelas contendo carga convencional, discutindo a viabilidade técnica da substituição, à luz dos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

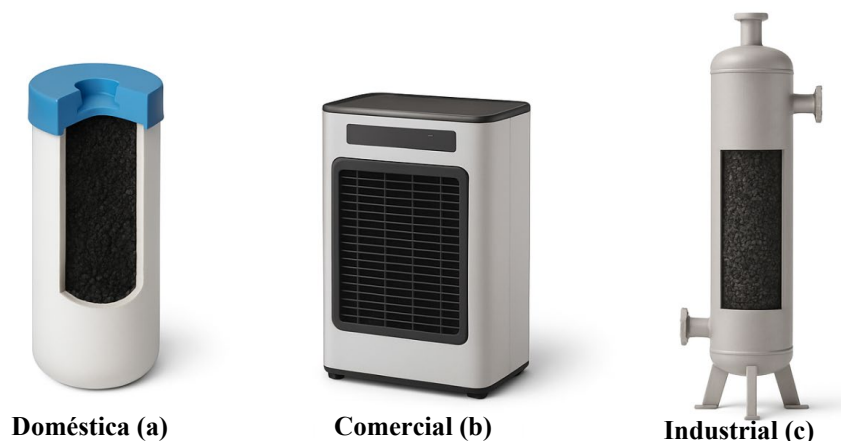
3.1 – Filtros de Carvão Ativado: Tipos, Usos e Impactos Ambientais

3.1.1 – Aplicações domésticas, comerciais e industriais

O CA é amplamente empregado como material adsorvente em diversos setores, especialmente nos processos de purificação de água, devido às suas propriedades estruturais, como alta área superficial específica, distribuição hierárquica de poros (micro, meso e macroporos) e à presença de grupos funcionais oxigenados em sua superfície (Bhatnagar et al., 2013; Mian et al., 2025; Pal et al., 2025; Ribeiro et al., 2015). Tais características conferem ao CA a capacidade de reter compostos orgânicos e inorgânicos por meio de mecanismos físicos e químicos de adsorção, favorecidos por interações específicas como ligações de hidrogênio, forças π - π e geração de espécies reativas de oxigênio durante processos regenerativos (Liu et al., 2024a; Pal et al., 2025; Rivera-Utrilla et al., 2003).

A Figura 1 ilustra a ampla gama de aplicações do carvão ativado em diferentes escalas de utilização, abrangendo sistemas domésticos (a), comerciais (b) e industriais (c), voltados à purificação de água e ar.

Figura 1. *Aplicações do carvão ativado em diferentes escalas de uso.*



Fonte: Foto da autora, aprimorada por IA.

No âmbito doméstico, o CA é utilizado em filtros de ponto de uso (POU) e ponto de entrada (POE), frequentemente em forma de blocos compactados, cartuchos granulares ou membranas impregnadas, integrados a sistemas de purificação de água. Esses dispositivos demonstram elevada eficiência na remoção de diversos poluentes, incluindo cloro residual, pesticidas, compostos orgânicos voláteis (COVs), subprodutos de desinfecção, metais pesados

(como Cu^{2+} , Pb^{2+} e Cd^{2+}), fármacos e até microrganismos (Dikobe et al., 2024; Yu; Gupta; Zhou, 2024b).

Em contextos comerciais, como restaurantes, hotéis, clínicas e laboratórios, o uso do CA é voltado à purificação de água e ar, garantindo padrões de segurança e qualidade. De acordo com Piai et al., (2022), os filtros empregados nesses ambientes são projetados para operar sob regime contínuo, com alta capacidade de retenção de poluentes e mínima perda de carga hidráulica. Sistemas de purificação de ar que utilizam CA têm se mostrado eficazes na remoção de odores, compostos sulfurados e compostos orgânicos voláteis (COVs), contribuindo significativamente para a melhoria da qualidade do ambiente interno. Além disso, pesquisas realizadas por Martignoni, (2007) e Vieira, (2015) evidenciam que esse tipo de material, quando associado a bioprocessos ou biofiltração, apresenta elevadas taxas de remoção de poluentes gasosos, tanto em ambientes industriais quanto em estações de tratamento de efluentes.

No setor industrial, destacam-se as aplicações do CA granulado (GAC) e em pó (PAC) no tratamento de águas residuárias e correntes gasosas. O GAC é amplamente empregado em colunas de adsorção para remoção de substâncias como fenóis, solventes orgânicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), pesticidas e metais tóxicos em efluentes industriais provenientes das indústrias farmacêutica, têxtil, petroquímica e metalúrgica (Asheghmoalla; Mehrvar, 2024; Mailler et al., 2024; Motúzová; Koutník; Vráblová, 2024). O PAC, por sua vez, é geralmente adicionado em dosagens controladas em tanques de mistura de estações de tratamento de água (ETAs) e efluentes, sendo especialmente útil para poluentes de baixa concentração e difícil remoção (Chen et al., 2025; Ma et al., 2019; Slavik; Bechle; Uhl, 2024; Zhang et al., 2025).

Outras formas de CA, como o carvão ativado extrudado, têm aplicações consolidadas na purificação de gases industriais, sendo utilizado em sistemas de controle de emissões atmosféricas, cabines de pintura automotiva e torres de recuperação de solventes. A adsorção de compostos sulfurados, aldeídos e vapores orgânicos é particularmente eficaz nesses sistemas, com uso intensivo em refinarias, indústrias automotivas e no tratamento de biogás (Meng et al., 2025; Pereira Torres, 2018).

Com o avanço das tecnologias de produção, observa-se o desenvolvimento de filtros funcionais a partir de resíduos industriais e agrícolas, como a casca de arroz, explorada como meio alternativo em sistemas de tratamento de águas residuais e suporte de microrganismos em lodo ativado (Da Silva, 2009; Mauer, 2025), resíduos de madeira, aplicados em filtros para melhoria de parâmetros físico-químicos da água (Costa Pimentel et al., 2022), a borra de café, convertida em biochar ativado com elevada eficiência na remoção de poluentes emergentes (Rocha, 2024), e o

bagaço de cana-de-açúcar, utilizado na produção de CA para adsorção de metais pesados em efluentes industriais (Da Silva, 2018). Esses estudos demonstram o potencial de diferentes resíduos lignocelulósicos como substitutos parciais do CA convencional, conciliando eficiência adsortiva e sustentabilidade ambiental.

A ativação química ou física desses precursores, associada à impregnação com nanopartículas metálicas, tem possibilitado a produção de materiais mais seletivos e com desempenho superior frente a contaminantes emergentes. Por exemplo, estudos demonstraram a impregnação de nanopartículas de cobre em carvão ativado, obtendo elevada eficiência na remoção de nitrato em soluções aquosas e de corantes em efluentes (Galan, 2016; Thamer et al., 2025). Casos análogos foram relatados para compostos sulfurados e nitrogenados (Oliveira, 2018).

Em síntese, o CA consolidou-se como um material estratégico na purificação de água, ar e efluentes em múltiplas escalas de aplicação. Sua versatilidade, aliada ao desenvolvimento de métodos avançados de regeneração, como a bioregeneração por meio da biodegradação de micropoluentes, e ao aproveitamento de resíduos como precursores, garante seu papel central nas tecnologias ambientais modernas e nas políticas voltadas à sustentabilidade (Piai et al., 2022).

3.1.2 – Composição dos filtros: materiais constituintes e propriedades

Os filtros de CA são estruturas multifuncionais concebidas para promover a remoção eficiente de contaminantes físicos, químicos e microbiológicos em fluxos líquidos e gasosos. Sua composição abrange o meio filtrante à base de CA, componentes estruturais, camadas de retenção, agentes antimicrobianos e sistemas de vedação, sendo a performance adsortiva diretamente influenciada pela interação sinérgica entre esses elementos (Alvarino et al., 2023; Han et al., 2020; Martins et al., 2023).

O elemento central desses dispositivos é o CA, cuja produção se baseia na carbonização e ativação de materiais carbonáceos, com destaque para biomassas lignocelulósicas de origem agrícola ou florestal. Dentre os precursores mais utilizados, destacam-se a casca de arroz, já investigada como matéria-prima para obtenção de carvões ativados aplicados à remediação ambiental (Da Silva, 2009), o bagaço de cana-de-açúcar, empregado na produção de adsorventes eficientes para remoção de metais pesados em efluentes (Da Silva, 2018), resíduos como caroços de açaí, explorados para o desenvolvimento de carvões granulados destinados ao tratamento de água potável (Vieira et al., 2024), e a borra de café, cuja conversão em CA vem sendo otimizada para aumentar a área superficial e o desempenho adsortivo em aplicações ambientais (Hyeon et al., 2025). Quando submetidos a processos adequados de ativação térmica ou química, esses

precursores resultam em materiais altamente porosos, funcionais e com elevada área superficial, reforçando seu potencial como alternativas sustentáveis ao CA convencional (Costa Pimentel et al., 2022).

As rotas de ativação química utilizam reagentes como ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de potássio (KOH) ou cloreto de zinco (ZnCl_2), enquanto a ativação física ocorre com uso de vapor ou dióxido de carbono sob temperaturas elevadas (Jawad et al., 2020; Santos, 2021b). Os filtros de CA apresentam composição complexa, podendo incorporar materiais funcionais modificados com compostos orgânicos ou inorgânicos, a fim de potencializar propriedades como área superficial, afinidade química e seletividade adsortiva. A funcionalização da superfície, como a realizada com melamina ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$), favorece a complexação com espécies metálicas e amplia a eficiência do material em contextos aplicados, incluindo a purificação de efluentes e a captura seletiva de gases (Albeladi; Mokaya, 2024; Da Silva et al., 2024; El-Wakil et al., 2022).

A configuração física do CA varia conforme sua aplicação. O pó (PAC) apresenta rápida cinética de adsorção e é comumente utilizado em sistemas de dosagem contínua (Ornellas do Valle et al., 2008; Tisler et al., 2025). Os grânulos (GAC) são empregados em colunas pressurizadas e filtros de leito fixo, sendo amplamente utilizados em sistemas de tratamento de água devido à sua eficiência na remoção de contaminantes, incluindo PFAS e micropoluentes (Tisler et al., 2025). Já os blocos compactados, frequentemente associados ao uso de ligantes poliméricos, são adotados em sistemas domésticos e comerciais, garantindo resistência mecânica, estabilidade dimensional e manutenção da permeabilidade hidráulica (Satyam; Patra, 2024).

A estrutura dos filtros é complementada por camadas externas compostas por fibras sintéticas, como polipropileno expandido ou poliéster, que funcionam como pré-filtros, retendo partículas em suspensão e prolongando a vida útil do meio adsorvente. Além disso, agentes bacteriostáticos são frequentemente incorporados ao sistema, sendo a prata (Ag^+) um dos elementos mais utilizados, devido à sua comprovada eficácia na inibição do crescimento de bactérias heterotróficas sobre a superfície do CA (El Gamal et al., 2018).

Estudos pioneiros sobre filtros domésticos comerciais evidenciam variações expressivas na quantidade de carvão ativado empregada em diferentes configurações construtivas. Pedro et al., (1997b) analisaram vinte modelos disponíveis no mercado brasileiro e verificaram que a massa média de carvão ativado granular utilizada variava de 39 ± 29 g em velas de porcelana, 157 ± 86 g em cartuchos e 330 ± 111 g em purificadores de maior porte. Essas diferenças refletem diretamente o potencial adsortivo e a durabilidade dos dispositivos, uma vez que o volume de material carbonáceo determina a quantidade de sítios ativos disponíveis para interação com contaminantes. Em termos práticos, esses valores indicam que cada filtro doméstico contém uma

fração significativa de carvão ativado granular de alta pureza, cuja recuperação após o descarte representa uma oportunidade relevante para estratégias de reuso e valorização de resíduos sólidos.

Além das camadas estruturais e do meio adsorvente principal, alguns filtros incorporam aditivos catalíticos em sua composição, com o objetivo de ampliar sua funcionalidade frente a contaminantes específicos. Óxidos metálicos de ferro, cobre ou manganês, por exemplo, podem ser impregnados na matriz adsorvente para promover reações redox, favorecendo a degradação de compostos orgânicos recalcitrantes, como cloraminas, fenóis e fármacos. Essa configuração híbrida, que associa propriedades de adsorção e catálise heterogênea, tem se mostrado promissora na remoção de poluentes de preocupação emergente em sistemas aquosos, conforme demonstrado por (Besegatto, 2021).

A estrutura porosa do CA, composta por microporos (<2 nm), mesoporos (2–50 nm) e macroporos (>50 nm), determina sua seletividade adsortiva e cinética de remoção. Enquanto os microporos são cruciais para a retenção de moléculas pequenas, os meso e macroporos favorecem a difusão de espécies maiores e facilitam o transporte de massa no interior do material (Yankovych; Melnyk; Václavíková, 2021). A área superficial específica, que pode ultrapassar 1500 m²/g, é um dos parâmetros mais críticos na eficiência de captura de poluentes, sendo frequentemente determinada por técnicas de adsorção de N₂ (BET). Estudos demonstram que o desempenho do CA na remoção de compostos orgânicos, como herbicidas e fenóis halogenados, está diretamente relacionado à sua estrutura porosa e elevada área superficial (Westphalen; Corção; Benetti, 2016).

Com base nesses fatores, a composição dos filtros de CA reflete o avanço da engenharia de materiais voltada à remediação ambiental. O conhecimento aprofundado sobre os constituintes e suas propriedades permite o desenvolvimento de filtros personalizados para diferentes contextos de uso, além de abrir perspectivas para a valorização de resíduos como precursores de adsorventes funcionais, em consonância com os princípios da química verde e da economia circular (Passos, 2022; Rios, 2019a).

3.1.3 – Quantidade fabricada e descarte global e nacional: impactos ambientais

A produção global de acetato de celulose (CA) tem apresentado crescimento constante nas últimas décadas, impulsionada pela ampliação das tecnologias de tratamento de água e ar, pelo endurecimento de normas ambientais e pelo aumento da consciência ecológica no setor industrial. De acordo com relatório recente, o mercado global de CA alcançou aproximadamente 2,10 milhões de toneladas em 2024, com destaque para China, Estados Unidos, Índia e países da União

Europeia, que concentram a maior parte da produção e do consumo mundial (IMARC GROUP, 2024).

Tendência semelhante tem sido observada na indústria de biochar, cuja produção mundial também é liderada pela China e pela Europa, reforçando a expansão global dos materiais carbonáceos voltados à sustentabilidade (Prochnow, 2023).

Esse aumento expressivo, entretanto, acarreta desafios relacionados ao gerenciamento de resíduos gerados após o uso do CA, especialmente quando saturado por poluentes, demandando estratégias adequadas de regeneração, reutilização ou descarte ambientalmente seguro. Nesse sentido, estudos, têm destacado métodos como a regeneração por ozonização intermitente, que possibilita recuperar a capacidade adsorptiva do granular (GAC) ao mesmo tempo em que evita a formação de subprodutos nocivos, garantindo estabilidade estrutural durante múltiplos ciclos de uso (Liu et al., 2024a).

Esse avanço é reflexo da crescente demanda por tecnologias de adsorção eficientes frente à multiplicação de contaminantes de preocupação emergente e à intensificação da vigilância regulatória. No entanto, o uso expressivo de CA tem gerado desafios no descarte e manejo de materiais saturados, especialmente em contextos em que ainda não existem políticas bem definidas de reaproveitamento ou logística reversa (Kayiwa et al., 2025). Neste cenário, estratégias baseadas na valorização de resíduos para a produção de adsorventes renováveis e na regeneração dos materiais utilizados, têm ganhado destaque como alternativas viáveis e sustentáveis. Rios, (2019b) demonstrou sucesso na produção de CA granular funcionalizado a partir de resíduos agroindustriais e minerários, evidenciando seu potencial de reuso após múltiplos ciclos de adsorção.

No Brasil, observa-se um aumento significativo na utilização de filtros de CA em aplicações domésticas, comerciais e hospitalares. Estima-se que milhões de cartuchos e blocos compactados sejam descartados anualmente, frequentemente sem o devido tratamento, especialmente após ciclos de uso em purificadores residenciais ou em unidades de saúde. Isso representa um desafio crescente para os sistemas de gestão de resíduos, conforme mencionado por Dos Anjos e Campos (2018). Filtros utilizados em contextos hospitalares podem ser classificados como resíduos de serviços de saúde, devido ao risco sanitário associado e à presença de contaminantes adsorvidos. Esses materiais exigem tratamento específico e disposição final adequada para minimizar impactos ambientais e riscos à saúde pública (Cristino et al., 2023). Já os resíduos gerados no ambiente doméstico, embora geralmente classificados como não perigosos, podem conter substâncias acumuladas no carvão que requerem atenção especial quanto à disposição final, conforme demonstrado por Da'Na; Awad, (2017) que investigaram a regeneração

de CA proveniente de sistemas de filtragem domésticos, destacando a importância de métodos de regeneração para reduzir os impactos ambientais e econômicos associados à disposição inadequada desses resíduos. Os filtros de carvão ativado, embora altamente eficientes na remoção de pesticidas, podem se saturar e necessitam de substituição ou regeneração, conforme destacado por Schreiber et al., (2024). Essa saturação pode gerar resíduos contendo contaminantes acumulados, exigindo cuidados específicos na destinação para evitar impactos ambientais.

Do ponto de vista ambiental, o descarte inadequado de filtros de CA saturados representa uma preocupação crítica, pois os resíduos podem conter uma variedade de poluentes adsorvidos, incluindo metais pesados (Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}). Estudos realizados em áreas de lixão, como o de Cruz; Beleza, (2025), evidenciam que esses elementos podem alterar significativamente os atributos químicos do solo, aumentando os riscos de lixiviação e contaminação de recursos hídricos adjacentes, além de comprometer a saúde dos ecossistemas locais. Pesticidas, fármacos, corantes, subprodutos de desinfecção e metais como manganês e urânio podem ser mobilizados por processos de lixiviação ou liberados de biofilmes e sedimentos em sistemas de distribuição de água, contaminando o solo e os corpos hídricos subterrâneos. Estudos como o de Yu; Gupta; Zhou, (2024a) destacam a importância de sistemas de filtragem no ponto de uso (POU), como os de osmose reversa, para a remoção eficaz desses contaminantes e a mitigação de riscos à saúde pública. Além disso, a degradação térmica dos componentes poliméricos dos filtros pode liberar microplásticos e compostos orgânicos voláteis (COVs), como hidrocarbonetos, aldeídos e ácidos carboxílicos, que persistem no ambiente. Esses produtos de degradação podem contribuir significativamente para a poluição difusa em ambientes aquáticos e atmosféricos, afetando a qualidade do ar, a saúde dos ecossistemas e potencialmente entrando na cadeia alimentar (Zhang et al., 2024).

Estudos demonstram que o CA exaurido, embora com parte de sua capacidade adsorviva comprometida, ainda mantém estrutura porosa relevante e grupos funcionais ativos, podendo ser reutilizado em aplicações tecnológicas diversas, como adsorventes secundários, cargas em matrizes poliméricas, cerâmicas funcionais, materiais catalíticos ou compósitos de engenharia (Silva, 2017). No entanto, na prática, esse resíduo é frequentemente classificado como inerte e descartado, sem que seu potencial de valorização seja devidamente explorado (Fouda-Mbanga; Onotu; Tywabi-Ngeva, 2024).

A recuperação e o reuso de carvões ativados exigem uma articulação entre políticas públicas, pesquisa aplicada e inovação industrial. Países como Alemanha, Japão e Coreia do Sul já implementam programas de recolhimento, regeneração e certificação de filtros regenerados, com subsídios logísticos e incentivos fiscais ao setor produtivo (Guerreiro, 2025). No Brasil, a

integração entre instituições de pesquisa, setor produtivo e órgãos reguladores representa uma oportunidade estratégica para desenvolver rotas tecnológicas de valorização de resíduos adsorventes, como demonstrado por Liu et al., (2024b), que investigaram a regeneração de CA saturado com pesticidas por ozonização, alcançando alta eficiência, evitando subprodutos indesejados e demonstrando viabilidade para reuso em escala piloto.

3.1.4 – Vida útil dos filtros e fatores que afetam sua saturação

A vida útil dos filtros de carvão ativado granulado (CAG) está diretamente relacionada à sua capacidade adsorativa remanescente, a qual é influenciada por fatores ambientais, operacionais e estruturais, como umidade, pH, granulometria e características da superfície, incluindo área específica e distribuição de poros. Esses aspectos determinam a eficiência do CAG na retenção de compostos orgânicos voláteis (COVs), pesticidas, metais pesados e outros contaminantes presentes em soluções aquosas, sendo essenciais para assegurar a qualidade da água tratada e a segurança do consumidor (Silva, 2017). Em geral, considera-se que a saturação do CA ocorre quando o breakthrough time é atingido, ou seja, o momento em que seus poros e sítios ativos estão completamente ocupados, reduzindo significativamente sua capacidade de remoção de contaminantes e prejudicando a eficiência do sistema de purificação (Irazusta et al., 2020).

De acordo com a ficha técnica do filtro Brita® LONGLAST+® (Modelo #OB06), a vida útil dos refis de carvão ativado varia conforme o modelo e as condições de uso. Para jarros com carvão ativado, como o Brita® LONGLAST+®, recomenda-se a substituição do refil a cada 120 galões (aproximadamente 454 litros), o que corresponde a cerca de 6 meses para uma família média. Já em aplicações domésticas, como cartuchos POU (ponto de uso) ou under-sink no Brasil, a especificação pode variar entre 5.000 e 6.000 litros (aproximadamente 6 a 12 meses), sempre considerando a qualidade da água de entrada e o regime de uso (Brita, 2023).

Fatores como umidade e características da superfície podem acelerar esse processo, especialmente em carvões de caráter ácido. Essa condição pode, inclusive, favorecer a liberação de poluentes anteriormente retidos, comprometendo a qualidade da água tratada. Estratégias inovadoras de regeneração, como a aplicação de ozonização assistida por bolhas micro-nano (O₃-MNBs), demonstraram alta eficiência na restauração da capacidade adsorativa do CA granular (GAC). Além disso, esse método preserva a integridade da estrutura porosa do material, prolongando sua vida útil e garantindo maior estabilidade e eficiência no processo de purificação de água (Liu et al., 2024b).

A vida útil dos filtros de CA granulado (CAG) está diretamente relacionada à sua capacidade adsorativa remanescente, que é influenciada por fatores ambientais, operacionais e

estruturais, como umidade, pH, granulometria e características da superfície. Em geral, considera-se que a saturação do CAG ocorre quando sua capacidade de remoção de contaminantes é significativamente reduzida, prejudicando a eficiência do sistema de purificação e podendo provocar até mesmo a liberação de poluentes anteriormente retidos (Fundneider et al., 2021; Irazusta et al., 2020; Liu et al., 2024b; Viegas et al., 2022).

Em sistemas com alta carga orgânica ou presença de compostos com elevado peso molecular, como corantes, pesticidas ou fármacos, a saturação dos adsorventes pode ocorrer rapidamente devido à ocupação dos sítios ativos disponíveis. Mesmo em filtros com área superficial elevada, fatores como a concentração inicial do contaminante, o tempo de contato e a dosagem do adsorvente desempenham um papel crucial na eficiência do processo de remoção. Estudos como o de Preglo et al., (2023) demonstram que, embora adsorventes como o CA de sementes de manga apresentem alta eficiência na remoção de fármacos, a saturação pode ser influenciada pela limitação dos sítios ativos e pela interação entre as variáveis operacionais. A adsorção preferencial de determinados poluentes, em detrimento de outros, contribui para a ocupação precoce dos sítios ativos do CA granular (CAG). Esse fenômeno, aliado à possível obstrução dos poros e à modificação química da superfície do CAG ao longo do tempo, reduz sua capacidade adsorptiva e seletividade, especialmente em processos de regeneração consecutiva (Todeschini, 2023).

Do ponto de vista físico-químico, filtros compostos por CA com predominância de microporos (< 2 nm) apresentam maior eficiência na retenção de moléculas pequenas, como a microcistina-LR, devido à compatibilidade de tamanho (Araújo, 2017). No entanto, em sistemas contendo material particulado ou compostos de maior dimensão estérica, sua vida útil pode ser comprometida, especialmente pela saturação mais rápida dos sítios de adsorção. Por outro lado, carvões mesoporosos (2–50 nm) ou com estrutura hierarquizada demonstram melhor desempenho em sistemas mais complexos, favorecendo a difusão interna das moléculas e aumentando a capacidade de adsorção de compostos maiores (Araújo, 2017; Yankovych; Melnyk; Václavíková, 2021). Além disso, estudos de Yankovych; Melnyk; Václavíková, (2021) evidenciam que o CA granular (CAG) mesoporoso, com área superficial de $1010 \text{ m}^2/\text{g}$ e porosidade predominante em torno de 4 nm, apresenta elevada capacidade de adsorção de 4-halogenofenóis (Q_{max} até $168,5 \text{ mg/g}$), graças à combinação de mecanismos como difusão de filme, ligações de hidrogênio e reações de esterificação com grupos carboxílicos e amino presentes na superfície. Essa configuração não apenas favorece a remoção de moléculas maiores e mais complexas, mas também garante maior regenerabilidade dos poros por solventes como etanol e ácido acético, prolongando a vida útil do material.

Além disso, a formação de biofilmes, a colmatção por material particulado e a oxidação superficial dos grupos funcionais podem alterar as propriedades adsorptivas do CA ao longo do tempo, reduzindo sua eficiência e encurtando sua vida útil. Em aplicações industriais contínuas, a vida útil dos filtros pode variar de algumas semanas a meses, sendo essencial o monitoramento periódico da qualidade do efluente tratado para determinação do ponto de substituição ou regeneração. A literatura indica que a formação de biofilmes pode impactar diretamente o desempenho do CA, tanto de forma positiva quanto negativa, a depender do sistema de aplicação. Por exemplo, em estudos sobre tratamento de efluentes de refinaria de petróleo, filtros de CA granulado colonizados por biofilmes (CAB) demonstraram aumento significativo na durabilidade operacional e maior remoção de carbono orgânico total quando comparados a filtros convencionais, especialmente quando utilizados em conjunto com processos oxidativos avançados (Souza, 2010). Em contrapartida, em contextos de risco sanitário, como efluentes hospitalares contaminados por microrganismos patogênicos, a formação de biofilmes pode comprometer a qualidade do tratamento, sendo necessária a adoção de estratégias como a impregnação do CA com nanopartículas de prata, que demonstram propriedades antimicrobianas eficazes para inibir o crescimento microbiano e prevenir a formação de biofilmes (Amirfakhri et al., 2025; Deng et al., 2024; Neme; Gonfa; Masi, 2023).

Estratégias para prolongar a vida útil incluem a utilização de pré-filtros para retenção de sólidos em suspensão, o controle de pH e temperatura na etapa de tratamento e, em alguns casos, a impregnação do CA com agentes bacteriostáticos ou catalíticos que reduzem a carga contaminante adsorvível (Antonio; Duarte, 2011). O entendimento aprofundado dos mecanismos que levam à saturação dos filtros de CA é crucial para o desenvolvimento de tecnologias mais duráveis e sustentáveis. A otimização desses dispositivos passa não apenas pela melhoria dos materiais adsorventes, mas também pela adaptação dos sistemas de tratamento às características do efluente alvo, reforçando a importância de um projeto integrado entre engenharia de materiais e controle ambiental. Nesse contexto, estudos demonstram que estratégias de regeneração de filtros químicos saturados permitem não apenas o reuso do CA, mas também a recuperação de componentes e a viabilização da logística reversa, em conformidade com os princípios da economia circular (Vieira, 2019). Abordagens inovadoras, como a regeneração de carvões ativados com líquidos iônicos, têm apresentado elevada eficiência com menor impacto ambiental (Tekić et al., 2025), enquanto pesquisas recentes ressaltam a influência da porosidade do material sobre sua durabilidade e eficiência em processos de adsorção (Quintas Salamba et al., 2025). Além disso, análises de custo-efetividade destacam que os processos de regeneração e reuso de materiais

adsorventes são economicamente viáveis, fortalecendo práticas de economia circular em sistemas de tratamento de águas residuais (Gkika et al., 2025).

3.1.5 – Tecnologias de regeneração e reaproveitamento de filtros exauridos

A regeneração e o reaproveitamento de filtros de CA exauridos representam estratégias fundamentais para mitigar os impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado desses resíduos sólidos e, simultaneamente, promover a sustentabilidade nos sistemas de tratamento de água e efluentes. Essas abordagens se inserem nos princípios da economia circular ao prolongar a vida útil dos materiais, reduzir a demanda por recursos virgens e minimizar a geração de passivos ambientais. Nesse contexto, o estudo de (Azevedo, 2023) investigou a regeneração de CA saturado utilizando dióxido de carbono em condições de fluido supercrítico, evidenciando a importância de explorar rotas inovadoras de reaproveitamento, ainda que ajustes operacionais sejam necessários para ampliar a eficiência do processo.

Os métodos de regeneração do CA podem ser agrupados em quatro categorias principais: térmicos, químicos, biológicos e híbridos. A escolha do método mais apropriado depende da natureza dos contaminantes adsorvidos, das características físico-químicas do CA e das condições operacionais do sistema de tratamento (El Gamal et al., 2018a). Esses fatores são determinantes para a eficiência e a viabilidade do processo de regeneração.

A regeneração térmica tradicional é realizada em fornos rotativos, sob temperaturas entre 600 °C e 900 °C, promovendo a decomposição térmica dos poluentes retidos na estrutura do CA. Embora apresente elevada eficiência de remoção, esse processo demanda alto consumo energético e pode provocar degradação da estrutura porosa devido à sinterização, reduzindo a capacidade adsortiva em ciclos subsequentes (Renu; Sithole, 2024). Resultados experimentais recentes reforçam essa limitação: Bunker; Dvorak; Aly Hassan, (2023), observaram que a regeneração de CA saturado com H₂S, realizada a 500 °C, permitiu recuperar cerca de 70% da capacidade adsortiva inicial após o primeiro ciclo, mas apresentou queda progressiva de eficiência em ciclos posteriores devido à presença de compostos residuais, como o enxofre, que não foram completamente eliminados. De forma semelhante Renu; Sithole, (2024), relataram que a regeneração térmica, embora viável, apresenta eficiência limitada após múltiplos ciclos, associada a resíduos persistentes que comprometem a capacidade de adsorção.

Alternativas inovadoras têm sido propostas para superar essas limitações. Tekić et al., (2025) demonstraram que a utilização de líquidos iônicos como agentes regenerantes permite restaurar a capacidade adsortiva de carvões ativados exauridos com menor impacto ambiental e

maior preservação da estrutura porosa, representando uma alternativa promissora às rotas térmicas convencionais.

Como alternativa aos métodos térmicos convencionais, abordagens não convencionais têm ganhado destaque. De acordo com Huang et al., (2024), a regeneração térmica de CA utilizando micro-ondas apresenta vantagens significativas em relação aos métodos convencionais, reduzindo o consumo de energia em cerca de 58%, melhorando a uniformidade da distribuição de temperatura e minimizando zonas sobreaquecidas, ao mesmo tempo em que preserva a estrutura porosa do material. Além disso, Zhao et al., (2025), demonstraram que biochars magnéticos fabricados a partir de resíduos sólidos, como casca de amendoim e lama vermelha, apresentam alta reusabilidade, mantendo mais de 70% de eficiência após cinco ciclos de regeneração, o que evidencia sua estabilidade estrutural e potencial para aplicações em tratamento de água.

A regeneração química emprega ácidos minerais (como HCl, HNO₃ e H₂SO₄), ácidos orgânicos, álcalis (como NaOH) e outros agentes químicos para promover a dessorção de contaminantes, usualmente por solubilização, neutralização, complexação ou troca iônica. A eficiência depende sobretudo da solubilidade dos adsorbatos nos solventes e do tipo de interação com a superfície do adsorvente; contudo, o tratamento pode alterar a estrutura química do material, impactando o desempenho em ciclos subsequentes (Renu; Sithole, 2024).

A biorregeneração, embora ainda restrita a estudos laboratoriais, tem se mostrado uma alternativa de baixo impacto ambiental para prolongar a vida útil do CA. Esse processo utiliza microrganismos capazes de degradar compostos orgânicos adsorvidos, restaurando parcialmente os sítios ativos do material. Fungos ligninolíticos, como *Phanerochaete chrysosporium*, e bactérias do gênero *Pseudomonas* têm se destacado nesse contexto (Santos, 2021a). De acordo com El Gamal et al., (2018a), a eficiência da biorregeneração depende de fatores como a disponibilidade de nutrientes, o teor de oxigênio dissolvido, a temperatura e o tempo de residência do CA no reator, o que evidencia a complexidade do processo. Mais recentemente, Gutkoski; Schneider; Michels, (2024), destacaram que o CA biológico (CAB), no qual ocorre o desenvolvimento de biofilmes microbianos na superfície do adsorvente, pode promover a regeneração e aumentar a vida útil do material. Apesar do potencial promissor, a aplicação em escala industrial ainda enfrenta desafios relacionados à manutenção de condições ideais de cultivo microbiano, à estabilidade das comunidades formadas e à análise de custos operacionais.

Além dos processos regenerativos, destaca-se o reaproveitamento direto do (CA) saturado em aplicações alternativas. A incorporação desse resíduo como carga funcional em matrizes poliméricas, como elastômeros naturais ou sintéticos, tem se mostrado promissora para a melhoria de propriedades mecânicas e térmicas, ao mesmo tempo em que contribui para a redução de custos

e de impactos ambientais. Jawad et al., (2020), demonstraram a viabilidade de produzir CA a partir de resíduos agrícolas, como o sabugo de milho, reforçando a importância de estratégias sustentáveis para o reaproveitamento de materiais adsorventes. De forma complementar, Gobetti et al., (2024a) mostraram que a substituição parcial do NC por escória de forno elétrico a arco (EAF) em compósitos de borracha nitrílica resulta não apenas em propriedades mecânicas comparáveis, mas também em benefícios ambientais significativos, alinhando-se aos princípios da economia circular.

Nesse cenário, verifica-se um movimento crescente em direção à valorização de resíduos carbonáceos por meio de tecnologias limpas e integradas, incluindo biorremediação, reaproveitamento direto e regeneração seletiva. No entanto, a adoção efetiva dessas práticas no Brasil ainda é incipiente, exigindo o fortalecimento da articulação entre academia, setor produtivo e órgãos reguladores para viabilizar sua implementação em escala comercial.

Leite, (2025) investigou a produção de CA a partir da casca da *Acácia Negra*, demonstrando elevada eficiência na adsorção de glifosato em meio aquoso, com capacidade máxima de remoção de 152,98 mg g⁻¹, obtida a partir de ensaios cinéticos e isotérmicos. De forma semelhante, Cristóvão, (2020) avaliou a remoção do sulfametoxazol utilizando sistemas híbridos compostos por leitos construídos de macrófitas seguidos de adsorção em carvão ativado, alcançando uma capacidade máxima de remoção de 177 mg g⁻¹. Ambos os estudos destacam o potencial técnico e ambiental da reutilização de materiais carbonáceos em sistemas de tratamento de efluentes, reforçando o papel da funcionalização de filtros saturados como uma estratégia viável e sustentável.

Nesse panorama, a presente pesquisa alinha-se ao esforço científico global voltado à valorização de resíduos urbanos carbonáceos. A proposta de incorporação de CA saturado como bioenchimento funcional em compósitos de BN vulcanizada insere-se nessa tendência, contribuindo para a substituição parcial de insumos petroquímicos e para o desenvolvimento de materiais sustentáveis, com elevado desempenho técnico e menor impacto ambiental.

3.1.7 – Normas técnicas e regulamentações aplicáveis ao uso e descarte de filtros de carvão ativado

A utilização intensiva de filtros de CA em sistemas de purificação de água e ar, nas esferas doméstica, comercial e industrial, requer atenção rigorosa às normas técnicas e regulamentações ambientais que regem o manejo desses materiais, especialmente após a saturação. O correto enquadramento legal e técnico dos resíduos gerados, bem como a existência de diretrizes

específicas para seu transporte, tratamento e eventual reaproveitamento, são aspectos cruciais para a promoção da segurança ambiental e da sustentabilidade industrial.

No Brasil, a classificação de resíduos sólidos é regida pela ABNT NBR 10004:2020, que os categoriza em resíduos perigosos (classe I), não perigosos (classe II) e inertes, com base em critérios como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Nesse contexto, filtros de CA) saturados, dependendo da natureza dos contaminantes adsorvidos, como metais pesados, pesticidas, solventes orgânicos e fármacos, podem ser enquadrados como resíduos perigosos, demandando acondicionamento, transporte e destinação final adequados, em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela legislação ambiental vigente (Cristino et al., 2023; Santos; Pedroso; Ribeiro, 2022).

Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n.º 12.305/2010) tenha sido regulamentada pelo Decreto n.º 10.936 (12 de janeiro de 2022), que detalha instrumentos como a logística reversa e a responsabilidade compartilhada, essa regulamentação permanece com escopo amplo e geral, sem estabelecer diretrizes claras para produtos específicos, como os filtros de CA. Essa ausência de normativas direcionadas dificulta a implementação eficaz dos dispositivos da PNRS nesse contexto e pode resultar em descarte inadequado desses filtros (Besen et al., 2025).

Em contrapartida, países desenvolvidos já dispõem de marcos regulatórios mais robustos e específicos. Nos Estados Unidos, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) reconhece que o carvão ativado granular (GAC), após a utilização, pode conter contaminantes perigosos, exigindo manuseio especial e descarte em instalações licenciadas para resíduos perigosos. Além disso, a regeneração do GAC ocorre predominantemente em unidades térmicas, nas quais os contaminantes são destruídos ou removidos, o que reforça a necessidade de monitoramento ambiental rigoroso e de licenciamento adequado (Epa, 2021). De forma semelhante, a União Europeia, por meio da Decisão de Execução (UE) 2018/1147, que estabelece as conclusões sobre as Melhores Técnicas Disponíveis (BAT) para o tratamento de resíduos, inclui processos térmicos aplicados a materiais adsorventes, como o CA saturado, no escopo regulatório. Essas diretrizes definem limites de emissão, procedimentos de monitoramento e requisitos de eficiência ambiental, servindo de base para o licenciamento de instalações nos Estados-Membros (NBR 13221, 2003a; “Putting the circular economy into motion”, 2024a; Yamaguchi, 2021a).

Estudos recentes indicam que a falta de harmonização regulatória entre países permanece como um dos principais entraves à adoção de soluções circulares para resíduos, sobretudo em nações em desenvolvimento, onde definições e padrões não alinhados dificultam práticas de reuso, reciclagem e remanufatura. Somam-se a esse cenário as lacunas de infraestrutura, a ausência de incentivos legais e fiscais e a fragilidade na fiscalização, fatores que limitam iniciativas de

regeneração e reaproveitamento de resíduos carbonáceos. No caso brasileiro, a ABNT NBR 13221:2023 estabelece requisitos para o transporte terrestre de resíduos perigosos; contudo, sua aplicação prática ainda é afetada por falhas operacionais e baixa rastreabilidade, reforçando a necessidade de mecanismos de monitoramento mais eficazes e de padrões compatíveis em âmbito internacional (ICC; EY, 2024; NBR 13221, 2003; Yamaguchi, 2021).

Nesse contexto, evidencia-se a urgência na elaboração de normas técnicas específicas para o uso, regeneração e descarte de filtros de carvão ativado, construídas sob uma abordagem multidisciplinar que integre dimensões legais, sanitárias, ambientais e tecnológicas. A cooperação entre agências reguladoras, setor produtivo e instituições de pesquisa pode desempenhar papel estratégico na definição de protocolos técnicos compatíveis com a realidade nacional, capazes de fomentar soluções sustentáveis para o reaproveitamento desses resíduos em matrizes poliméricas, cerâmicas ou catalíticas.

A persistente ausência de regulamentações detalhadas no Brasil não apenas fragiliza o controle ambiental, mas também desperdiça o potencial de valorização de resíduos com elevado valor funcional. Superar esse desafio requer a formulação de marcos regulatórios modernos e integrados, que viabilizem a reutilização segura e eficiente dos filtros de carvão ativado, alinhada aos princípios da química verde e da economia circular.

3.1.8 – Influência das características físico-químicas do carvão ativado no desempenho adsorptivo

O desempenho adsorptivo do carvão ativado (CA) está diretamente relacionado às suas propriedades físico-químicas, definidas pelo tipo de precursor, pelas condições de carbonização e ativação, química ou física, e por eventuais tratamentos posteriores. Entre essas propriedades, destacam-se a distribuição volumétrica de poros (microporos, mesoporos e macroporos), a área superficial específica e a presença de grupos funcionais na superfície, fatores que influenciam tanto a capacidade quanto a cinética de adsorção. Estudos recentes indicam que a combinação equilibrada entre microporos e mesoporos aumenta a eficiência em sistemas dinâmicos de fluxo contínuo, como observado na estrutura micro e mesoporosa do CA produzido a partir das vagens residuais de *Erythrina speciosa*, que favorece a adsorção de poluentes em soluções aquosas (Georgin et al., 2023). De forma semelhante, pesquisas com CA derivado de bambu demonstram que, embora predominem os microporos (>85% do volume total de poros), o aumento da mesoporosidade em condições de ativação mais intensas pode contribuir para melhorar o desempenho em aplicações específicas, ampliando a conectividade e a acessibilidade da rede porosa (Phothong; Tangsatthikulchai; Lawtae, 2021).

A área superficial específica do CA é amplamente reconhecida como um dos principais parâmetros de sua capacidade adsortiva. Resultados recentes reforçam essa tendência, Djezzar et al., (2024) demonstraram que a ativação de biomassa da alga verde *Spirogyra* seguida de carbonização a 600 °C resultou na formação de microporos com diâmetro médio de 1,32 nm, eficazes na adsorção de íons metálicos como Cu^{2+} , estrutura que também pode favorecer a retenção de moléculas orgânicas de baixa massa molar. De modo complementar, Liu et al., (2024b) destacaram que a área superficial específica do CA granular é determinante para o desempenho adsortivo, observando que a amostra GAC5 apresentou 1128 m²/g de área específica e 6,55 mL/g de volume total de poros, valores que explicam sua elevada eficiência na remoção de atrazina. Em estudo clássico, Belhachemi et al., (2009) compararam a ativação de caroços de tâmara com vapor d'água e dióxido de carbono, verificando que o vapor tende a ampliar a microporosidade, enquanto o CO₂ promove o desenvolvimento mais uniforme de microporos e mesoporos, resultando em uma estrutura otimizada para aplicações ambientais.

Do ponto de vista químico, a presença de grupos funcionais oxigenados na superfície do carvão ativado, como carboxilas, lactonas, hidroxilas e fenólicos, é essencial para promover interações eletrostáticas, complexação e ligações de hidrogênio com poluentes. Esses grupos podem ser introduzidos ou intensificados por tratamentos com agentes como H₃PO₄, KOH ou HNO₃, que oxidam controladamente a matriz carbonácea, aumentando sua polaridade superficial e afinidade por contaminantes iônicos ou polares. Demiral; Samdan; Demiral, (2021) observaram que a oxidação com HNO₃ intensificou significativamente a presença de grupos carboxílicos e fenólicos, elevando a eficiência de remoção de metais pesados. De forma complementar, Kim et al., (2019) destacam que a modificação química de CA com diferentes oxidantes e bases promove ganhos expressivos na capacidade adsortiva, especialmente em sistemas de corantes e efluentes industriais.

A composição elementar do carvão ativado exerce influência direta sobre seu desempenho adsortivo e sua estabilidade térmica. Em geral, teores de carbono fixo acima de 80–85% estão associados a maior aromaticidade estrutural, caracterizado pela formação de anéis aromáticos condensados semelhantes aos domínios grafíticos. Essas estruturas conferem maior estabilidade térmica e favorecem a presença de sítios ativos de adsorção, tanto nas superfícies basais quanto nas bordas funcionais Iwanow et al., (2020). Elementos residuais como oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre contribuem para a formação de grupos funcionais superficiais, hidroxilas, carboxilas e lactonas, que modulam a polaridade e a reatividade da superfície carbonácea, aumentando sua afinidade por contaminantes iônicos (Xu et al., 2021). Adicionalmente, traços de elementos inorgânicos, como silício, ferro e alumínio, frequentemente

presentes em carvões ativados obtidos a partir de resíduos agroindustriais ricos em sílica, como a casca de arroz, podem modificar o comportamento catalítico e eletroquímico do material, além de impactar sua eficiência em processos de regeneração (Nzereogu et al., 2023).

Além dessas propriedades, o pH do material também é um parâmetro importante, pois reflete a natureza ácida ou básica da superfície e influencia sua interação com espécies dissolvidas. No presente estudo, o carvão ativado residual apresentou pH levemente ácido, indicando a presença de grupos oxigenados e ácidos superficiais que podem favorecer interações com espécies metálicas e compostos polares. Esse resultado está em consonância com observações de outros autores que correlacionam superfícies moderadamente ácidas à maior reatividade em meios aquosos (Deng et al., 2024). Assim, compreender a relação entre as propriedades físico-químicas do CA e seu desempenho adsorptivo é fundamental para o desenvolvimento de materiais otimizados para aplicações específicas. Essa compreensão também é estratégica para propor novos usos do CA residual, como sua incorporação em compósitos poliméricos ou sua reativação química para reutilização em sistemas de tratamento ambiental. O controle dessas propriedades permite a personalização do CA, garantindo maior seletividade, eficiência e durabilidade em processos adsorptivos de múltiplas escalas, alinhando seu uso às diretrizes da economia circular e da sustentabilidade.

3.2 – Borracha Natural: Estrutura, Processamento e Modificações

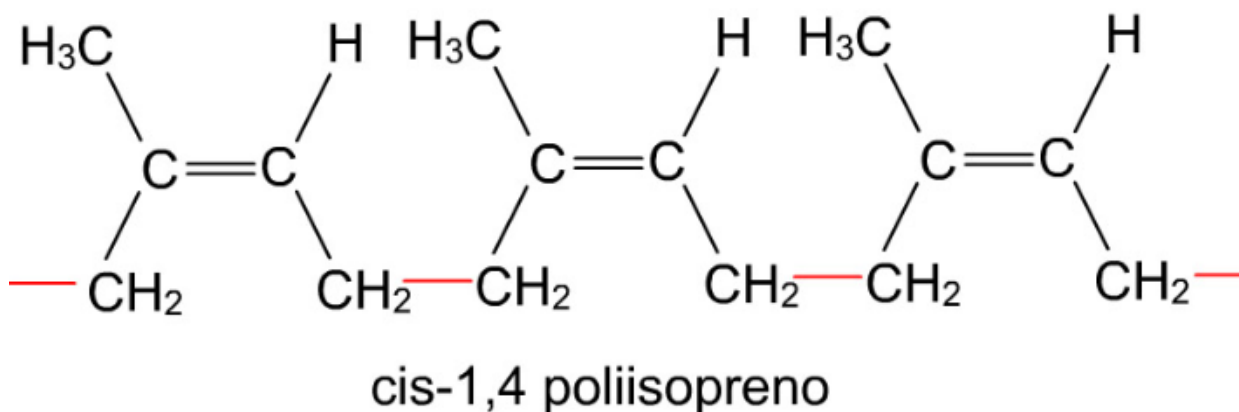
3.2.1 – Composição e propriedades da borracha natural (BN)

A borracha natural (BN) é um biopolímero de origem renovável constituído majoritariamente por cis-1,4-poliisopreno, cuja unidade repetitiva contém duplas ligações conjugadas responsáveis por suas propriedades elásticas e capacidade de recuperação após deformação. Essa estrutura confere à BN elevada resistência à fadiga e ao rasgo, além de flexibilidade em baixas temperaturas e bom amortecimento dinâmico (Huang et al., 2024b). A estrutura química repetitiva do cis-1,4-poliisopreno, que fundamenta essas propriedades, encontra-se representada na Figura 2.

Entretanto, devido à presença de insaturações na cadeia, a BN apresenta sensibilidade à oxidação e à radiação ultravioleta, o que pode comprometer seu desempenho em ambientes agressivos. Para

minimizar esses efeitos, utilizam-se antioxidantes, estabilizantes e cargas funcionais que prolongam sua vida útil (Wang et al., 2024).

Figura 2. Estrutura repetitiva do polímero *cis*-1,4-poliisopreno, unidade fundamental da borracha natural.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 – Origem do látex e tipos comerciais

principal fonte de borracha natural (BN) é o látex da *Hevea brasiliensis*, que contém cerca de 30–40 % de *cis*-1,4-poliisopreno, além de proteínas, lipídios e compostos inorgânicos que influenciam diretamente suas propriedades físico-químicas. O processo de extração do látex, conhecido como sangria, realizado por incisões controladas no tronco da seringueira, está ilustrado na Figura 3. Após a coleta, o látex é submetido às etapas de coagulação e secagem, resultando em diferentes tipos comerciais de borracha, como o crepe claro, o *Ribbed Smoked Sheet* (RSS) e o *Technically Specified Rubber* (TSR), os quais diferem quanto à pureza, coloração e desempenho tecnológico (Lehman et al., 2022; Fagbemi et al., 2018).

Figura 3. Extração (sangria) do látex da *Hevea brasiliensis*.



Fonte: Autoria própria.

O crepe claro brasileiro, utilizado neste trabalho, apresenta elevada pureza, coloração clara e baixo teor de contaminantes, características que favorecem formulações mais estáveis e reprodutíveis. Em razão dessas propriedades, esse tipo de borracha é amplamente empregado em estudos de compósitos elastoméricos com enfoque em sustentabilidade e desempenho técnico (Barrera Torres et al., 2025; Santos et al., 2014).

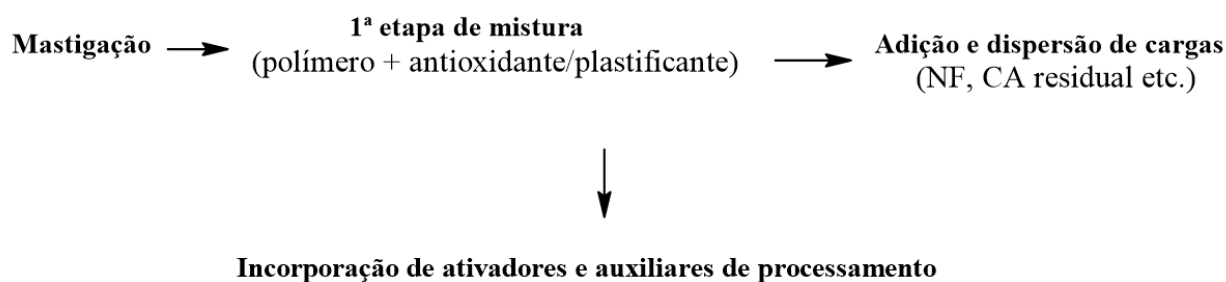
3.2.3 – Processamento físico: mastigação, mistura e formulação

O processamento da borracha natural (BN) compreende um conjunto de etapas fundamentais que definem a estrutura final do elastômero e, conseqüentemente, suas propriedades físicas e mecânicas. Inicialmente, realiza-se a etapa de mastigação, cujo objetivo é reduzir o peso

molecular e a viscosidade da borracha, facilitando a incorporação homogênea de aditivos e cargas ao longo do processamento (Peterson; Chisholm, 2024).

Na sequência, o polímero é submetido à etapa de mistura, na qual ocorre a adição de antioxidantes e plastificantes, seguida pela incorporação e dispersão das cargas reforçantes, como o negro de carbono (NC) e o carvão ativado residual (CA), e, por fim, pela introdução de ativadores e auxiliares de processamento. O fluxograma apresentado na Figura 4 sintetiza as principais etapas físicas envolvidas no processamento da BN, evidenciando a sequência operacional adotada. O controle rigoroso da temperatura, do tempo de mistura e da ordem de adição dos componentes é essencial para assegurar adequada dispersão das cargas e estabilidade do composto final (Filgueira et al., 2024).

Figura 4. Fluxograma das etapas físicas do processamento da BN.



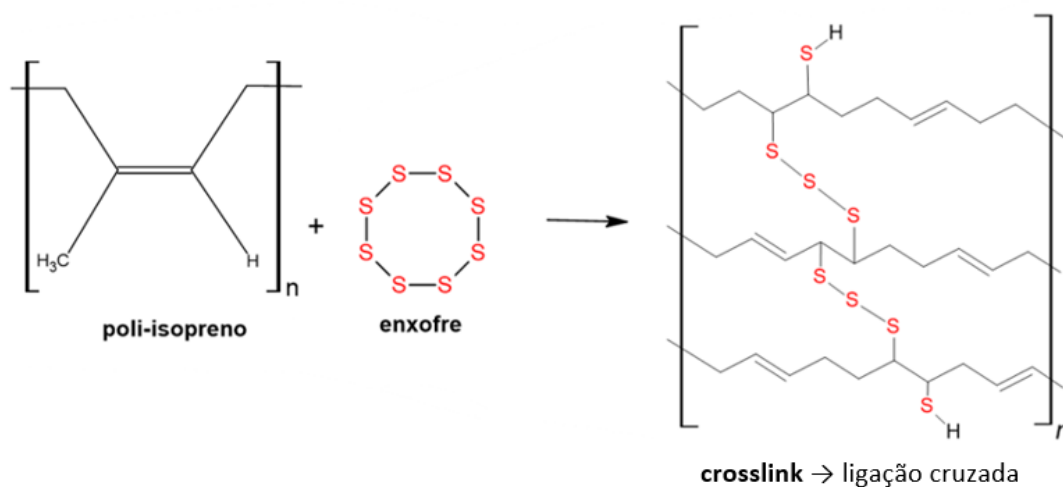
Fonte: Autoria própria.

3.2.4 – Vulcanização: formação da rede tridimensional elastomérica

Concluída a etapa física de processamento, a mistura segue para a vulcanização, processo termoquímico responsável por transformar a borracha natural (BN) de um material predominantemente plástico em um elastômero com estrutura tridimensional. Nesse processo, o enxofre elementar (S_8) reage com as duplas ligações carbono-carbono ($C=C$) presentes na cadeia do cis-1,4-poliisopreno, promovendo a formação de ligações cruzadas (cross-links) do tipo C-S-S-C, conforme esquematizado na Figura 5.

Essa reação é catalisada por aceleradores, como o dissulfeto de dibenzotiazol (MBTS) e o tetrametiltiuram dissulfeto (TMTD), e ativada pelo sistema composto por óxido de zinco (ZnO) e ácido esteárico. A atuação conjunta desses componentes favorece a formação do estearato de zinco, espécie fundamental para a ativação do enxofre e para a melhoria da solubilização dos aceleradores na matriz polimérica (Hiranobe, 2020a; Fagbemi et al., 2018).

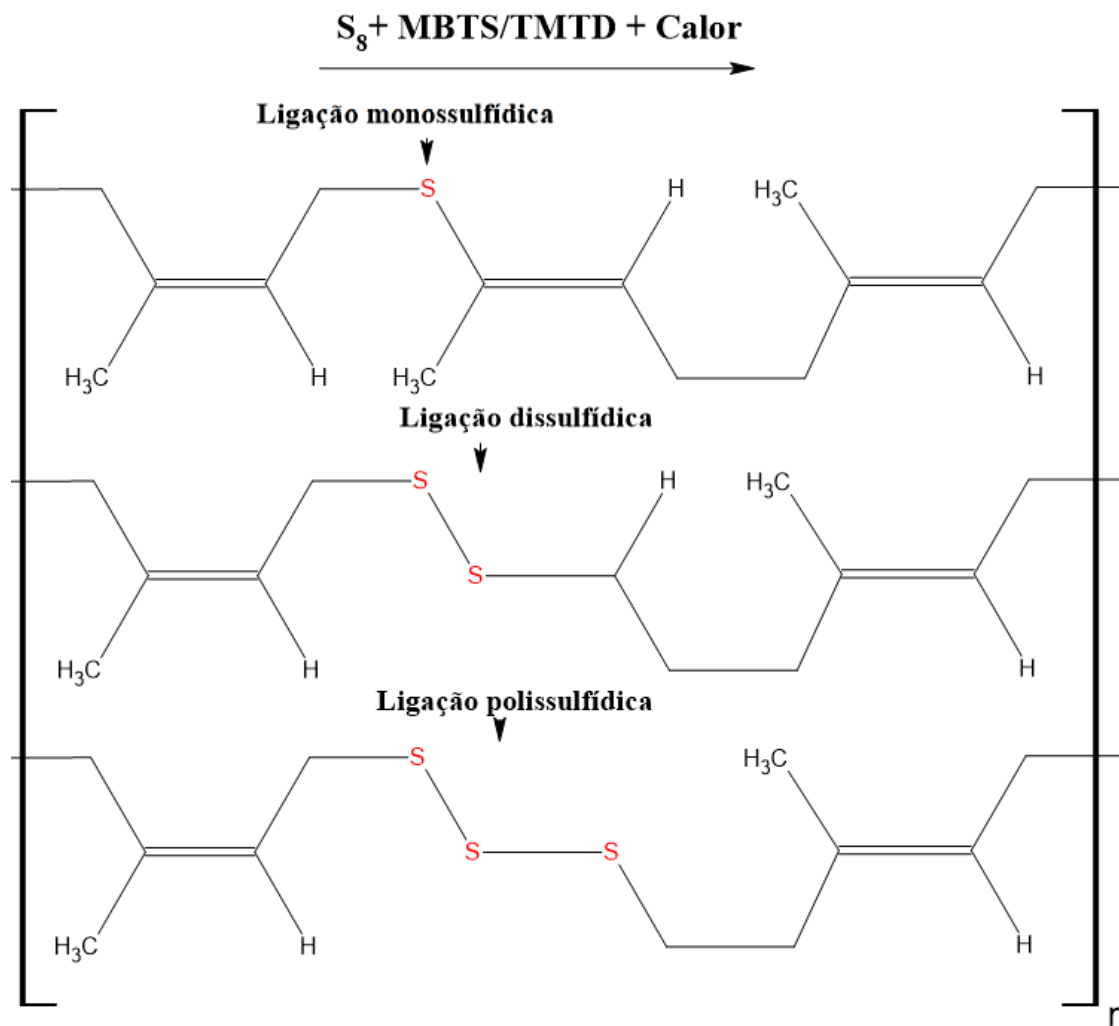
Figura 5. Representação esquemática da reação entre o poliisopreno e o enxofre (S_8), mostrando a formação de ligações cruzadas (cross-links).



Fonte: Autoria própria.

Durante a vulcanização, podem ser formados diferentes tipos de ligações cruzadas, classificadas como mono-, di- e polissulfídicas, cuja proporção influencia diretamente as propriedades finais do elastômero, como flexibilidade, resistência mecânica e estabilidade térmica. A Figura 6 ilustra os principais tipos de ligações cruzadas formadas em sistemas de vulcanização convencional, evidenciando suas diferenças estruturais. (Kim et al., 2020b; Sun et al., 2022).

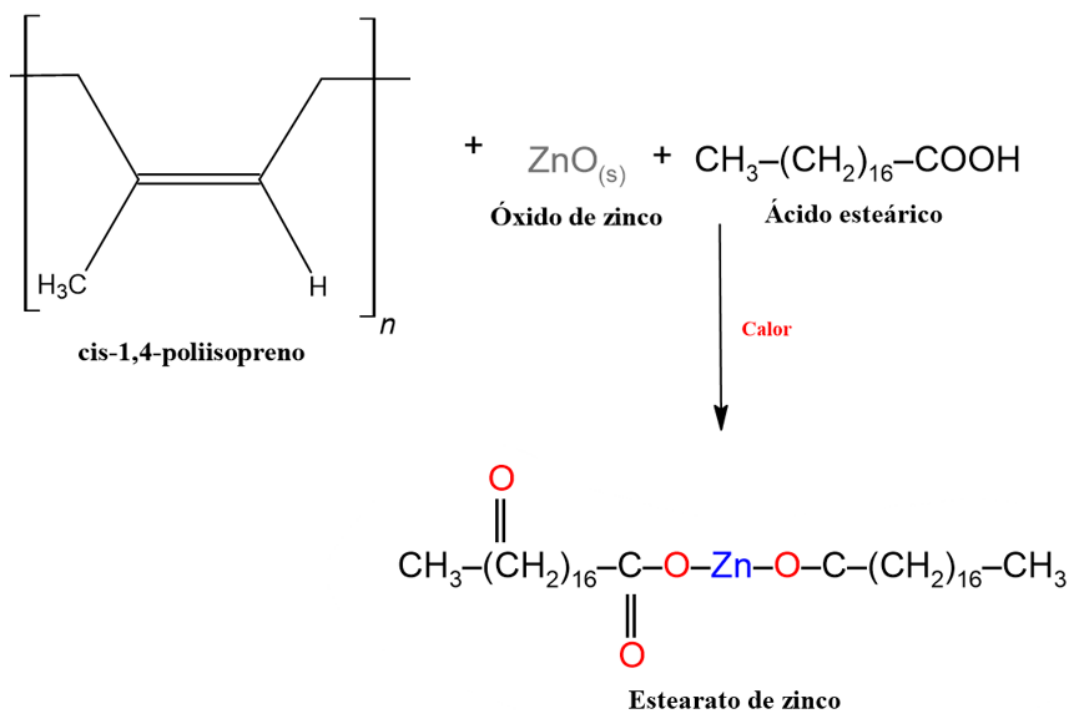
Figura 6. Ligações cruzadas mono-, di- e polissulfídicas formadas durante a vulcanização convencional.



Fonte: Autoria própria.

O papel do sistema ativador ZnO/ácido esteárico está associado à formação do estearato de zinco, resultante da reação entre esses dois componentes. A formação desse composto, representada na Figura 7, é essencial para o desempenho do sistema de cura, uma vez que promove maior dispersão dos aceleradores e aumenta a eficiência do processo de reticulação.

Figura 7. Formação do estearato de zinco a partir da reação entre e ácido esteárico.



Fonte: Autoria própria.

Como resultado dessas reações, estabelece-se uma rede tridimensional estável, responsável por conferir à borracha natural maior resistência mecânica, elasticidade, durabilidade e melhor adesão interfacial com cargas reforçastes incorporadas à matriz elastomérica.

3.2.5 – Sistemas de cura e controle reométrico

O comportamento da vulcanização depende do tipo de sistema de cura empregado. Nos sistemas convencionais (CV), semi-eficientes (SEV) e eficientes (EV), variam as proporções de enxofre e aceleradores, o que define o tipo de ligação formada e a estabilidade térmica do compósito (Choi; Kim, 2015; Hiranobe et al., 2021).

A reometria de torque é utilizada para monitorar a cinética da cura, fornecendo parâmetros como torque mínimo (ML), torque máximo (MH), tempo de scorch (ts₂) e tempo ótimo de cura (tc₉₀), essenciais para avaliar a eficiência e a reprodutibilidade do processo (Tapangnoi et al., 2022).

Esses dados são fundamentais para ajustar o equilíbrio entre densidade de reticulação, estabilidade térmica e propriedades mecânicas, garantindo desempenho adequado às aplicações pretendidas.

3.2.6 – Compatibilização e interações matrizes–carga

A compatibilização entre a BN e as cargas incorporadas é essencial para assegurar dispersão homogênea e transmissão eficiente de tensões. Essa interação pode ser promovida pelo uso de agentes acoplantes, como silanos e titanatos, ou por modificação superficial das cargas, que introduz grupos funcionais ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{O}$) capazes de interagir com as cadeias apolares de poliisopreno (Intapun et al., 2021; Afolabi; Ndou, 2024).

Essas estratégias aumentam a aderência interfacial, a estabilidade dimensional e o desempenho mecânico dos compósitos, especialmente em sistemas com resíduos carbonáceos ou biochars, cuja superfície porosa e química residual favorecem a formação de interações físico-químicas estáveis.

3.2.7 – Desempenho e sustentabilidade

A incorporação de cargas funcionais de origem residual, como o carvão ativado exaurido, representa uma alternativa sustentável ao uso de cargas petroquímicas tradicionais. Esses materiais, ricos em grupos oxigenados e com elevada área superficial, contribuem para o reforço estrutural e térmico da BN, reduzindo custos e impactos ambientais (Naebpetch et al., 2024; Karunanayake et al., 2025b).

Essa abordagem está alinhada aos princípios da economia circular, permitindo o aproveitamento de resíduos sólidos e a formulação de compósitos de alto desempenho e baixo impacto ambiental, como proposto nesta pesquisa.

3.3 – Compósitos de Borracha com Cargas de Resíduos

3.3.1 – Cargas minerais e convencionais: negro de fumo, sílica, caulim

As cargas minerais e convencionais desempenham papel essencial na formulação de compósitos elastoméricos, atuando não apenas como agentes de reforço mecânico, mas também como modificadores de propriedades térmicas, elétricas e reológicas. Entre as cargas mais empregadas na indústria da borracha destacam-se o NC, a sílica precipitada e o caulim, que, embora amplamente utilizados, apresentam distintas características morfológicas, químicas e funcionais, impactando diretamente o desempenho dos compósitos (Kim et al., 2022; Sanjuan-Navarro; Moliner-Martínez; Campíns-Falcó, 2021).

O NC é a principal carga reforçante utilizada em produtos de borracha, obtido por meio da combustão incompleta de hidrocarbonetos pesados. Apresenta elevada área superficial específica, estrutura agregada altamente ramificada e excelente capacidade de dispersão na matriz elastomérica. Essas características favorecem a formação de uma rede tridimensional de interações com as cadeias de poliisopreno, promovendo aumento significativo na resistência à tração, módulo elástico e resistência à abrasão dos compósitos. Além disso, influencia a densidade de ligações cruzadas e pode atuar como modificador térmico e elétrico, sendo amplamente utilizado em formulações técnicas e automotivas (Robertson; Hardman, 2021a).

A sílica precipitada, por sua vez, é uma carga de natureza hidrofílica, cuja estrutura menos ramificada em comparação ao NC requer o uso de agentes compatibilizantes, como silanos organofuncionais, para alcançar bom desempenho em matrizes apolares, como a BN. Quando corretamente compatibilizada, a sílica proporciona excelente reforço mecânico, além de contribuir para a redução da histerese e melhoria da eficiência energética, especialmente em compostos utilizados na indústria pneumática. Pesquisas recentes demonstram que a sílica pirogênica tratada por hidratação pode apresentar desempenho superior em propriedades como resistência ao desgaste, estabilidade dinâmica e menor resistência ao rolamento, sendo uma alternativa promissora para pneus de alto desempenho (Chu et al., 2025).

O caulim, uma argila alumino-silicada de estrutura lamelar, é considerado uma carga semirreforçante, sendo empregado principalmente para modulação de propriedades como dureza, viscosidade e resistência ao rasgo. Apesar de sua menor capacidade de reforço em comparação ao NC e à sílica, o caulim apresenta vantagens como baixo custo, fácil dispersão e redução da densidade do compósito final. Estudos, mostram que o tratamento do caulim com silanos ou aceleradores específicos melhora sua compatibilidade com a matriz polimérica, aumentando a densidade de reticulação e a elongação na ruptura, além de favorecer propriedades de barreira e a durabilidade dos compósitos (Ansarifar, 2022; Feriancová et al., 2022).

A escolha entre essas cargas convencionais deve considerar critérios técnicos e econômicos, tais como a área superficial específica, a polaridade, a reatividade superficial e o custo de obtenção e a cor do produto. Ainda que desempenhem funções relevantes no desempenho dos compósitos, o elevado consumo energético e o impacto ambiental associado à produção do NC e da sílica precipitada têm motivado a busca por alternativas sustentáveis. Nesse contexto, o uso de cargas derivadas de resíduos sólidos surge como uma estratégia promissora, com potencial de substituição parcial das cargas tradicionais, promovendo desempenho técnico comparável e ganhos ambientais significativos.

3.3.2 – Resíduos orgânicos como carga: potencial de reforço e sustentabilidade

A utilização de cargas obtidas a partir de resíduos orgânicos tem se consolidado como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de compósitos elastoméricos sustentáveis. Diferentemente das cargas convencionais, como o NC e a sílica, que demandam elevados insumos energéticos e apresentam impactos ambientais significativos em sua produção, os resíduos lignocelulósicos e carbonáceos derivados de processos agrícolas, industriais e urbanos oferecem vantagens ambientais, econômicas e funcionais. Entre os principais resíduos investigados na literatura destacam-se a casca de arroz, a casca de coco, o bagaço de cana-de-açúcar, a borra de café, o caroço de açaí e biochars produzidos por pirólise lenta de biomassa (Greenough; Dumont; Prasher, 2021; Karunanayake et al., 2025b).

Estudos demonstram que, após tratamento físico (secagem, moagem e peneiramento) e, em alguns casos, químico (ativação ou funcionalização), essas cargas orgânicas podem ser incorporadas com sucesso à BN, promovendo melhorias em propriedades como dureza, resistência à tração, módulo elástico e absorção de energia. O reforço promovido por essas cargas está diretamente relacionado à sua estrutura morfológica, área superficial, composição elementar e à presença de grupos funcionais capazes de interagir com a matriz elastomérica (Bardha; Prasher; Dumont, 2024; Raju et al., 2021).

A casca de arroz, por exemplo, constitui uma biomassa rica em sílica natural e lignina, capaz de conferir rigidez e estabilidade térmica aos compósitos. Quando submetida à pirólise controlada, origina um biochar com elevada porosidade e grupos funcionais superficiais que favorecem a interação carga–matriz, reduzindo a histerese e promovendo maior eficiência energética em aplicações dinâmicas (Bardha; Prasher; Dumont, 2024). A borra de café carbonizada, por ser abundante e de baixo custo, apresenta elevada proporção de carbono fixo e alta porosidade superficial, configurando-se como um bioenchimento promissor para a substituição parcial do NC. De forma semelhante, o biochar derivado da casca de pistache, com elevado teor de carbono (>80%) e baixo teor de cinzas (<5%), permite substituir até 40% do NC em compósitos de BN, mantendo ou até melhorando propriedades mecânicas essenciais, como resistência à tração, alongamento e tenacidade (Peterson; Chisholm, 2024) além de contribuir para a redução da densidade do compósito (Raju et al., 2021). Mais recentemente, resíduos provenientes da produção de filtros de chá foram convertidos em cinzas e aplicados como cargas funcionais em BN. O estudo de Lubura Stošić et al., (2025) demonstrou que as cinzas de diferentes tipos de chá (verde, hibisco e erva-cidreira), em baixos teores de até 5 phr, mantêm a efetividade da vulcanização e a densidade de entrelaçamento da rede, ainda que ocasionem reduções discretas em

resistência à tração e alongamento na ruptura, sugerindo sua aplicabilidade em formulações elastoméricas sustentáveis.

Além do desempenho técnico, o uso dessas cargas residuais promove a valorização de subprodutos e resíduos urbanos, integrando-se aos princípios da economia circular. A inserção de resíduos lignocelulósicos em formulações elastoméricas reduz a dependência de insumos petroquímicos, contribui para o gerenciamento sustentável de resíduos sólidos e potencializa o uso racional de recursos renováveis (Karunanayake et al., 2025b; Xu et al., 2025). Essa abordagem também abre caminho para o desenvolvimento de novos arranjos produtivos locais baseados na coleta, transformação e aplicação tecnológica de resíduos regionais, com impactos positivos na geração de renda e inovação sustentável. Cabe destacar que a compatibilidade entre a carga residual e a matriz polimérica pode ser ampliada por meio de tratamentos de superfície ou adição de agentes compatibilizantes, como silanos e peróxidos. Esses procedimentos visam otimizar a dispersão da carga, promover maior adesão interfacial e evitar a formação de aglomerados que comprometam a homogeneidade do material (Inphonlek et al., 2025a).

Dessa forma, a incorporação de resíduos orgânicos como cargas funcionais em compósitos de BN revela-se uma estratégia eficiente não apenas do ponto de vista técnico, mas também ambiental e socioeconômico. Tal prática responde às demandas da indústria por soluções mais verdes e fortalece o compromisso da ciência de materiais com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 12, sobre consumo responsável, e o ODS 9, sobre inovação em processos produtivos.

3.3.3 – Resíduos carbonáceos como cargas funcionais: biochars, cinzas e carvão ativado residual em compósitos elastoméricos

A substituição parcial ou total do NC por resíduos carbonáceos tem se consolidado como uma estratégia eficaz para a produção de compósitos elastoméricos mais sustentáveis. Alinhada aos princípios da economia circular, essa abordagem valoriza subprodutos agroindustriais e urbanos, além de reduzir a dependência de insumos petroquímicos. Entre os resíduos mais promissores estão os biochars, as cinzas agroindustriais e o CA residual, todos caracterizados por elevada estabilidade térmica, composição predominantemente carbonosa, superfície funcionalizada e estrutura porosa (Karunanayake et al., 2025b; Lotfy; Basta; Shafik, 2025a).

O biochar, produto da pirólise controlada de biomassas lignocelulósicas, como borra de café, palha de aveia, casca de pistache, bagaço de cana-de-açúcar e caroço de açaí, apresenta elevada área superficial (acima de 300 m²/g) e porosidade significativa (entre 0,5 e 0,8 cm³/g), que favorecem a dispersão das partículas na matriz elastomérica e o aprisionamento físico de cadeias

poliméricas, resultando no aumento do módulo de Young (ou módulo de elasticidade) e na rigidez do compósito. Estudos indicam que o biochar pode substituir parcialmente o NC em compósitos de BN, promovendo melhorias na resistência à tração, estabilidade térmica e tenacidade, com boa dispersão na matriz e elevada concentração de carbono. No entanto, algumas limitações ainda são observadas, como o aumento do tempo de vulcanização e a menor resistência ao envelhecimento termo-oxidativo, dependendo da fonte da biomassa e das condições de produção (Karunanayake et al., 2025b; Miedzianowska-Masłowska et al., 2024; Peterson; Chisholm, 2024; Raju et al., 2021).

Além disso, a presença de heteroátomos como oxigênio, nitrogênio e fósforo confere ao biochar uma superfície rica em grupos funcionais, como carboxilas, hidroxilas e fenóis, capazes de interagir com a matriz polimérica por meio de forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio e até interações covalentes secundárias (Lotfy; Basta; Shafik, 2025a). Um exemplo adicional é o biochar obtido da casca de mangostão, cujo emprego em compósitos de borracha de estireno-butadieno (SBR) resultou em ganhos expressivos de desempenho: acréscimos de até 75 % na resistência à tração e ao rasgo, além de aumentos significativos na dureza e nas propriedades dielétricas, evidenciando o potencial de resíduos agroindustriais como reforços sustentáveis de alto valor agregado (Nuilek et al., 2025).

Para potencializar essas interações e a compatibilidade com a matriz de BN, diversas estratégias de funcionalização química têm sido empregadas, como o tratamento ácido (HCl, H₃PO₄), básico (NaOH) ou silanizante. Tais tratamentos promovem a inserção ou ativação de grupos reativos na superfície carbonácea, elevando a densidade de ligações cruzadas e o desempenho reológico dos compósitos. Resultados experimentais demonstram que biochars funcionalizados podem aumentar significativamente o torque durante a cura, indicando melhor interação e homogeneidade da rede de reticulação (Gêça et al., 2023).

As cinzas agroindustriais, derivadas da combustão controlada de resíduos como casca de arroz e bagaço de cana, também têm sido utilizadas como cargas reforçantes em formulações elastoméricas. Embora apresentem menor interação química com a matriz polimérica em comparação aos biochars, essas cinzas são ricas em sílica, alumina e óxidos metálicos, o que lhes confere capacidade de reforço moderada. Tratamentos prévios de purificação e neutralização da alcalinidade têm se mostrado eficazes para melhorar sua compatibilidade com a borracha, proporcionando ganhos em rigidez, estabilidade térmica e redução de custos de formulação (Huabcharoen et al., 2017).

O CA residual, proveniente de filtros domésticos ou industriais saturados, preserva uma estrutura microporosa estável, superfície funcionalizada e elevada área superficial, mesmo após o

uso em processos de adsorção. Essas características tornam o CA residual um candidato promissor para a substituição parcial do NC em compósitos elastoméricos. Estudos recentes demonstram que formulações contendo até 50 % de substituição do NC por CA residual mantêm aproximadamente 85 % da resistência à tração e 90 % da dureza Shore A da formulação padrão, sem comprometer significativamente o desempenho mecânico, evidenciando sua viabilidade como carga funcional alternativa (Karunanayake et al., 2025).

A eficiência do reforço promovido por essas cargas carbonáceas depende de diversos fatores, como granulometria, tipo de resíduo precursor, condições de carbonização, grau de funcionalização superficial e qualidade da dispersão na matriz. Estratégias de compatibilização e o uso de aditivos podem potencializar essas interações, resultando em compósitos com maior módulo elástico, maior resistência à tração e melhor desempenho térmico. Além disso, a combinação entre pirólise controlada e modificação química permite o ajuste simultâneo da porosidade e da reatividade superficial dos biochars, otimizando sua atuação como carga funcional e ampliando seu uso em diferentes aplicações industriais (Karunanayake et al., 2025a; Lotfy; Basta; Shafik, 2025b).

Além do impacto técnico, a incorporação desses resíduos em formulações elastoméricas representa uma ação concreta em direção à sustentabilidade. Tal prática reduz a geração de resíduos sólidos urbanos e industriais, diminuindo a pegada de carbono das formulações.

3.3.4 – Resíduos industriais como cargas alternativas: Grits, Dregs, cinzas e couro

A crescente geração de resíduos industriais sólidos representa um dos principais desafios ambientais da atualidade, especialmente em países em desenvolvimento, onde a destinação inadequada desses subprodutos pode resultar em contaminação do solo e da água, além da emissão de gases de efeito estufa. No contexto da indústria de materiais, a reutilização desses resíduos como cargas funcionais em compósitos de BN tem se mostrado uma alternativa promissora, tanto sob o ponto de vista técnico quanto ambiental, ao possibilitar a substituição parcial de cargas petroquímicas e a redução dos impactos associados à produção de artefatos elastoméricos (Bittencourt et al., 2020).

Entre os resíduos com maior potencial de reaproveitamento destacam-se os Grits e Dregs, subprodutos da indústria de celulose e papel, as cinzas volantes oriundas da queima de carvão mineral e as raspas de couro curtido descartadas pela indústria calçadista. Os Grits e Dregs, são gerados durante o processo de recuperação química do licor negro na indústria de celulose e são compostos majoritariamente por hidróxidos e carbonatos alcalinos. Após etapas de lavagem,

secagem e neutralização, esses resíduos demonstram eficácia como cargas semirreforçantes, contribuindo para o aumento da resistência à abrasão, da estabilidade dimensional e da estabilidade térmica dos compósitos (Bacarin et al., 2020; Bittencourt et al., 2020). Quando submetidos a tratamentos adequados, esses materiais passam a apresentar características químicas e morfológicas favoráveis à sua aplicação como cargas semirreforçantes ou reforçantes em matrizes de BN vulcanizada.

No caso dos Dregs, observou-se melhorias significativas nas propriedades mecânicas, como aumento da resistência à abrasão e da tensão e deformação em compósitos com até 20 phr de carga, além de contribuir para a viabilidade econômica e ambiental ao reaproveitar resíduos industriais de difícil destinação (Bittencourt et al., 2020; Patsidis; Souliotis, 2023)

As cinzas volantes, amplamente disponíveis no setor energético, apresentam composição rica em óxidos metálicos, como cálcio, sílica e alumina, que podem atuar como co-ativadores nos sistemas de vulcanização. Estudos demonstram que sua incorporação em teores controlados pode melhorar a eficiência de cura, reduzir o tempo de vulcanização e contribuir para propriedades mecânicas, como dureza e resistência ao rasgo, sem comprometer significativamente a processabilidade dos compósitos (Naebpetch et al., 2024).

As raspas de couro curtido, frequentemente descartadas pela indústria calçadista, possuem composição rica em colágeno e íons metálicos complexados. Após moagem e tratamento alcalino, adquirem morfologia fibrosa e superfície funcionalizada, o que favorece sua interação com a matriz elastomérica. Resultados experimentais indicam que a adição de raspas de couro curtido em concentrações de até 10% pode elevar a resistência à tração em cerca de 92,9% em relação à BN pura, além de melhorar a estabilidade térmica, com a degradação ocorrendo em uma faixa de temperatura mais ampla e com menor taxa de perda de massa. Apesar disso, concentrações superiores a 10% podem reduzir a elasticidade do compósito, comprometendo sua flexibilidade (Barrera Torres et al., 2025).

Além dos resíduos inorgânicos, formulações que combinam esses materiais com resíduos poliméricos reciclados, como poliuretano (PU) ou polietileno (PE), têm demonstrado resultados promissores. Por exemplo, compósitos de BN/SBR com PU micronizado apresentaram aumento na densidade de reticulação e melhoria na resistência à abrasão, sem prejuízo à processabilidade (De Carvalho et al., 2024). De forma semelhante, formulações contendo resíduos de PE e PU, combinados com sílica e hidróxido de alumínio, mostraram reforço mecânico sinérgico, desempenho dinâmico superior e menor inflamabilidade (Tilokavichai et al., 2024). Essas combinações ampliam o campo de aplicação dos compósitos, mantendo desempenho técnico comparável aos sistemas convencionais e contribuindo para a redução da pegada ecológica.

Para viabilizar a adoção industrial dessas soluções, é essencial o desenvolvimento de protocolos padronizados de caracterização e tratamento dos resíduos, considerando aspectos como granulometria, pH, composição elementar, estabilidade térmica e compatibilidade com a BN. Esses parâmetros são fundamentais para garantir reprodutibilidade, segurança e desempenho consistente dos compósitos.

3.3.5 – Interações matriz–carga em compósitos de borracha natural com resíduos

O desempenho de compósitos elastoméricos formulados com cargas derivadas de resíduos sólidos está diretamente relacionado à eficiência das interações interfaciais estabelecidas entre a matriz polimérica e as partículas de reforço. Essas interações são fundamentais para a transferência eficaz de tensões, a dissipação de energia sob deformações cíclicas, bem como para a estabilidade térmica e a durabilidade mecânica dos materiais (Inphonlek et al., 2025a).

A adesão entre a matriz de borracha e as fibras naturais depende de fatores como compatibilidade química, energia superficial relativa e presença de grupos funcionais nas fibras. Esses fatores podem ser otimizados por meio de tratamentos físicos ou químicos, como o tratamento alcalino, silano ou permanganato, que reduzem a hidrofobicidade das fibras e melhoram a interação interfacial, resultando em compósitos com propriedades mecânicas e térmicas aprimoradas (Roy et al., 2021).

Resíduos lignocelulósicos, como fibras de bagaço de cana-de-açúcar, palha de aveia e resíduos de abacaxi, têm demonstrado elevado potencial de reforço após modificação superficial com agentes silanizantes ou ácidos graxos. Essas modificações reduzem a polaridade das fibras, favorecendo interações físicas e químicas com a matriz apolar da BN. Como resultado, observa-se melhor dispersão das partículas e uma interface mais coesa, refletindo-se em ganhos nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, dureza Shore A e resistência ao rasgo (Castaño-Rivera et al., 2025).

A granulometria das cargas influencia a área de contato disponível entre a fase dispersa e a matriz polimérica, podendo afetar a eficiência das interações físicas estabelecidas no compósito. De modo geral, partículas de menor tamanho tendem a favorecer maior homogeneidade do sistema e melhor distribuição da carga na matriz, conforme discutido na literatura. No entanto, os efeitos específicos da granulometria sobre propriedades dinâmicas e mecânicas dependem do tipo de carga, do método de processamento e das técnicas de caracterização empregadas, não tendo sido avaliados diretamente no presente estudo (Peterson, 2022a)

Além das interações físicas, cargas quimicamente funcionalizadas podem estabelecer ligações de hidrogênio, interações de Van der Waals e ligações covalentes secundárias com a matriz. Isso é observado, por exemplo, em biochars contendo grupos carboxilas, hidroxilas e aminas, que ampliam o torque máximo em ensaios reométricos, indicando uma reticulação mais eficiente. Fenômeno semelhante é descrito em compósitos de BN com hidrochar proveniente de serragem, os quais apresentam estabilização antioxidante e desempenho mecânico satisfatório (Miedzianowska-Masłowska; Masłowski; Strzelec, 2025a).

No que se refere à proteção térmica, resíduos como cinzas volantes e carvões ativados oriundos de biomassa apresentam elevada estabilidade térmica e atuam como barreiras à difusão de oxigênio e calor. Ensaio termogravimétrico indicam que a incorporação desses materiais pode retardar a degradação oxidativa da BN, elevando o pico de degradação térmica, como observado em formulações com hidrochar de serragem utilizado como co-filler junto ao NC (Choo; Won; Burns, 2021; Miedzianowska-Masłowska; Masłowski; Strzelec, 2025a)

Por fim, a formulação adequada do compósito, incluindo o sistema de cura, o método de mistura e a proporção de carga, permite alcançar desempenho técnico comparável ou superior ao de compósitos convencionais, com vantagens ambientais e econômicas. Estudos indicam que a substituição de até 40–50% do NC por biochar e cálcio revestido com proteína de soja mantém a resistência à tração e o alongamento, ao mesmo tempo em que reduz a pegada ecológica (Peterson, 2022a).

4 – Metodologia Experimental

4.1 – Materiais

Neste estudo, empregou-se como matriz polimérica a BN do tipo crepe claro brasileiro, constituída majoritariamente por cis-1,4-poliisopreno. Esse material apresenta elevada elasticidade, resistência à abrasão e boa processabilidade, características que justificam sua ampla utilização em formulações técnicas de elastômeros e em pesquisas acadêmicas voltadas à substituição de cargas convencionais (Nasruddin et al., 2023). A escolha do crepe claro nacional deve-se à sua elevada pureza, ampla disponibilidade no mercado e compatibilidade com diferentes tipos de cargas reforçantes.

Como carga de referência, utilizou-se o negro de carbono (NC, tipo N330), classificado como reforçante médio e amplamente empregado em formulações elastoméricas devido à sua capacidade de aumentar a resistência mecânica, dureza e estabilidade térmica. Em substituição parcial ao NF, foi empregado o CA residual proveniente de filtros de água saturados, coletados no

laboratório didático da UNESP de Rosana, representando um resíduo pós-consumo de relevância ambiental.

O sistema de vulcanização adotado foi o convencional, composto por enxofre (S), óxido de zinco (ZnO), ácido esteárico e aceleradores orgânicos. Foram utilizados o dissulfeto de benzotiazol-2,2' (MBTS) e o dissulfeto de tetrametiltiuram (TMTD), todos fornecidos pela Vetec Química Fina Ltda. (Rio de Janeiro, Brasil). A associação entre ZnO e ácido esteárico é amplamente descrita na literatura, uma vez que a formação do complexo de zinco estearato favorece a catálise da vulcanização sulfurada, acelerando a formação de ligações cruzadas e a estabilização da rede tridimensional (Junkong et al., 2020; Nasruddin et al., 2023).

Como aditivo plastificante, utilizou-se o polietilenoglicol (PEG 4000), cuja função é facilitar a dispersão dos componentes da formulação, melhorar a fluidez da mistura e favorecer a incorporação de cargas particuladas, como o NC ou o carvão ativado. Ensaios prévios com sistemas reforçados por sílica demonstram que o PEG auxilia a compatibilização entre partículas hidrofílicas e a matriz apolar da borracha (Sayfo; Pölöskei; Mészáros, 2024).

As diferentes composições foram elaboradas a partir da variação dos teores de NC e CA, mantendo-se constantes os demais componentes do sistema de cura, plastificante e aditivos de processamento. A Tabela 1 apresenta as formulações utilizadas, evidenciando a proporção de cada constituinte e a padronização do sistema de vulcanização adotado.

Tabela 1. Formulações dos compósitos de borracha natural contendo diferentes teores de negro de carbono (NC) e carvão ativado residual (CA) com sistema de cura padronizado

Componente	Dosagem (phr)
BN (crepe claro)	100
Óxido de zinco (ZnO)	5
Ácido esteárico	2
PEG-4000 (plastificante)	2
Enxofre (S)	1,5
MBTS	0,7
TMTD	0,4
Carga	
NC N330	5 / 10 / 15 / 20
CA (substituição)	5 / 10 / 15 / 20
CA-HCl + Chartwell	10

Fonte: Autoria própria.

4.2 – Métodos de Preparação dos Compósitos

A preparação dos compósitos de BN contendo cargas particuladas foi realizada em calandra de dois rolos (*open two-roll mill*), operando a 60 °C e razão de fricção de 1:1,25, em conformidade com a norma ASTM D3182, amplamente utilizada na indústria de elastômeros por possibilitar a dispersão eficiente dos aditivos e o controle preciso da viscosidade da mistura (Mostoni et al., 2019).

O CA residual, obtido de filtros domésticos saturados, passou por trituração mecânica (moinho de facas) e peneiramento para padronização granulométrica, sendo fracionado em teores de 5, 10, 15 e 20 phr. Adicionalmente, foi preparada uma formulação contendo 10 phr de CA tratado com solução de HCl 1 mol·L⁻¹, seguido de lavagem com água deionizada até neutralização e secagem a 80°C. Esta fração recebeu ainda modificação superficial com 2 % do compatibilizante Chartwell®, empregado como agente de acoplamento para favorecer a interação entre a carga carbonácea e a matriz polimérica (Georgin et al., 2023; Koriem et al., 2023; Nasruddin et al., 2023).

A sequência de mistura foi criteriosamente estabelecida. Inicialmente, a BN foi mastigada por cinco minutos, etapa fundamental para redução da viscosidade e homogeneização inicial da matriz. Em seguida, adicionaram-se o óxido de zinco (ZnO), o ácido esteárico e o PEG 4000, com mistura contínua por três minutos, favorecendo a formação de complexos Zn–ácido graxo que atuam como ativadores da vulcanização (Mostoni et al., 2019).

Na etapa seguinte, as cargas particuladas (NC N330, CA residual ou CA HCl + Chartwell) foram incorporadas, mantendo-se o processamento por cinco minutos adicionais para assegurar sua dispersão homogênea. Posteriormente, os aceleradores MBTS e TMTD foram adicionados e misturados por dois minutos, seguidos do enxofre (S), incorporado durante três minutos, totalizando aproximadamente 15 minutos de mistura. As composições foram então acondicionadas em papel manteiga e estabilizadas por 24 h em ambiente seco, ventilado e protegido da luz (Junkong et al., 2020; Kim; Nam; Kim, 2011; Mostoni et al., 2019)

A vulcanização foi realizada em prensa hidráulica a 150°C, sob pressão de 10 MPa. O tempo ótimo de cura (t_{90}) de cada formulação foi determinado por ensaio reométrico, conforme a norma ASTM D5289, assegurando a formação adequada da rede reticulada. Após a vulcanização, os corpos de prova foram estabilizados por 48 h à temperatura ambiente, garantindo a consolidação das propriedades físico-químicas (Mostoni et al., 2019).

4.3 – Caracterização

A caracterização dos compósitos foi realizada por meio de um conjunto integrado de análises físico-químicas, mecânicas e morfológicas, com o objetivo de compreender os efeitos da incorporação de cargas alternativas na matriz de BN.

As metodologias foram selecionadas com base nas normas ASTM aplicáveis (D412, D2240, D792, D5289) e em literatura especializada sobre compósitos elastoméricos com cargas carbonáceas/ativadas, assegurando robustez na análise e comparabilidade com outros sistemas (Maciejewska; Sowińska; Grocholewicz, 2021; Yim; Kim, 2023).

No que se refere às análises mecânicas, foram conduzidos ensaios de tração uniaxial, dureza Shore A e determinação da massa específica, com base nas normas ASTM D412, D2240 e D792, respectivamente. Essas propriedades foram avaliadas de forma comparativa entre as formulações com diferentes proporções de NC, CA residual e CA residual tratado, permitindo inferir os efeitos das cargas na resistência à deformação, rigidez e densidade aparente dos compósitos. A correlação entre os dados mecânicos e morfológicos é fundamental para compreender os mecanismos de reforço e dispersão das cargas, conforme apontado por Lubura et al., (2022) Peterson, (2022a) Peterson; Chisholm, (2024a).

A caracterização morfológica foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). As imagens obtidas permitiram observar a interface matriz–carga, verificar a dispersão das partículas e identificar possíveis defeitos estruturais, como aglomerados ou regiões de fraca adesão. A interpretação das micrografias foi apoiada por estudos, sobre a melhoria da dispersão de cargas carbonáceas em compósitos elastoméricos. (Alves dos Santos, 2023; De Carvalho et al., 2024; Mostafa et al., 2009; Rattanasom; Saowapark; Deeprasertkul, 2007). fornecendo subsídios para o entendimento dos efeitos estruturais induzidos pelos diferentes tipos de enchimento (De Carvalho et al., 2024; Peterson; Chisholm, 2024).

4.3.1 – Análise Elementar por Fluorescência de Raios X (XRF)

As análises elementares foram conduzidas por fluorescência de raios X (XRF). O espectrômetro utilizado foi o modelo EDX 720 (Shimadzu), operando em modo de excitação direta com tubo de 50 kV e corrente de 1 mA, permitindo a detecção de elementos desde leves até pesados, com excelente resolução instrumental. As amostras foram previamente secas em estufa a 105°C por 24 h, até atingir massa constante, condição fundamental para eliminar variações de umidade que poderiam afetar a quantificação. Posteriormente, os materiais foram pulverizados em

almofariz, homogeneizados e prensados em pastilhas de 13 mm de diâmetro. Esse procedimento segue a prática consolidada da técnica de pó prensado, que, segundo (Takahashi, 2015), utiliza matrizes cilíndricas ou planas para assegurar densidade uniforme das pastilhas e, conseqüentemente, maior repetibilidade das medições. As leituras foram realizadas com tempo de coleta de 100 s por amostra, parâmetro que representa equilíbrio entre eficiência espectral e relação sinal/ruído, sendo prática recomendada em protocolos técnicos de campo (Byers; McHenry; Grundl, 2019).

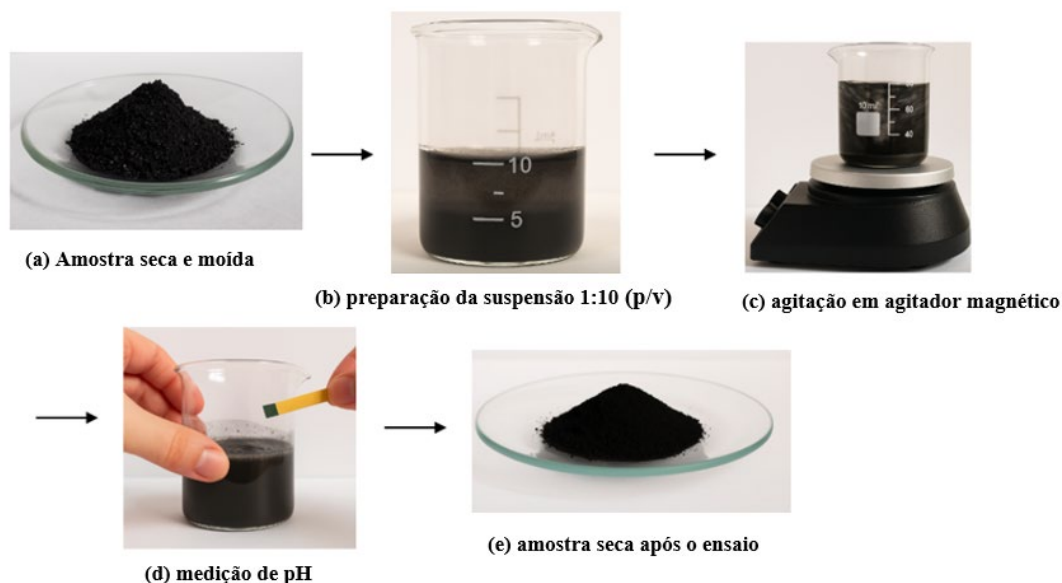
4.3.2 – Determinação de pH dos Resíduos

A determinação do pH do CA residual foi conduzida para avaliar o caráter ácido, neutro ou básico das superfícies, parâmetro relevante para prever interações químicas com a matriz de BN. A acidez superficial pode influenciar significativamente a adesão interfacial, além de afetar a estabilidade térmica e mecânica dos compósitos. O método adotado consistiu na preparação de uma suspensão na proporção 1:10 (peso/volume), obtida a partir da dispersão de 1,0 g da amostra previamente seca e moída em 10 mL de água destilada, conforme descrito por Singh et al., (2017) e de acordo com recomendações específicas para a caracterização de biochar.

A Figura 8 ilustra as principais etapas do procedimento experimental, desde a preparação da suspensão e agitação até a medição do pH com papel de tornassol e a amostra seca resultante.

A suspensão resultante foi submetida à agitação por 60 minutos, em temperatura ambiente, e posteriormente mantida em repouso por 30 minutos, de modo a favorecer a decantação parcial. Após esse período, o pH do sobrenadante foi determinado em triplicata, utilizando um pHmetro digital previamente calibrado com soluções-tampão de pH 4,00 e 7,00. Os valores médios obtidos foram considerados como referência para as análises comparativas subsequentes.

Figura 8. Etapas experimentais da determinação do pH do carvão ativado residual (CA).



Fonte: Foto da autora, aprimorada por IA.

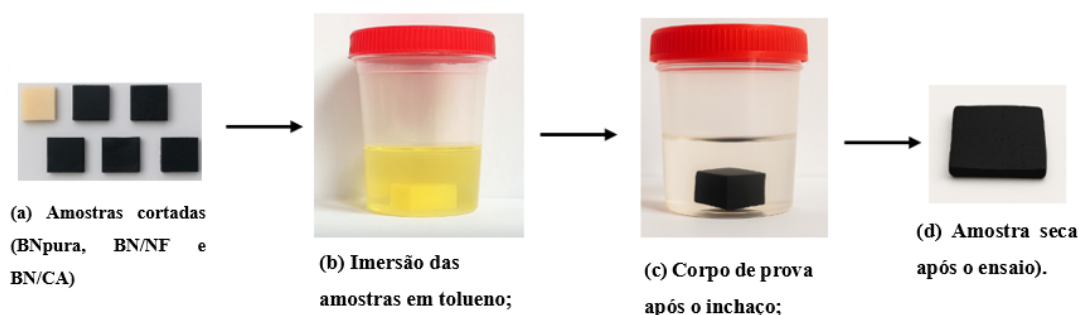
4.3.3 – Ensaio de Absorção de Tolueno e Estimativa da Densidade de Ligações Cruzadas

O ensaio de absorção de tolueno foi conduzido com o objetivo de estimar a densidade de ligações cruzadas (ν) nos compósitos de BN contendo cargas alternativas, com base na teoria termodinâmica de inchamento em solventes. Essa abordagem parte do princípio de que redes poliméricas reticuladas, ao entrarem em contato com solventes orgânicos como o tolueno, sofrem inchaço até atingirem um equilíbrio de absorção, sem se dissolverem. A partir desse comportamento, é possível aplicar o modelo de Flory–Rehner para o cálculo da densidade de reticulação da matriz elastomérica, considerando a fração volumétrica de borracha na rede inchada, o parâmetro de interação polímero-solvente e o volume molar do solvente utilizado (Hiranobe et al., 2021).

As amostras foram cortadas em corpos de prova retangulares, com massa média de 0,25 g, e submetidas à secagem em estufa a 60 °C por 24 h. Posteriormente, foram imersas em 40 mL de tolueno (99,5% p.a., Synth) em frascos transparente hermeticamente fechados, mantidos à temperatura ambiente (25 ± 1 °C) e protegidos da luz. O tempo de imersão adotado foi de 5 dias, valor compatível com o recomendado para alcançar o equilíbrio de inchaço em borrachas vulcanizadas segundo a norma ISO 1817, que estabelece a imersão em solventes apropriados até a estabilização da massa (Hiranobe, 2020a).

Estudos prévios indicam que o tolueno é um solvente efetivo para a BN, apresentando razões de inchaço típicas entre 3 e 7, em função da densidade de entrecruzamento (Pai et al., 2024a), sendo esse comportamento igualmente reportado em investigações sobre sistemas elastoméricos baseados em BN (Campos et al., 2022). Essas evidências confirmam a adequação do tempo e das condições experimentais empregadas neste estudo, conforme ilustrado na Figura 9, que apresenta as etapas do ensaio de absorção de tolueno.

Figura 9. Etapas do ensaio de absorção de tolueno para determinação da densidade de ligações cruzadas.



Fonte: Foto da autora, aprimorada por IA.

Após a imersão, os corpos de prova foram retirados, secos superficialmente com papel absorvente e pesados em balança analítica ($\pm 0,0001$ g). A absorção foi determinada a partir da variação de massa entre o estado seco e o estado inchado. Com base nesses dados, calculou-se a fração volumétrica da borracha na rede inchada (V_r), considerando as densidades do tolueno ($0,8669 \text{ g/cm}^3$) e da borracha vulcanizada (determinada experimentalmente), segundo os princípios estabelecidos por FLORY e REHNER (Hiranobe et al., 2021), e aplicados em metodologias contemporâneas para sistemas elastoméricos (Pai et al., 2024; Stelescu et al., 2022).

Esses estudos indicam que a determinação de V_r por meio da variação de massa e densidades é uma abordagem consolidada para avaliar o comportamento de inchaço e estimar a densidade de ligações cruzadas em compósitos de BN.

A densidade de ligações cruzadas (ν) foi então estimada por meio da equação de Flory–Rehner modificada, utilizando o parâmetro de interação polímero-solvente ($\chi = 0,393$ para o sistema BN/tolueno), conforme preconizado por (Hiranobe, 2020b; Kim et al., 2020b). Todas as análises foram realizadas em triplicata, assegurando a confiabilidade dos resultados obtidos.

4.3.5 – Ensaio de Tração (ASTM D412)

Os ensaios de tração foram conduzidos conforme a norma ASTM D412-16, método A, utilizando corpos de prova tipo C, moldados por compressão em prensa hidráulica a 150 °C por 10 min. Após o desmolde, as amostras foram acondicionadas por 24 h à temperatura ambiente (23 ± 2 °C) para estabilização das tensões internas, procedimento amplamente adotado para garantir reprodutibilidade dos resultados em compósitos elastoméricos (Dos Santos et al., 2014) .

As análises foram realizadas em máquina universal de ensaios equipada com célula de carga de 500 N e garras pneumáticas com pressão constante. A Figura 10 apresenta o equipamento utilizado, destacando a visão geral (Figura 10 a) e o detalhe das garras pneumáticas responsáveis pela fixação dos corpos de prova (Figura 10 b).

A velocidade de ensaio foi de 500 mm/min, e as curvas tensão–deformação de cada amostra foram registradas por software dedicado, possibilitando a determinação de propriedades como resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo elástico, parâmetros diretamente correlacionados às características de vulcanização e ao conteúdo de cargas (Kim et al., 2020a).

Figura 10. Máquina universal de ensaios Biopdi utilizada nos ensaios de tração (ASTM D412): (a) visão geral do equipamento; (b) detalhe das garras pneumáticas para fixação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

4.3.6 – Dureza Shore A (ASTM D2240)

A dureza dos compósitos elastoméricos foi determinada por meio do ensaio Shore A, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D2240-15. As amostras foram moldadas por compressão em placas com espessura mínima de 6 mm, conforme exigido pela norma, e mantidas em repouso por 24 horas à temperatura ambiente (23 ± 2 °C) antes da realização das medições (Luiz Kowalski, 2018).

Os ensaios foram realizados em durômetro Shore A analógico da marca Digimess, com base rígida e apoio em superfície nivelada, assegurando condições estáveis de leitura (ASTM International, 2015), conforme ilustrado na Figura 11, que apresenta o procedimento de medição da dureza em amostras de borracha vulcanizada.

Cada amostra foi submetida a cinco medições em diferentes pontos da superfície, distantes ao menos 12 mm das bordas e entre si, para evitar efeitos de borda e garantir a representatividade da leitura. O tempo de aplicação da carga foi padronizado em 5 segundos, e o valor médio foi adotado como resultado da amostra (Gutkoski; Schneider; Michels, 2024; Taliotto et al., 2022).

Figura 11. Medição da dureza Shore A em amostra de borracha natural vulcanizada.



Fonte: Foto da autora, aprimorada por IA.

4.3.7 – Determinação da Massa Específica (ASTM D792)

A determinação da massa específica dos compósitos elastoméricos foi realizada segundo a ASTM D792-20, método A, visando avaliar a densidade aparente das formulações obtidas. Esta propriedade é influenciada pelo tipo e quantidade de carga incorporada, pelo grau de dispersão das partículas e pela presença de poros ou heterogeneidades na matriz vulcanizada, sendo um parâmetro relevante tanto para controle de qualidade quanto para aplicações técnicas em que o peso específico do material desempenha papel funcional (El-Khatib et al., 2023; Hiranobe, 2020a; Mago; Negi; Fatima, 2024).

O método adotado baseia-se no princípio do empuxo hidrostático, utilizando balança analítica equipada com dispositivo de pesagem hidrostática e precisão de quatro casas decimais, conforme ilustrado na Figura 12. Cada amostra, com massa média de 0,500 g, foi cuidadosamente moldada e lixada para obter superfície regular e livre de bolhas ou rebarbas. As amostras foram pesadas inicialmente no ar (massa seca, m_{ar}) e, em seguida, submersas em etanol a 25 °C (massa imersa, m_{liq}), após completa eliminação de bolhas de ar por agitação leve (El-Khatib et al., 2023; Hiranobe, 2020a).

A massa específica aparente (g/cm^3) foi calculada com base na equação:

$$\rho = m_{ar} / (-m_{li} m_{ar} \cdot \rho_{liq})$$

Em que ρ_{liq} representa a densidade do líquido de imersão (etanol, 0,789 g/cm^3 a 25 °C). Todos os ensaios foram realizados em triplicata e os valores médios foram utilizados para posterior análise comparativa entre as formulações. A escolha do método hidrostático em etanol, em vez de água, deve-se à maior estabilidade de leitura e à menor tensão superficial do líquido, que favorece a precisão da pesagem para materiais com elevada elasticidade superficial, como os elastômeros vulcanizados (Hiranobe, 2020).

Figura 12. Equipamento utilizado para determinação da massa específica pelo método do empuxo hidrostático.



Fonte: Foto da autora, aprimorada por IA.

4.3.8 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização morfológica dos compósitos foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com o objetivo de avaliar a interface matriz–carga, a dispersão das partículas de enchimento e a ocorrência de defeitos estruturais, como aglomerados, vazios ou fraturas coesivas. Essa técnica fornece subsídios relevantes para correlacionar a microestrutura dos materiais ao seu desempenho mecânico e físico-químico (De Carvalho et al., 2024).

As análises foram conduzidas em um microscópio eletrônico de varredura (SEM) modelo FEI Quanta 250 FEG, analisando a área de secção transversal. As amostras foram fixadas em suportes e metalizadas com ouro, garantindo a condução elétrica e evitando o acúmulo de carga (Zhao et al., 2023).

4.3.9 – Ensaio Qualitativo de Dispersão em Meio Aquoso

Assim como demonstrado por LI et al. (2024), que evidenciaram a utilidade da dispersão em meio aquoso para avaliar a estabilidade coloidal de materiais carbonáceos, e por (Sanjuan-Navarro; Moliner-Martínez; Campíns-Falcó, 2021) que investigaram a estabilidade de dispersões de negro de carbono em diferentes meios aquosos, neste trabalho a dispersão em água foi

empregada como ensaio qualitativo para analisar o caráter hidrofílico ou hidrofóbico do CA residual.

O ensaio consistiu na adição de aproximadamente 5 phr de CA seco e moído em 20 mL de água deionizada, acondicionados em placa de Petri de vidro com 90 mm de diâmetro. As amostras permaneceram em repouso à temperatura ambiente ($23 \pm 2^\circ\text{C}$) por 5 minutos, sem qualquer agitação. Ao término do período, realizou-se a observação direta da superfície e do fundo da placa, registrando-se qualitativamente o comportamento do material, dispersão homogênea, formação de aglomerados, floculação ou sedimentação rápida, complementada por registro fotográfico (Figura 13).

Figura 13. Ensaio qualitativo de dispersão do carvão ativado residual em meio aquoso.



Fonte: Autoria própria.

5. – Resultado e Discussão

5.1.1 – Análise Elementar por XRF

A composição elementar do CA residual, utilizado como carga funcional nos compósitos elastoméricos, foi determinada por fluorescência de raios X (XRF) (Tabela 2).

Tabela 2. *Composição elementar do carvão ativado residual obtida por fluorescência de raios X (XRF).*

Elemento	Teor (% m/m)
Ca	0.376
Si	0.227
S	0.055
K	0.031
Fe	0.020
Ag	0.017
Zn	0.012
Cu	0.012
Br	0.004
Ti	0.004
C	99.242

Fonte: Autoria própria.

O teor de silício mensurado, pode indicar a presença de sílica amorfa ou cristalina, a qual atua como agente reforçante em compósitos de borracha. Isso contribui para o aumento da rigidez, resistência à abrasão e desempenho mecânico global, conforme discutido em revisões sobre o uso de sílica funcionalizada em compósitos industriais (Neethirajan et al., 2022; Reowdecha et al., 2021). Já a detecção de metais potencialmente tóxicos, como cobre, em níveis muito baixos, sugere risco ambiental reduzido.

A composição elementar do CA, marcada pelo predomínio de carbono e pela presença de elementos inorgânicos em baixa concentração, confirma seu potencial como insumo funcional em formulações elastoméricas sustentáveis. Esse resultado está alinhado à literatura, que destaca o aproveitamento de cargas derivadas de resíduos carbonáceos ou alternativos como estratégia para reduzir a dependência de materiais petroquímicos e avançar nos princípios da economia circular (Bogdahn et al., 2025; Peterson, 2022b). Enquanto o uso de NC proveniente da pirólise de pneus

apresenta limitações relacionadas ao teor de cinzas e à necessidade de tratamentos adicionais (Bogdahn et al., 2025), outras abordagens demonstram que biochars e cargas híbridas podem substituir parcialmente o NC em compósitos de BN, mantendo ou até melhorando propriedades mecânicas (Peterson, 2022b).

5.1.2 – pH das amostras e implicações na química de superfície

Os resultados da medição de pH indicaram caráter ligeiramente ácido para o CA residual (CA, $\text{pH} \approx 5,4$) e valores próximos à neutralidade para o CA tratado (CAT, $\text{pH} \approx 6,6$), sugerindo que o tratamento aplicado (acidificação seguida de lavagem) reduziu a densidade de grupos ácidos superficiais. Procedimentos desse tipo são amplamente empregados para remover cinzas e espécies metálicas e, ao mesmo tempo, ajustar propriedades químicas de superfície em carvões ativados. Estudos demonstram que tratamentos ácidos são eficazes na redução de cinzas e regeneração estrutural do material (Hwang et al., 2020), enquanto a lavagem subsequente com HCl contribui para neutralizar resíduos ácidos e estabilizar a química superficial (Olupot et al., 2024). A influência das impurezas minerais também é reconhecida, pois a presença de metais alcalinos e multivalentes altera diretamente a acidez e a carga superficial, sendo que a purificação com HCl reduz significativamente essas espécies e modifica a composição química dos carvões (Olupot et al., 2024).

Do ponto de vista da química de superfície, tratamentos térmicos ou químicos em carvões ativados modificam a distribuição de grupos oxigenados (carboxilas, lactonas, fenóis) e, por consequência, o caráter ácido-básico, a hidrofobicidade e a carga superficial, afetando diretamente a interação com a matriz polimérica. A literatura mostra que oxidações ácidas (por exemplo, HNO_3/HCl) tendem a aumentar a acidez e o teor de grupos O-, enquanto processos de desoxigenação térmica diminuem tais grupos e elevam a hidrofobicidade; tratamentos de regeneração também removem cinzas e metais, ajustando o equilíbrio entre grupos funcionais e a química de superfície (Hwang et al., 2020; Rahma et al., 2025).

Em termos aplicados, uma superfície menos ácida tende a reduzir a adsorção indesejada de curativos (aceleradores/sulfurantes) nas partículas de carga, mitigando efeitos de retardo na vulcanização e contribuindo para uma cinética de cura mais eficiente. Comportamento análogo é observado em cargas mais polares ou ácidas, como a sílica, nas quais a adsorção de aceleradores é reconhecidamente maior e prejudica a efetividade do sistema de cura (Sowińska-Baranowska; Maciejewska, 2021). Além disso, a química de superfície da carga influencia a dispersão e as interações com o polímero, de modo que superfícies menos ácidas (e relativamente mais hidrofóbicas) tendem a apresentar compatibilidade superior com matrizes elastoméricas apolares,

favorecendo mistura e vulcanização mais estáveis (Bokobza, 2018). Por fim, estudos com NC oxidado (maior teor de grupos oxigenados) mostram redução da cinética de cura e do torque máximo, reforçando que o aumento da acidez superficial pode ser desfavorável ao processo; por contraposição, a menor acidez observada no CAT é coerente com o desempenho de cura registrado em suas formulações (Mostoni et al., 2019).

Além do ajuste de acidez, a incorporação de cargas provenientes de resíduos, como o CA residual e outros biofillers, alinha-se à perspectiva de economia circular em compósitos elastoméricos, ao favorecer a valorização de fluxos residuais, reduzir a dependência de cargas petroquímicas e mitigar impactos ambientais. Evidências recentes mostram que biochar derivado de resíduos agroindustriais pode substituir parcialmente o NC em borrachas, preservando propriedades mecânicas e reduzindo custos e pegada ambiental (Lotfy; Basta; Shafik, 2025c). Estudos envolvendo o uso de BN com resíduos poliméricos micronizados reforçam a viabilidade técnica quando há controle de compatibilidade e formulação (De Carvalho et al., 2024). Em paralelo, a recuperação de NC via pirólise de pneus (rCB) constitui rota circular promissora, ainda que demande cuidados com cinzas e ativação para otimizar propriedades em borracha (Bogdahn et al., 2025). Revisões atuais em compósitos de borracha apontam que cargas sustentáveis ou bio-baseadas contribuem para desempenho competitivo com menor impacto ambiental, desde que o sistema de cura e a interface polímero–carga sejam adequadamente otimizados (Dadkhah; Messori, 2024).

5.1.3 – Comportamento em meio aquoso e afinidade superficial

O comportamento superficial do CA residual foi avaliado por meio de um teste visual de dispersão em água deionizada. Esse procedimento fornece indícios da afinidade das partículas por fases polares e pode funcionar como triagem preliminar de hidrofobicidade/hidrofilia, atributos governados pela química de superfície (grupos oxigenados, carga/zeta e energia interfacial) e que impactam diretamente a compatibilidade e a dispersão em matrizes elastoméricas. Estudos com partículas carbonáceas mostram que a tendência natural é a agregação e a rápida sedimentação em água quando não há funcionalização apropriada, refletindo baixa afinidade pela fase aquosa (Lee et al., 2022).

No ensaio realizado, o CA apresentou comportamento predominantemente hidrofóbico, com sedimentação rápida e ausência de dispersão homogênea, sinalizando baixa afinidade com meio polar. Esse resultado é coerente com a matriz majoritariamente carbonácea identificada nas análises físico-químicas, em especial a composição elementar revelada por XRF.

A literatura destaca que tratamentos químicos ou térmicos em carvões ativados modulam a presença de grupos oxigenados (carboxilas, lactonas, fenóis) e o caráter ácido-básico, com reflexos diretos sobre a hidrofobicidade e a estabilidade coloidal em água (Rehman; Park; Park, 2019; Shafeeyan et al., 2010). Em linhas gerais, tais modificações podem melhorar a molhabilidade e a estabilização coloidal, enquanto superfícies mais apolares, como observado no CA estudado, tendem a flocular e sedimentar rapidamente. A afinidade superficial é também um parâmetro crítico para o desempenho em elastômeros: melhores dispersão da carga e interações polímero-carga usualmente resultam em reforço mais eficiente e processamento mais estável (Bokobza, 2018).

5.1.4 – Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu avaliar a superfície do carvão ativado (CA) residual, da borracha natural (BN) pura e dos compósitos formulados com diferentes teores de carga, possibilitando compreender a influência da morfologia dos constituintes na interação matriz-carga e no desempenho estrutural dos materiais.

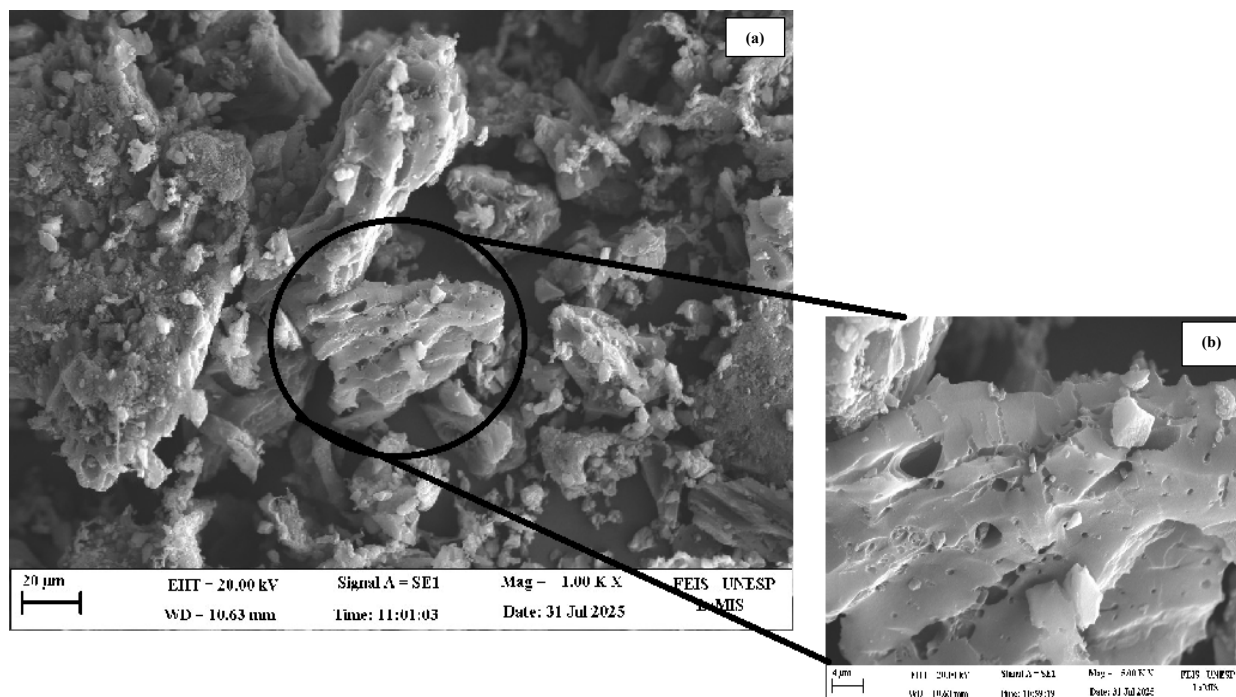
O carvão ativado residual proveniente de filtros domésticos saturados apresenta superfície rugosa e morfologia heterogênea, caracterizada pela presença de cavidades e poros irregulares interconectados, típicos de materiais lignocelulósicos submetidos a processos de carbonização e ativação (Berni, 2018; Biessikirsi et al., 2025). Essa configuração morfológica está associada à decomposição térmica parcial de constituintes como celulose e hemicelulose, bem como à remoção de compostos voláteis durante a ativação, resultando em uma estrutura altamente porosa.

Conforme observado nas micrografias apresentadas na Figura 14, a ampliação da região de interesse evidencia poros abertos e estruturas internas irregulares, distribuídos de forma não uniforme ao longo da superfície das partículas. Essa heterogeneidade morfológica contribui para o aumento da área superficial específica e favorece mecanismos de ancoragem mecânica entre o CA residual e a matriz polimérica, especialmente em sistemas elastoméricos processados por mistura mecânica.

Além disso, a presença de cavidades e irregularidades superficiais pode facilitar o aprisionamento físico da borracha fundida durante o processamento, promovendo melhor contato interfacial e restringindo o deslizamento relativo entre carga e matriz. Esse tipo de interação física é frequentemente associado a melhorias na transferência de tensões e à maior estabilidade estrutural do compósito, mesmo na ausência de ligações químicas específicas. Dessa forma, a

morfologia observada para o CA residual reforça seu potencial de aplicação como carga funcional em compósitos de borracha natural, em consonância com resultados reportados na literatura para materiais carbonáceos porosos de origem residual (Syed Ismail et al., 2022).

Figura 14. Micrografias de MEV do carvão ativado residual: (a) visão geral da morfologia; (b) ampliação da região destacada, evidenciando poros irregulares.

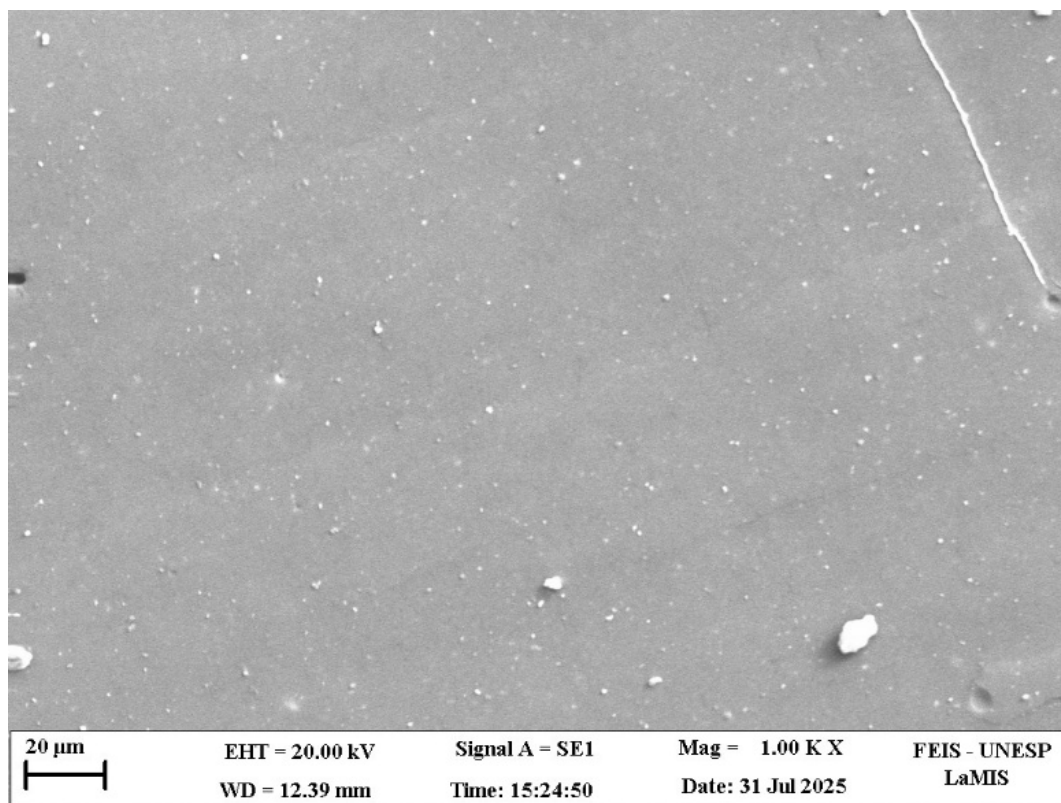


Fonte: Autoria própria.

Em contraste, a borracha natural pura apresenta superfície relativamente lisa, contínua e homogênea, característica típica de um material elastomérico não carregado. Conforme evidenciado na micrografia apresentada na Figura 15, observa-se a ausência de partículas ou descontinuidades estruturais significativas, indicando elevada uniformidade morfológica da matriz polimérica.

Essa morfologia de superfície lisa e contínua em borrachas naturais não reforçadas tem sido relatada na literatura recente e é atribuída à fratura coesiva da matriz polimérica, típica de elastômeros não carregados (Payungwong; Wu; Sakdapipanich, 2024). Esse comportamento permite considerar a BN pura como referência morfológica para comparação com compósitos carregados, facilitando a identificação de efeitos atribuíveis exclusivamente à presença de cargas particuladas.

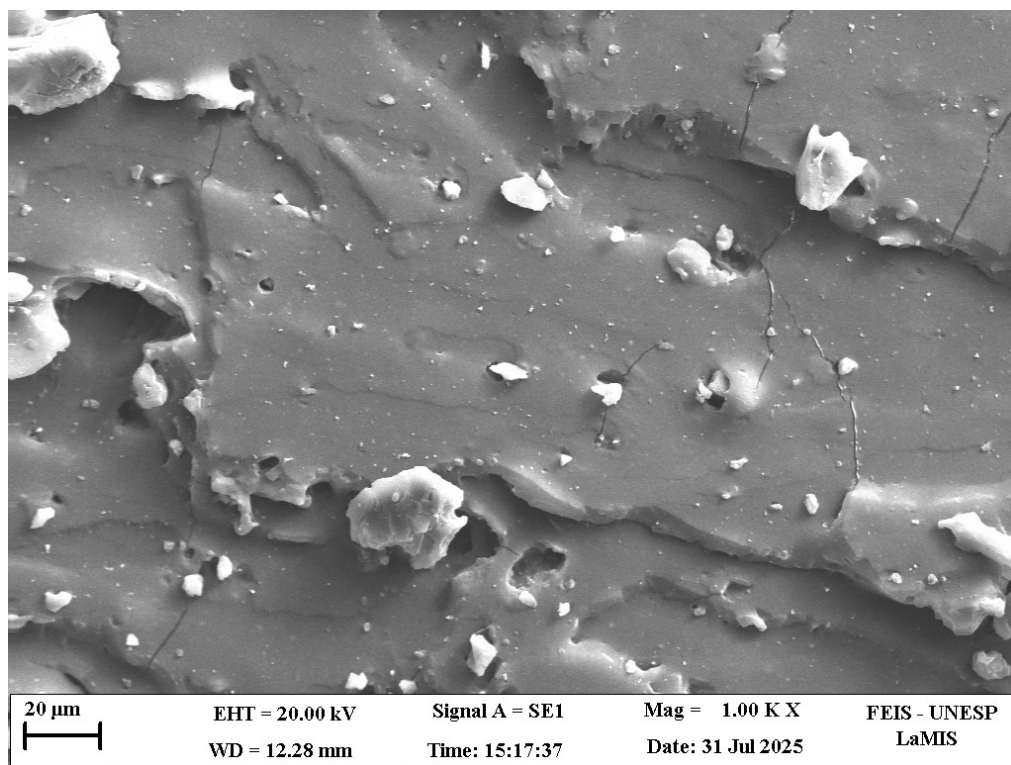
Figura 15. Micrografia de MEV da borracha natural pura, evidenciando superfície lisa e morfologia homogênea.



Fonte: Autoria própria.

Na formulação BN/CA_{5phr}, observa-se que a incorporação do carvão ativado residual promove alterações na microestrutura da matriz polimérica, caracterizadas por uma dispersão relativamente homogênea das partículas de carga e pela ausência de aglomerados significativos. Conforme evidenciado na micrografia apresentada na Figura 16, as partículas de CA encontram-se distribuídas de maneira uniforme ao longo da matriz de borracha natural, indicando bom contato físico entre os constituintes e adequada incorporação da carga durante o processo de mistura.

Figura 16. Micrografia de MEV do compósito BN/CA_{5phr}, evidenciando a dispersão das partículas de carvão ativado residual na matriz de borracha natural.



Fonte: Autoria própria.

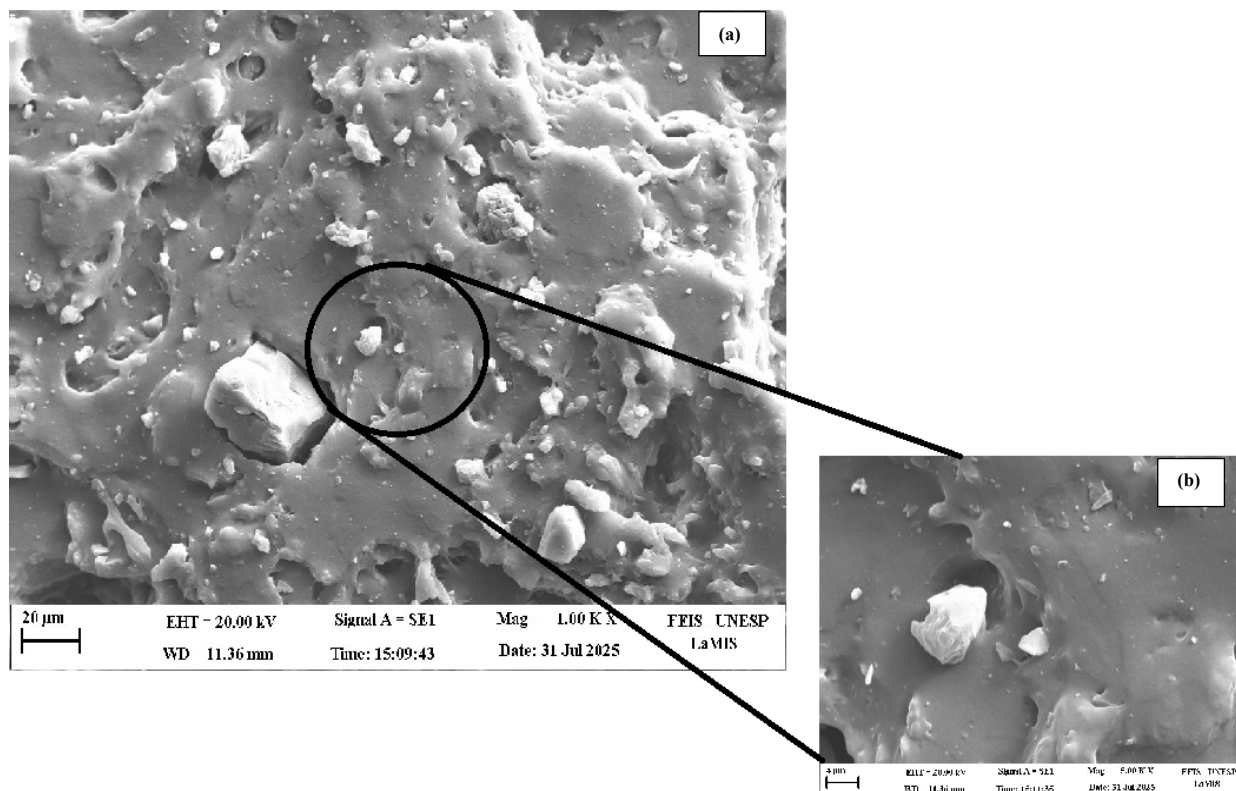
A morfologia observada sugere que, nesse teor de carga, o processo de mastigação e mistura foi suficiente para promover a quebra de possíveis aglomerados iniciais, favorecendo a homogeneização do sistema elastomérico. Além disso, a presença de partículas parcialmente ancoradas na matriz polimérica após a fratura indica predominância de interações físicas matriz–carga, associadas principalmente ao entrelaçamento mecânico e à rugosidade superficial do carvão ativado residual. (Alves dos Santos, 2023; Rattanasom; Saowapark; Deeprasertkul, 2007).

Essa configuração microestrutural é considerada favorável para compósitos elastoméricos formulados com baixos teores de carga, uma vez que contribui para uma distribuição mais eficiente das tensões aplicadas e reduz a formação de regiões de concentração de tensões. Dessa forma, a morfologia observada para o compósito BN/CA_{5phr} está em concordância com o desempenho mecânico mais equilibrado esperado para formulações com menor conteúdo de carga residual.

Na formulação BN/CA_{10phr}, a análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidencia modificações mais pronunciadas na microestrutura do compósito em comparação à formulação com menor teor de carga. Conforme observado nas micrografias

apresentadas na Figura 17, verifica-se a presença de partículas de carvão ativado residual distribuídas ao longo da matriz de borracha natural, com dispersão ainda relativamente homogênea, porém com início de maior proximidade entre partículas.

Figura 17. Micrografias de MEV do compósito BN/CA_{10phr}: (a) visão geral da morfologia; (b) ampliação da região de interface matriz–carga.



Fonte: Autoria própria.

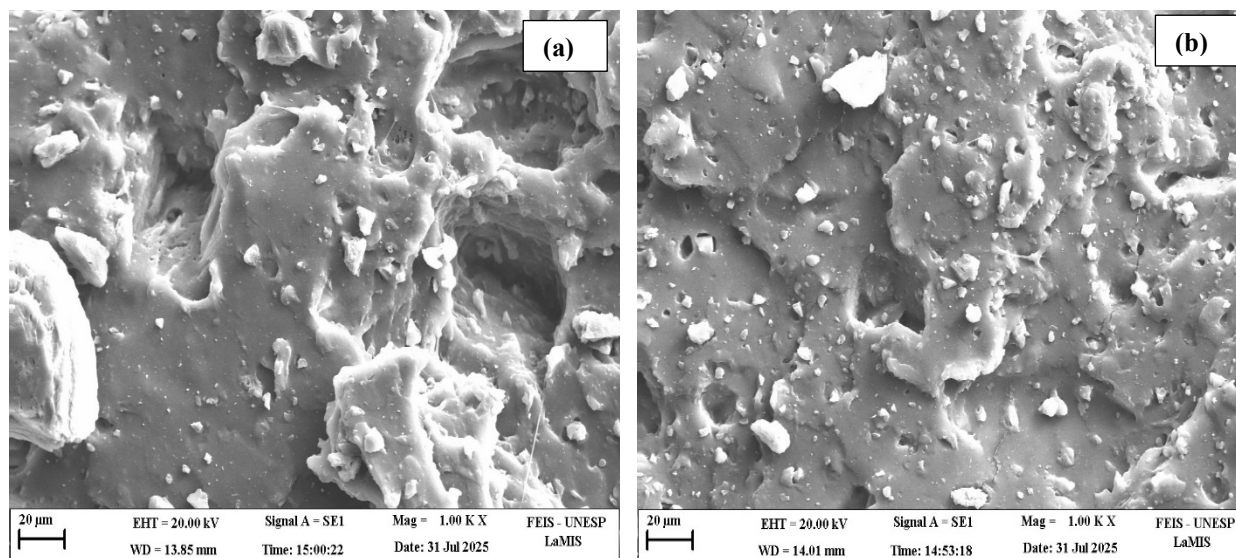
A ampliação da região de interface matriz–carga (Figura 17b) permite observar o contato íntimo entre as partículas de CA e a matriz polimérica, indicando boa adesão física e ancoragem mecânica promovida pela rugosidade superficial do carvão ativado residual. Entretanto, nota-se o surgimento pontual de regiões com maior concentração de partículas, sugerindo que, nesse teor de carga, o sistema se aproxima do limite de dispersão eficiente alcançado pelo processo de mistura.

Essa configuração morfológica indica um equilíbrio entre dispersão da carga e intensificação das interações físicas matriz–carga, o que é considerado favorável para o desempenho estrutural do compósito. Assim, a morfologia observada para o compósito BN/CA_{10phr} está em consonância com o comportamento mecânico otimizado observado para essa

formulação, posicionando-a como uma condição intermediária entre a dispersão mais homogênea do BN/CA_{5phr} e as heterogeneidades mais acentuadas verificadas em teores superiores de carga.

Nas formulações com maiores teores de carvão ativado residual, BN/CA_{15phr} (a) e BN/CA_{20phr} (b), observam-se alterações mais pronunciadas na morfologia dos compósitos. Conforme evidenciado nas micrografias de MEV apresentadas na Figura 18, observa-se aumento da rugosidade superficial e maior concentração de partículas na matriz polimérica, indicando redução da eficiência de dispersão da carga em comparação às formulações com menores teores.

Figura 18. Micrografias de MEV dos compósitos BN/CA_{15phr} e BN/CA_{20phr}.



Fonte: Autoria própria.

A presença de regiões com acúmulo de partículas e micro discontinuidades estruturais torna-se mais evidente nessas composições, sugerindo que o excesso de carga compromete a homogeneidade microestrutural do material. Comportamento semelhante tem sido amplamente reportado na literatura para compósitos elastoméricos reforçados com cargas particuladas, nos quais teores elevados de carga favorecem a formação de aglomerados e regiões de fraca adesão interfacial (Mostafa et al., 2009).

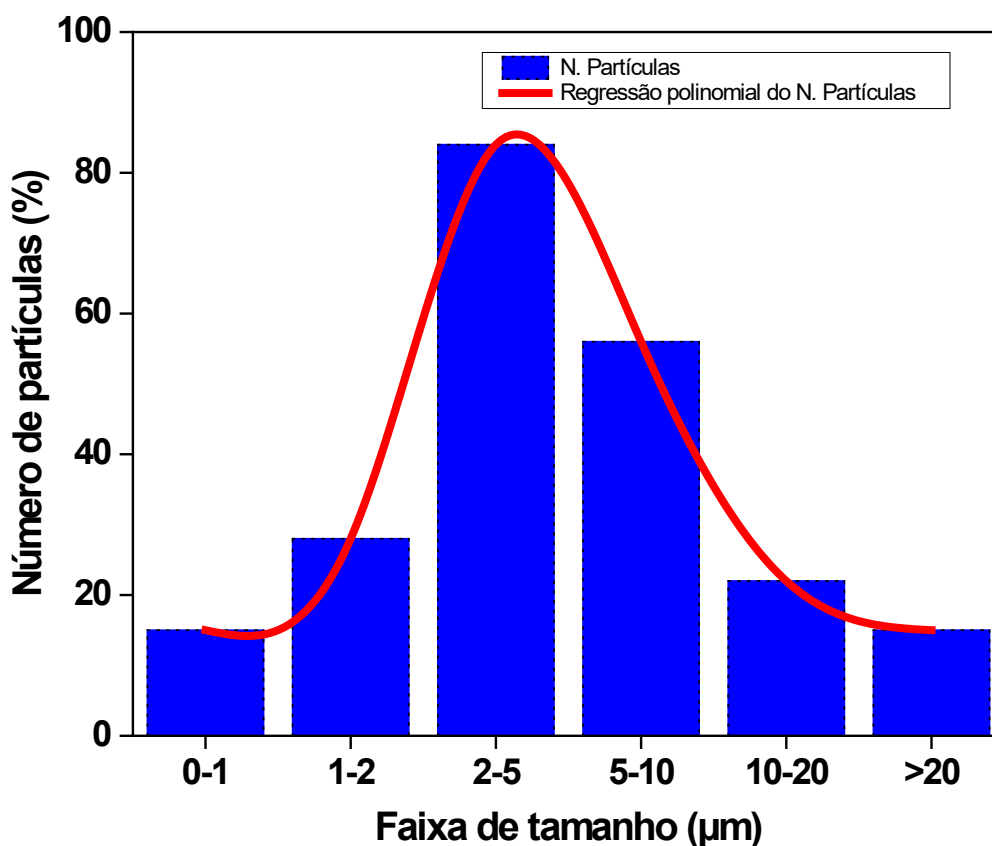
Esse efeito está associado à diminuição da afinidade física entre matriz e carga em concentrações elevadas, o que pode dificultar a transferência eficiente de tensões mecânicas e favorecer a nucleação de microdefeitos durante a fratura, conforme discutido em estudos

morfológicos recentes com cargas carbonáceas em matrizes de borracha natural (Alves dos Santos, 2023; De Carvalho et al., 2024).

Assim, embora o aumento do teor de CA residual intensifique a modificação da superfície de fratura, a análise morfológica indica que concentrações elevadas de carga tendem a prejudicar a uniformidade estrutural dos compósitos, em concordância com a redução do desempenho mecânico observada para essas formulações quando comparadas ao compósito BN/CA_{10phr}, comportamento também descrito em sistemas elastoméricos reforçados com resíduos carbonáceos (Inphonlek et al., 2025b).

A análise quantitativa da morfologia do carvão ativado residual, obtida a partir da contagem direta de aproximadamente $N \approx 277$ partículas observadas nas micrografias de MEV, está apresentada na Figura 19. O gráfico complementa a análise qualitativa das imagens, fornecendo subsídios adicionais para a interpretação da dispersão da carga e de sua influência na microestrutura dos compósitos de borracha natural.

Figura 19. Distribuição do tamanho de partículas observadas nas micrografias de MEV.



Fonte: Autoria própria.

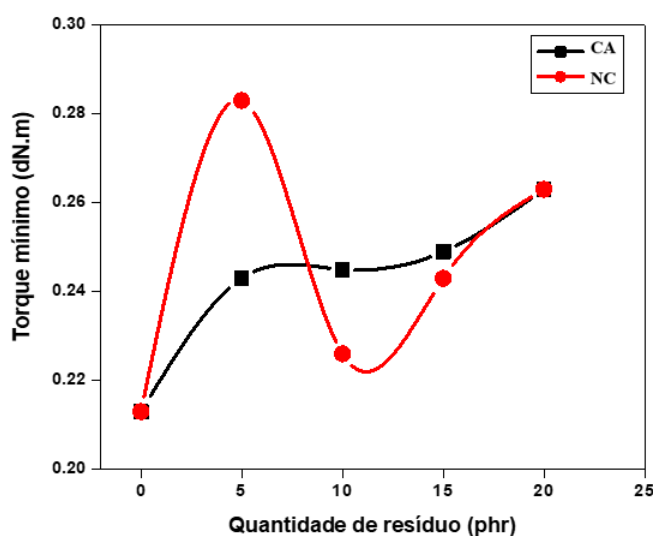
Observa-se predominância de partículas na faixa micrométrica, com maior concentração entre 2 e 5 μm , seguida pelas faixas de 5–10 μm e 1–2 μm , enquanto partículas de maior dimensão representam menor fração do total. Essa distribuição granulométrica favorece o aumento da área de contato interfacial entre carga e matriz, contribuindo para uma dispersão mais eficiente e para a transferência de tensões mecânicas, em concordância com o comportamento morfológico observado nas micrografias de MEV.

5.2 – Propriedades reométricas

A análise reométrica permitiu compreender o efeito das cargas carbonáceas CA e NC, sobre o comportamento de processamento e a cinética de vulcanização dos compósitos de BN. Os resultados apresentados nas Figuras e na Tabela, mostram variações significativas nos parâmetros de torque mínimo (ML), torque máximo (MH), torque diferencial ($\Delta M = MH - ML$), tempo de pré-cura (t_{s1}) e tempo ótimo de cura (t_{90}) em função da quantidade e do tipo de carga incorporada.

A Figura 20 apresenta o torque mínimo (ML) que representa a viscosidade inicial do composto antes do início efetivo da vulcanização, refletindo a resistência ao cisalhamento e a mobilidade das cadeias poliméricas na fase de pré-cura. Nessa etapa, ainda não ocorre formação de ligações cruzadas, uma vez que o acelerador reage primeiramente com o estearato de zinco, conforme descrito por Santos, (2014), sendo o ML diretamente associado ao grau de processabilidade do composto.

Figura 20. Variação do torque mínimo (ML) em função do teor de carga de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN).



Fonte: Autoria própria.

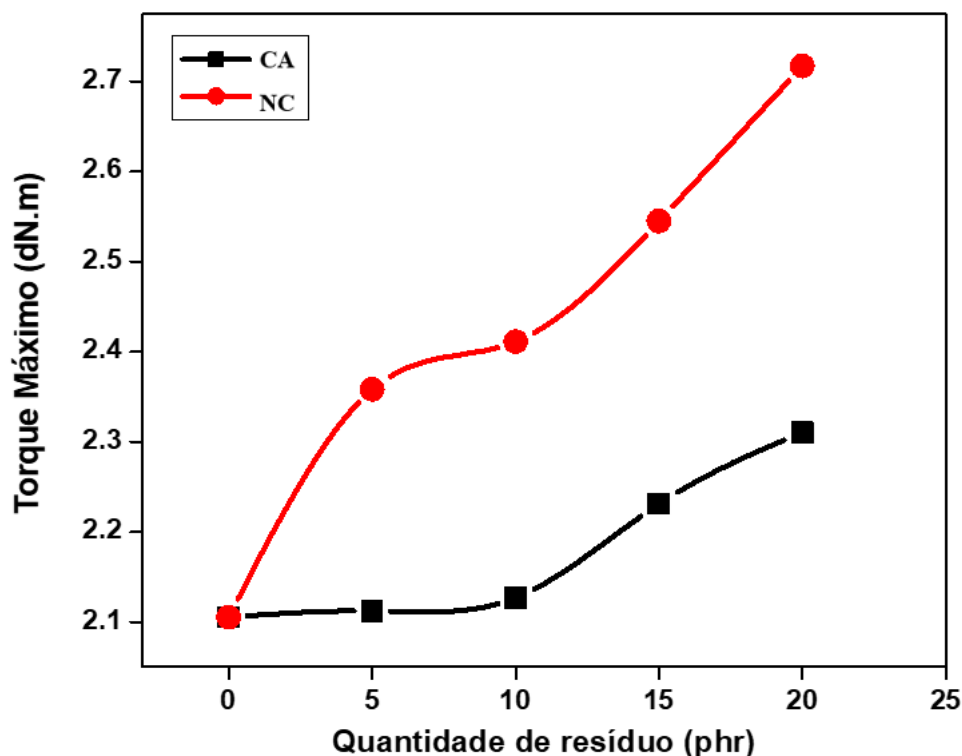
Observa-se um aumento gradual do ML com o acréscimo de carvão ativado (CA), partindo de 0,213 dN·m para a BN pura e alcançando 0,243 dN·m, 0,245 dN·m, 0,249 dN·m e 0,263 dN·m para as formulações contendo 5, 10, 15 e 20 phr de CA, respectivamente. Esse incremento sugere uma maior resistência ao escoamento do composto, possivelmente associada à presença das partículas de CA na matriz elastomérica, o que contribui para o aumento da viscosidade inicial do sistema e pode favorecer uma melhor estabilidade durante o processamento.

Nos compósitos com negro de carbono (NC), o ML variou de 0,283 dN·m (NC_{5phr}) a 0,263 dN·m (NC_{20phr}), apresentando comportamento menos uniforme em função da alta área superficial e do caráter fortemente reforçante dessa carga. Embora os valores absolutos sejam superiores aos observados nos compósitos com CA, o aumento inicial mais acentuado pode estar relacionado à maior capacidade do NC de restringir o movimento das cadeias poliméricas já em baixas concentrações, promovendo maior rigidez intermolecular e elevação da viscosidade do sistema. Em contrapartida, os compósitos com CA exibiram incremento mais gradual e controlado, indicando boa dispersão das partículas e processabilidade equilibrada.

Entre as formulações analisadas, o compósito BN/CA_{10phr}, com ML de 0,245 dN·m, destacou-se por apresentar viscosidade intermediária, suficientemente baixa para garantir boa dispersão e adequada resistência ao cisalhamento, sem comprometer a estabilidade da mistura. Esse comportamento confirma que 10 phr de CA constitui uma proporção otimizada, proporcionando equilíbrio entre fluidez e coesão estrutural, resultado também relatado por Lubura et al., (2023a) e corroborado pelo modelo interpretativo de Santos, (2014), que relaciona o aumento de ML à presença de cargas fibrosas ou particuladas com maior rigidez superficial.

O torque máximo (MH) representado na figura 21, mostra a rigidez do material após a cura, refletindo a estabilidade dimensional e a resistência da rede vulcanizada. Os valores cresceram progressivamente de 2,105 dN·m (BN_{pura}) para 2,112 dN·m (BN/CA_{5phr}), 2,127 dN·m (BN/CA_{10phr}), 2,231 dN·m (BN/CA_{15phr}) e 2,310 dN·m (BN/CA_{20phr}). Essa tendência demonstra que o CA atua como reforço estrutural, aumentando a rigidez do material de forma gradual e controlada.

Figura 21. Variação do torque máximo (MH) em função do teor de carga de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN).

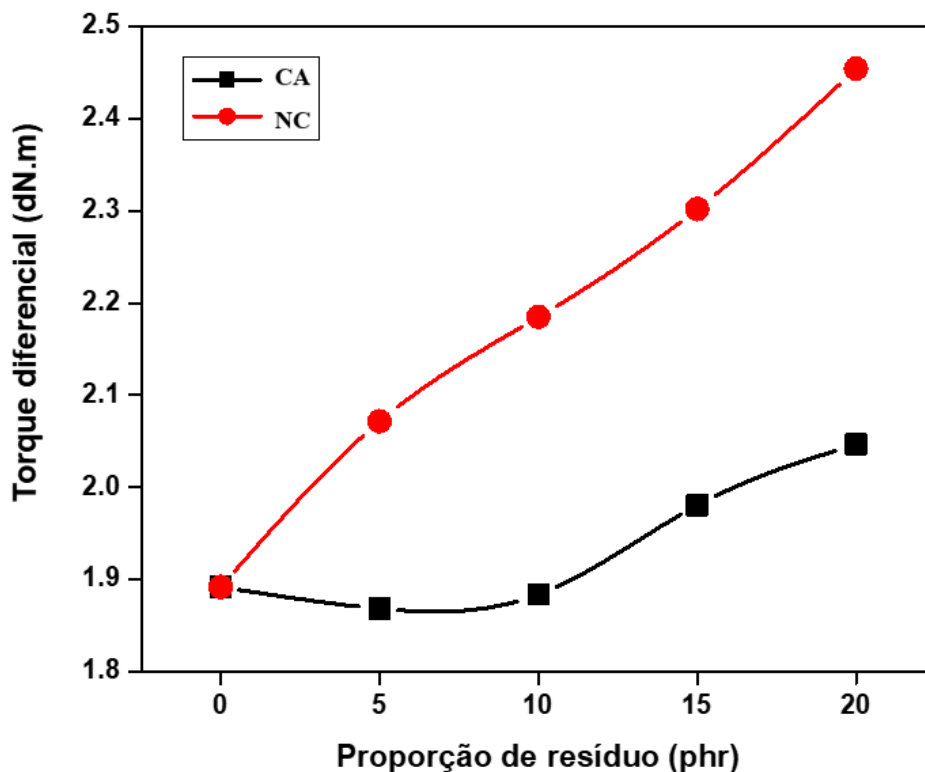


Fonte: Autoria própria.

Nos compósitos com negro de carbono (NC), o MH apresentou valores mais elevados, variando de 2,358 dN·m (BN/NC_{5phr}) a 2,717 dN·m (BN/NC_{20phr}), comportamento esperado para uma carga tradicionalmente utilizada na indústria de borracha devido à sua elevada capacidade de reforço e à ampla área superficial. O desempenho superior do NC confirma seu papel consolidado como referência técnica em formulações elastoméricas de alto desempenho.

Comparativamente, o carvão ativado residual apresentou comportamento progressivo e linear, evidenciando boa dispersão e compatibilidade com a matriz elastomérica. Esse desempenho confirma sua atuação como carga funcional de eficiente, capaz de reforçar o composto sem comprometer a processabilidade. A amostra BN/CA_{10phr}, com torque máximo de 2,127 dN·m, destacou-se por equilibrar rigidez, estabilidade e facilidade de processamento, demonstrando a eficiência do teor intermediário de 10 phr na obtenção de um sistema reologicamente estável. Esses resultados indicam que o carvão ativado residual contribui de maneira significativa para o reforço da matriz de borracha natural, configurando-se como uma alternativa técnica e ambientalmente viável para formulações elastoméricas sustentáveis (Intapun et al., 2021).

Figura 22. Variação do torque diferencial (ΔM) em função da quantidade de resíduo adicionada aos compósitos de borracha natural.



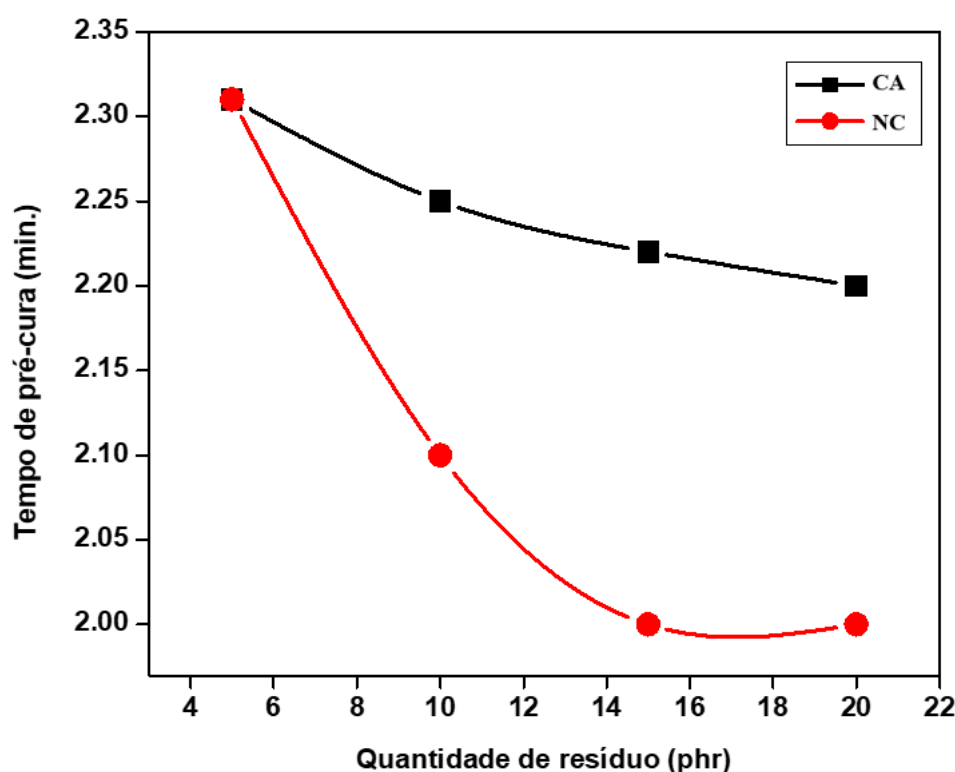
Fonte: Autoria própria.

O torque diferencial (ΔM) reflete a diferença entre os estados inicial e final de cura, sendo um indicativo da amplitude de endurecimento do composto. Conforme apresentado na figura 22, observa-se aumento de 1,892 dN·m (BN_{pura}) para 1,869 dN·m (BN/CA_{5phr}), 1,884 dN·m (BN/CA_{10phr}), 1,981 dN·m (BN/CA_{15phr}) e 2,047 dN·m (BN/CA_{20phr}). Esse crescimento demonstra que o carvão ativado residual favorece a formação de uma matriz mais resistente, mantendo comportamento estável e sem variações bruscas durante o processo de vulcanização.

Nos compósitos contendo negro de carbono (NC), o torque diferencial (ΔM) aumentou de 2,072 dN·m (BN/NC_{5phr}) para 2,454 dN·m (BN/NC_{20phr}), refletindo o comportamento esperado de um sistema altamente reforçado, com maior rigidez final após a vulcanização. Por outro lado, os sistemas formulados com carvão ativado residual (CA) apresentaram crescimento mais gradual e uniforme de ΔM , caracterizando um reforço controlado e sem variações abruptas no processo de cura.

A amostra BN/CA_{10phr}, com ΔM de 1,884 dN·m, destacou-se pelo equilíbrio entre resistência e estabilidade reométrica, evidenciando transição suave entre as fases pré e pós-vulcanizadas e excelente compatibilidade entre a carga e a matriz elastomérica. Esse comportamento reforça a eficiência do teor intermediário de 10 phr na formação de uma rede vulcanizada homogênea e mecanicamente coesa.

Figura 23. Variação do tempo de pré-cura (t_{st}) em função do teor de carga de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN).



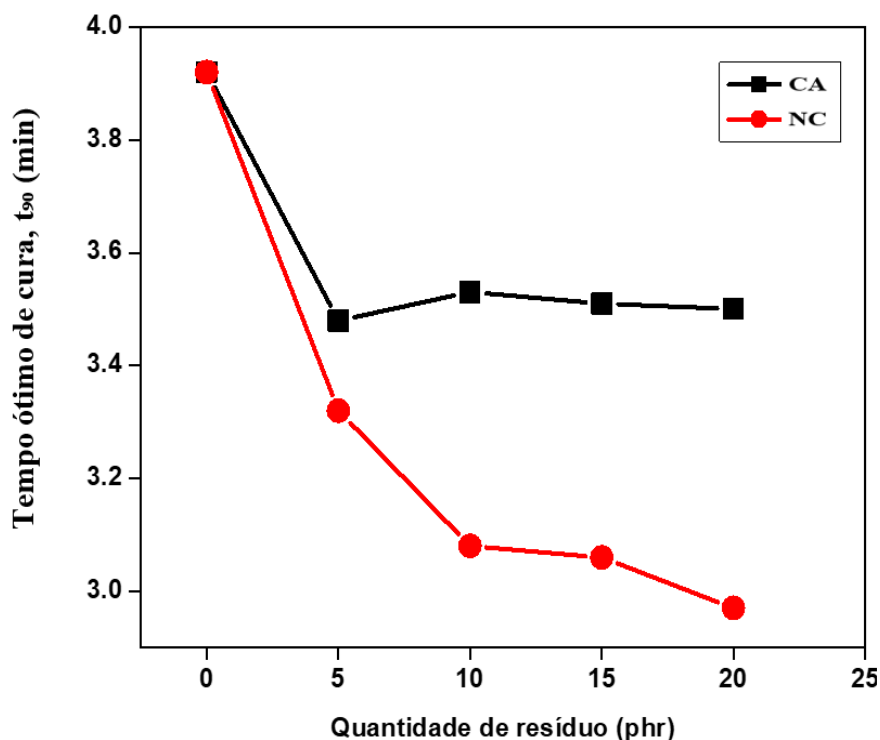
Fonte: Autoria própria.

O tempo de pré-cura, apresentado na Figura 23 correspondentes, indica o início da vulcanização. A BN pura apresentou 2,31 min, enquanto os compósitos com CA exibiram valores de 2,25 min (BN/CA_{5phr}), 2,22 min (BN/CA_{10phr}), 2,20 min (BN/CA_{15phr}) e 2,27 min (BN/CA_{20phr}). Essa leve redução evidencia que o CA contém grupos funcionais reativos e possíveis traços metálicos capazes de atuar como catalisadores secundários, acelerando levemente o início da cura sem comprometer o controle do processo.

Os compósitos com NC apresentaram tempos mais curtos, 2,10 min (CA/NC_{5phr}), 2,00 min (CA/NC_{10phr}), 2,00 min (CA/NC_{15phr}) e 1,90 min (CA/NC_{20phr}), sugerindo maior aceleração do processo e menor estabilidade térmica. Comparativamente, o CA manteve comportamento mais

estável, sendo a amostra BN/CA_{10phr} a que apresentou o equilíbrio ideal entre tempo de indução e início de vulcanização.

Figura 24. Variação do tempo ótimo de cura (t_{90}) em função do teor de carvão ativado residual (CA) e de negro de fumo (NC) em compósitos de borracha natural (BN).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 apresenta a variação do tempo ótimo de cura (t_{90}) em função do teor de carga incorporado à borracha natural. Observa-se que o t_{90} reduziu-se de 3,92 min para a BN_{pura} para 3,53 min na amostra BN/CA_{10phr}, indicando uma leve aceleração da vulcanização com o aumento do teor de carvão ativado residual. Nos compósitos contendo NC, os tempos de cura foram ainda menores, atingindo 2,97 min na formulação BN/NC_{20phr}, o que é consistente com o comportamento altamente reativo dessa carga carbonácea tradicional.

A diminuição moderada observada nas amostras com CA demonstra que o material promove um processo de vulcanização estável e controlado, preservando o equilíbrio entre velocidade de reação e estabilidade térmica. Além disso, a pequena variação entre as formulações com CA evidencia boa homogeneidade e previsibilidade cinética, sugerindo que o resíduo atua de maneira uniforme no sistema curativo.

Esse comportamento controlado e reprodutível confirma o potencial do carvão ativado residual como carga funcional tecnicamente eficiente e ambientalmente favorável, capaz de

contribuir para o reforço do composto sem comprometer a qualidade da vulcanização ou a processabilidade do material (Mostoni et al., 2019).

A Tabela 3 apresenta o resumo dos parâmetros reométricos obtidos para os compósitos de borracha natural estudados. Observa-se que a amostra BN/CA_{10phr} apresentou o desempenho mais equilibrado entre todas as formulações, combinando viscosidade inicial moderada, torque final adequado e tempos de cura estáveis. O CA residual atuou como agente de reforço progressivo e controlado, favorecendo a processabilidade, a estabilidade térmica e uma vulcanização ligeiramente mais rápida, sem comprometer a homogeneidade do processo.

Tabela 3. Parâmetros reométricos dos compósitos de borracha natural (BN) com diferentes teores de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC).

PARÂMETROS REOMÉTRICOS DOS COMPÓSITOS					
Amostra	ML (dN·m)	MH (dN.m)	$\Delta M = MH - ML$ (dN·m)	t_{s1} (min)	t_{90} (min)
BN _(pura)	0,213	2.105	1.892	2.31	3.92
BN/CA _{5phr}	0,243	2.112	1.869	2.25	3.48
BN/CA _{10phr}	0,245	2.127	1.884	2.22	3.53
BN/CA _{15phr}	0,249	2.231	1.981	2.20	3.51
BN/CA _{20phr}	0,263	2.310	2.047	2.27	3.50
BN/NF _{5phr}	0,283	2.358	2.072	2.10	3.32
BN/NF _{10phr}	0,226	2.411	2.185	2.00	3.08
BN/NF _{15phr}	0,243	2.545	2.302	2.00	3.06
BN/NF _{20phr}	0,263	2.717	2.454	1.90	2.97

Fonte: Autoria própria.

De modo geral, os resultados obtidos confirmam que o carvão ativado residual pode ser empregado como substituto parcial do negro de carbono em formulações elastoméricas, mantendo desempenho técnico satisfatório e compatibilidade com a matriz de borracha natural. Resultados semelhantes foram observados por Lubura et al., (2023a), que destacaram o potencial do hidrocarvão como um preenchimento parcial em compósitos de borracha natural, contribuindo para a valorização de resíduos carbonáceos e representando uma alternativa ambientalmente

sustentável e economicamente viável para o desenvolvimento de compósitos poliméricos de menor impacto ambiental.

5.3 – Densidade de ligações cruzadas

A densidade de ligações cruzadas foi determinada a partir do modelo termodinâmico de Flory–Rehner, utilizando-se os dados de inchamento das amostras em tolueno. A formulação de BN pura, sem adição de cargas, apresentou densidade de $1,62 \times 10^{-4} \text{ mol}\cdot\text{cm}^{-3}$, servindo como referência para a comparação com os compósitos reforçados com carvão ativado residual (CA), conforme apresentado na Tabela 4.

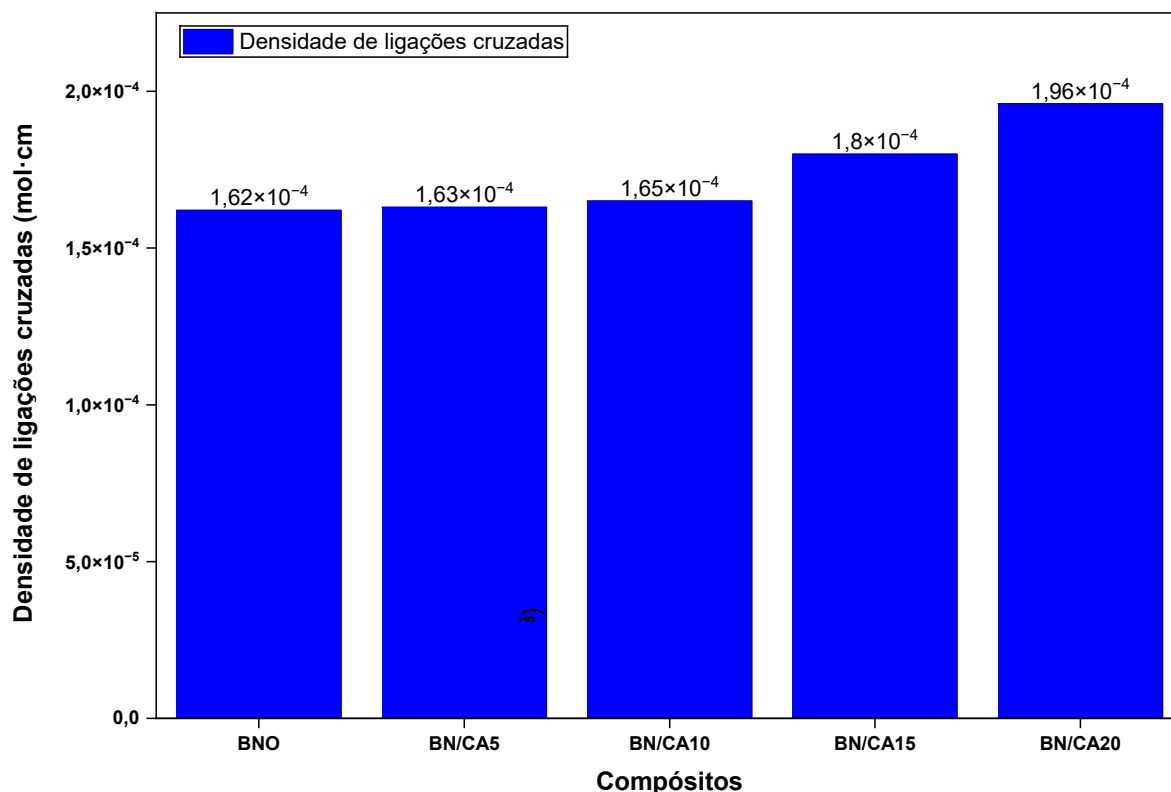
Tabela 4. Densidade de ligações cruzadas (mol/cm^3) dos compósitos com diferentes teores de CA.

Compósitos	Densidade de ligações cruzadas (mol/cm^3)	Desvio Padrão
BN ₀ phr	$1,62 \times 10^{-4}$	$2,34 \times 10^{-6}$
BN/CA ₅ phr	$1,63 \times 10^{-4}$	$2,20 \times 10^{-6}$
BN/CA ₁₀ phr	$1,65 \times 10^{-4}$	$3,36 \times 10^{-7}$
BN/CA ₁₅ phr	$1,80 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-6}$
BN/CA ₂₀ phr	$1,96 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-7}$

Fonte: Autoria própria.

A Figura 25 apresenta a representação gráfica da variação da densidade de ligações cruzadas em função do teor de carvão ativado residual incorporado à matriz de borracha natural, permitindo melhor visualização da tendência de aumento da reticulação com o acréscimo de carga.

Figura 25. Densidade de ligações cruzadas dos compósitos de borracha natural com diferentes teores de carvão ativado residual, determinada pelo modelo de Flory–Rehner.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se, tanto na Tabela 4 quanto na Figura 25, um aumento gradual da densidade de ligações cruzadas com o acréscimo de CA residual à matriz de borracha natural, passando de $1,62 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ (BN pura) para $1,96 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-3}$ (BN/CA_{20 phr}). Esse comportamento indica que o carvão ativado promove maior eficiência aparente de reticulação, favorecendo a formação de uma rede tridimensional mais densa.

Nas formulações BN/CA_{5 phr} e BN/CA_{10 phr}, o aumento ainda é discreto ($1,63 \times 10^{-4}$ e $1,65 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectivamente), o que pode estar associado à interferência física das partículas de carga durante a difusão dos agentes de cura, limitando parcialmente a reação de vulcanização. Tal comportamento é coerente com o relatado por Santos, (2014), que observou bloqueios cinéticos em sistemas elastoméricos reforçados com partículas heterogêneas e dependência do tipo de acelerador empregado.

É importante ressaltar, entretanto, que o método de Flory–Rehner estima a densidade de ligações cruzadas com base na resistência ao inchamento em solvente e, portanto, o valor obtido pode refletir não apenas a quantidade real de ligações químicas formadas, mas também restrições físicas impostas pela presença da carga. Assim, parte do aumento observado pode estar

relacionada ao bloqueio da penetração do solvente nas regiões adjacentes às partículas de CA, que se comportam como pontos de ancoragem ou pseudo-reticulações, restringindo a mobilidade segmentar da matriz. Essa limitação física reduz o volume de inchamento e, consequentemente, é interpretada matematicamente como uma maior densidade de ligações cruzadas, embora parte do efeito decorra da interação carga–borracha e não exclusivamente da formação de ligações covalentes.

A partir da formulação BN/CA_{15phr}, observa-se um aumento significativo da densidade de reticulação ($1,80 \times 10^{-4}$ mol/cm³), indicando uma modificação no comportamento de reticulação do sistema com a incorporação do carvão ativado residual. Esse efeito torna-se mais pronunciado para a formulação BN/CA_{20phr}, que apresentou o maior valor de densidade ($1,96 \times 10^{-4}$ mol/cm³), superando a amostra sem carga. Esse comportamento pode estar associado à presença de grupos funcionais na superfície do carvão ativado residual, os quais podem influenciar a organização da rede polimérica e a eficiência da formação de ligações cruzadas. Resultados semelhantes são reportados por (Santos, 2014), que observou aumento da densidade de ligações cruzadas e melhoria da resistência mecânica em compósitos de borracha natural reforçados com resíduos industriais, atribuindo tais efeitos a uma maior interação entre carga e matriz polimérica.

Entretanto, um aumento acentuado da densidade de ligações cruzadas não implica, necessariamente, em melhor desempenho mecânico global, pois pode ocasionar redução da elasticidade e aumento da rigidez local, especialmente em regiões com aglomeração de carga. Esse fenômeno está em conformidade com as observações de Chaikumpollert et al., (2012) e Kim et al., (2020c), que destacam que a natureza química e a distribuição das ligações formadas são fatores tão relevantes quanto sua quantidade, afetando diretamente a elasticidade e a resistência do elastômero vulcanizado.

Sob essa perspectiva, as características superficiais do carvão ativado residual, associadas à sua origem e às condições de pirólise, são apontadas na literatura como fatores capazes de influenciar a organização da rede reticulada e, consequentemente, as propriedades finais dos compósitos elastoméricos. Pöschl; Sathi; Stoček, (2024) destacam que a densidade aparente de reticulação não depende exclusivamente do número de entrelaçamentos formados, mas também do tipo e da distribuição das ligações estabelecidas no sistema de cura, conforme diferentes formulações reportadas na literatura (por exemplo, sistemas do tipo convencional, semi-eficiente e eficiente). Densidades mais elevadas, associadas à redução relativa de ligações polissulfídicas, podem resultar em maior dissipação de energia e histerese, reforçando a importância de analisar a densidade de reticulação de forma integrada ao contexto químico do sistema de cura.

Por fim, destaca-se que a densidade de ligações cruzadas é um parâmetro estrutural essencial, mas não atua de maneira isolada. A dispersão da carga, a compatibilidade interfacial, o grau de aglomeração e a mobilidade segmentar da matriz também desempenham papel determinante no desempenho final dos compósitos de borracha natural (Gobetti et al., 2024a).

5.4 – Propriedades mecânicas dos compósitos

5.4.1 – Resistência à tração e alongamento na ruptura

A resistência à tração e o alongamento na ruptura constituem parâmetros fundamentais para a avaliação do desempenho estrutural de compósitos elastoméricos, uma vez que refletem, respectivamente, a capacidade do material em suportar tensões uniaxiais antes da fratura e a deformação máxima associada à elasticidade da rede polimérica. No presente estudo, essas propriedades foram determinadas para formulações de borracha natural (BN) contendo diferentes proporções de negro de carbono (NC) e carvão ativado residual (CA), sendo a BN pura adotada como material de referência.

Tabela 5. Resistência à tração e deformação dos compósitos de borracha natural com diferentes proporções de negro de carbono (NC) e carvão ativado residual (CA)

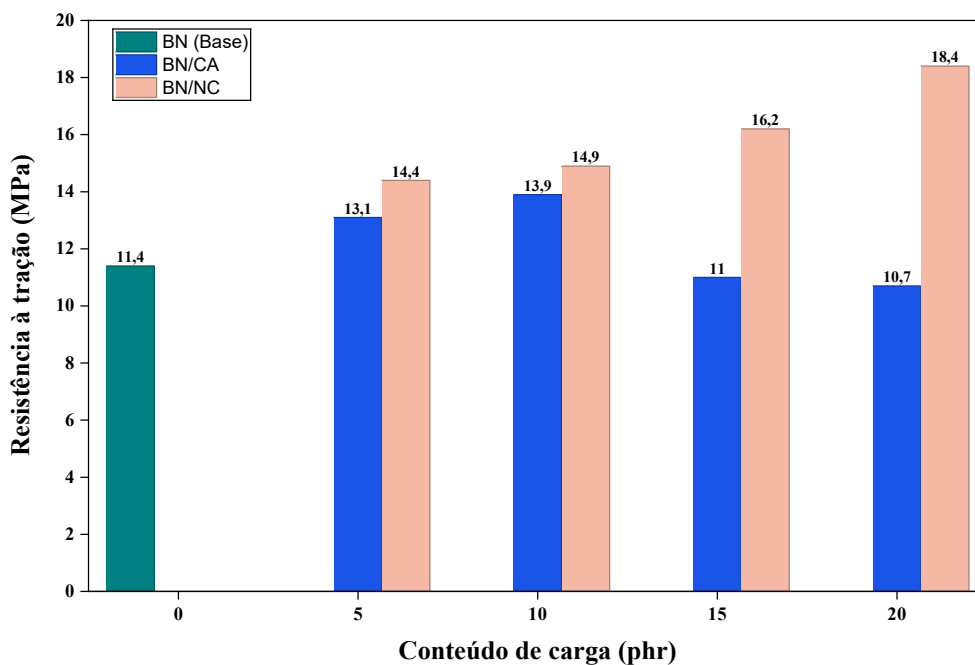
Grupo de Compósitos	Formulação	Resistência à tração (MPa)	Deformação (%)
Com negro de carbono (NC)	BN/NC _{5phr}	14,4 ± 2,7	331 ± 14
	BN/NC _{10phr}	14,9 ± 1,3	267 ± 25
	BN/NC _{15phr}	16,2 ± 1,5	303 ± 22
	BN/NC _{20phr}	18,4 ± 1,6	269 ± 34
Com carvão ativado residual (CAR)	BN (pura)	11,4 ± 1,0	382 ± 14
	BN/CA _{5phr}	13,1 ± 0,6	385 ± 10
	BN/CA _{10phr}	13,9 ± 1,0	331 ± 27
	BN/CA _{15phr}	11,0 ± 1,0	306 ± 19
	BN/CA _{20phr}	10,7 ± 0,5	234 ± 63

Fonte: Autoria própria.

Os valores médios obtidos para resistência à tração e deformação na ruptura permitem avaliar comparativamente o efeito do tipo e do teor de carga sobre o comportamento mecânico dos

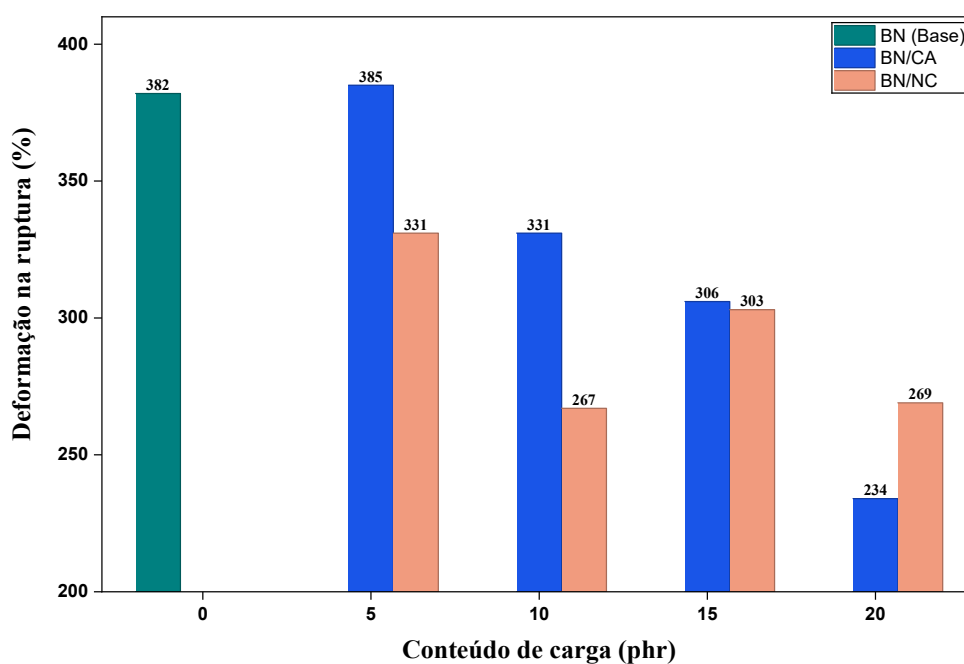
compósitos. Para facilitar a visualização dessas tendências, os resultados são apresentados graficamente nas Figuras 26 e 27.

Figura 26. Resistência à tração dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27. Deformação na ruptura dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 26, observa-se que a resistência à tração da BN aumentou com a incorporação de 5 phr de CA residual, atingindo 13,1 MPa em comparação aos 11,4 MPa da BN pura. Nesse teor, conforme evidenciado na Figura 27, o alongamento na ruptura manteve-se elevado, com valor próximo ao da matriz não carregada ($\approx 385\%$), indicando preservação do caráter elastomérico. Resultados semelhantes já foram reportados pelo grupo de pesquisa em estudos anteriores com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como carga de reforço, nos quais cargas moderadas promoveram melhoria nas propriedades de tração da borracha natural (Santos, 2014).

Com o aumento do teor de CA residual para 10 phr, os compósitos apresentaram o melhor desempenho mecânico dentre as formulações contendo resíduos, alcançando resistência à tração de 13,9 MPa, correspondente a um incremento de aproximadamente 21,9% em relação à BN pura, conforme destacado na Figura 26. Embora o alongamento na ruptura tenha apresentado redução para cerca de 331% (Figura 27), esse comportamento indica um compromisso típico entre reforço mecânico e elasticidade, associado à boa interação física entre a carga e a matriz polimérica. Esses resultados corroboram a atuação efetiva do CA residual como carga de reforço funcional em teores moderados.

O desempenho observado para a BN/CA_{10phr} pode ser atribuído à boa dispersão das partículas de CA com tamanho inferior a 45 μm (325 mesh) na matriz de borracha, favorecendo interações físicas eficientes entre carga e matriz. Entretanto, para teores superiores de CA residual (15 e 20 phr), verifica-se uma redução significativa tanto da resistência à tração quanto do alongamento na ruptura, conforme evidenciado nas Figuras 26 e 27. Esse comportamento está associado à aglomeração de partículas, que compromete a homogeneidade da matriz e limita a transferência eficiente de tensões, indicando que a interação entre o CA residual e a BN ocorre predominantemente por mecanismos físicos (Santos, 2014).

De modo geral, os resíduos de filtros de carvão ativado apresentam caráter predominantemente hidrofóbico, o que favorece a adesão interfacial com a matriz de borracha natural, também hidrofóbica. Essa afinidade explica o aumento da resistência à tração observado até 10 phr de CA residual. Contudo, em maiores concentrações, a elevada rigidez das partículas carbonáceas restringe a mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em redução tanto da extensibilidade quanto da resistência mecânica, como ilustrado na Figura 27.

Os compósitos contendo CA residual foram comparados com formulações equivalentes contendo negro de carbono comercial do tipo N330, reconhecido por seu elevado potencial de reforço. Conforme apresentado na Figura 26, as formulações com NC exibiram aumento contínuo da resistência à tração com o teor de carga, atingindo 18,4 MPa para a BN/NC_{20phr}. Esse

desempenho está associado à elevada área superficial e à estrutura organizada do NC, que favorecem interações intensas com a matriz polimérica e a formação de redes secundárias de reforço físico (J. Jeyaraj Pandian; T. Govindan, 2015; Robertson; Hardman, 2021b).

Apesar disso, observa-se que a formulação BN/CA_{10phr} apresentou resistência à tração (13,9 MPa) próxima à da BN/NF_{5phr} (14,4 MPa), evidenciando que, mesmo em baixas concentrações, o CA residual pode atuar como substituto parcial do NC comercial, especialmente quando se considera a preservação da deformação na ruptura, conforme indicado na Figura 27.

Adicionalmente, considerando a possível presença de metais adsorvidos na superfície do carvão ativado residual, foram realizados ensaios complementares com resíduos submetidos a tratamento ácido (HCl 1 M, seguido de lavagem com água até estabilização do pH), com o objetivo de avaliar sua influência nas propriedades mecânicas dos compósitos. Para formulações contendo 10 phr de CA tratado, não foram observadas variações significativas na resistência à tração, cujos valores permaneceram próximos aos obtidos para a carga não tratada (14,1 MPa e 13,9 MPa, respectivamente). Em função da ausência de diferenças relevantes, os dados detalhados não são apresentados, sendo esse resultado indicativo de que a eventual presença de metais adsorvidos não exerce influência significativa no desempenho mecânico dos compósitos avaliados. Essa observação está em concordância com os resultados da análise de fluorescência de raios X (XRF), que indicaram baixa concentração de metais nos filtros de carvão ativado residual.

Os compósitos contendo carvão ativado residual apresentaram comportamento mecânico distinto em função do teor de carga. O melhor desempenho foi observado para a formulação BN/CA_{10phr}, que atingiu resistência à tração de 13,9 MPa. Entretanto, para teores superiores, observa-se uma redução acentuada da resistência à tração, alcançando 10,7 MPa na formulação BN/CA_{20phr}. Esse comportamento pode estar associado à maior tendência à aglomeração de partículas em concentrações mais elevadas, o que pode comprometer a homogeneidade da matriz e limitar a transferência eficiente de tensões. Resultados de comportamento semelhante são reportados por Naebetch et al., (2024), que observaram que o excesso de cargas particuladas, como cinzas volantes, em compósitos de borracha natural pode favorecer a aglomeração de partículas e reduzir a extensibilidade e a resistência mecânica, em função da menor eficiência das interações físicas entre carga e matriz polimérica.

5.4.2 – Dureza Shore A

A dureza dos compósitos de BN, avaliada na escala Shore A, apresentou variações sistemáticas em função do tipo e da quantidade de carga adicionada. Esse parâmetro está diretamente associado à resistência superficial do material frente à deformação por penetração e

depende de fatores como a densidade de ligações cruzadas, o grau de dispersão e a rigidez das partículas incorporadas à matriz elastomérica.

Conforme demonstrado na Tabela 6, a formulação de BN pura exibiu dureza de 42 Shore A, valor compatível com elastômeros de elevada deformabilidade. A incorporação de carvão ativado residual (CA) promoveu um incremento gradual da dureza, atingindo valores de 44 Shore A para 5 phr, 45 Shore A para 10 e 15 phr e 48 Shore A para 20 phr. Esse aumento está associado à capacidade do CA em restringir a mobilidade das cadeias poliméricas e elevar a resistência localizada à deformação, ainda que apresente menor área superficial e irregularidades morfológicas quando comparado ao negro de fumo.

Tabela 6. Dureza Shore A dos compósitos com carvão ativado (CA) e negro de carbono (NC)

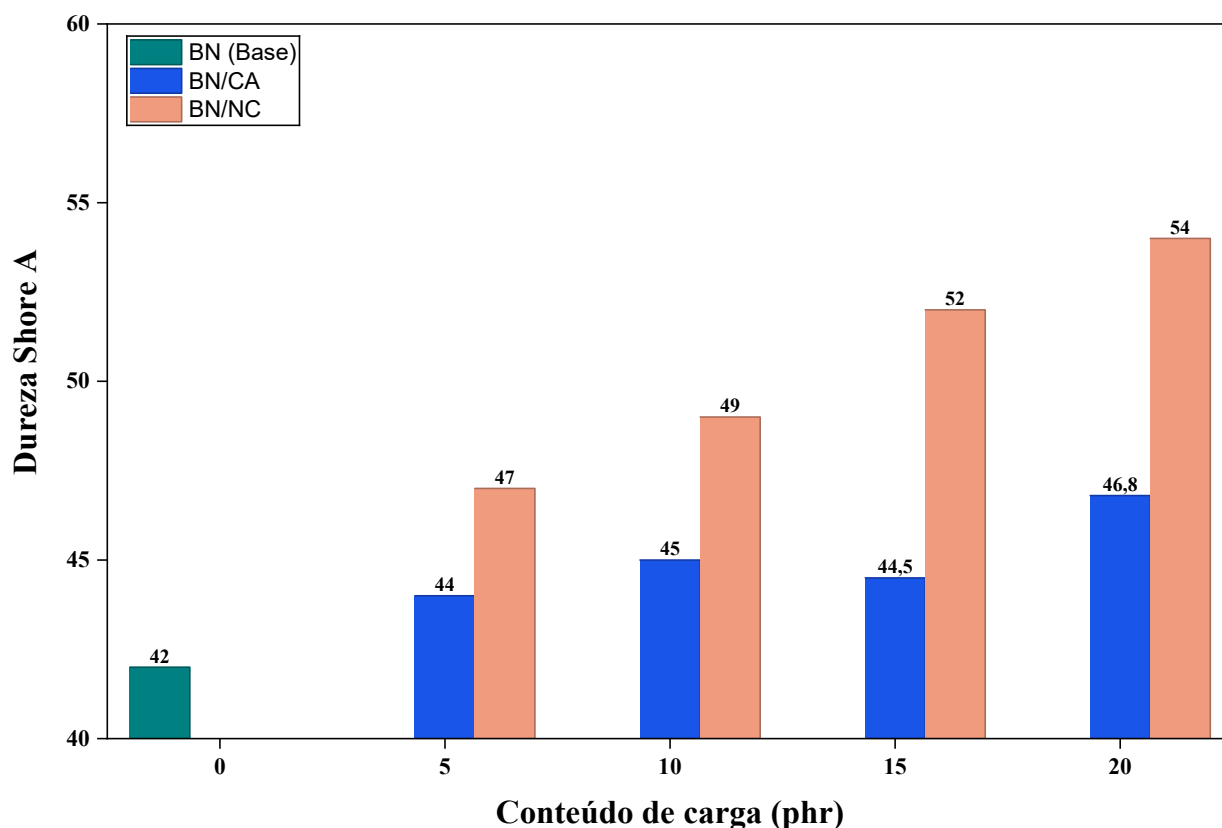
Compósito	BN/CA Dureza (Shore A)	BN/NC Dureza (Shore A)	Diferenças percentuais% em relação ao NC
0 _{phr}	42	42	0
5 _{phr}	44	47	- 6,4
10 _{phr}	45	49	- 8,2
15 _{phr}	45	52	- 13,5
20 _{phr}	48	54	- 11,1

Fonte: Autoria própria.

Nos compósitos preparados com negro de carbono (NC), os valores de dureza foram consistentemente superiores, atingindo 47 Shore A para 5 phr, 49 Shore A para 10 phr, 52 Shore A para 15 phr e 54 Shore A para 20 phr. Esse desempenho reforçado pode ser atribuído à elevada área superficial e à boa dispersabilidade do NC, que favorecem interações interfaciais mais efetivas e a formação de redes de reforço eficientes, resultando em maior densidade de reticulação (Balasooriya et al., 2019; Li; Zhang; Chen, 2008).

Para uma análise comparativa mais clara da evolução da dureza em função do teor e do tipo de carga, os resultados são apresentados graficamente na Figura 28, na qual se observa o comportamento distinto entre os compósitos contendo CA residual e aqueles formulados com NF.

Figura 28. Dureza Shore A dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.



Fonte: Autoria própria.

A análise dos resultados evidencia que, embora a dureza dos compósitos contendo CA residual seja inferior à obtida com NC, a diferença percentual em concentrações reduzidas permanece relativamente modesta. Para 5 phr, a dureza do compósito com CA foi apenas 6,4 % inferior à do compósito equivalente com NC; em 10 phr, essa diferença manteve-se em torno de 8,2 %, conforme indicado na Tabela 6. Esses valores reforçam o potencial do CA como carga semirreforçante em formulações técnicas, sobretudo quando se considera que o desempenho superior do NC está diretamente associado à sua elevada área superficial e à sua estrutura organizada, fatores amplamente descritos na literatura como determinantes para o aumento da dureza e da densidade de reticulação em compósitos de borracha natural (ABBAS; AL-JUOTHRY, 2014; Kyei-Manu et al., 2022; Li et al., 2019).

A aglomeração de partículas reduz a eficiência de reforço nos compósitos de BN, limitando a interação entre a matriz polimérica e as partículas de preenchimento. Inphonlek et al., (2025b) destacaram que a adição de compatibilizadores, como o gDPNR, melhora

significativamente a dispersão dos preenchimentos e a adesão interfacial, resultando em propriedades mecânicas e térmicas aprimoradas nos compósitos de BN. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo indicam a existência de uma faixa ótima entre 5 e 10 phr de CA residual, na qual é possível alcançar valores de dureza próximos àqueles obtidos com NC, sem comprometer significativamente a rigidez superficial dos compósitos.

5.4.3 – Massa específica (densidade)

A massa específica dos compósitos de BN constitui um parâmetro físico fundamental em aplicações técnicas que demandam leveza estrutural sem comprometimento das propriedades mecânicas, como em solados de calçados, peças automotivas, sistemas de vedação e componentes antivibratórios (Filgueira et al., 2024). A introdução de cargas sólidas altera significativamente a densidade aparente do material, aspecto crítico no projeto de produtos que buscam eficiência energética e conforto funcional.

No presente estudo, foram avaliadas as massas específicas das formulações de BN contendo diferentes teores de CA residual e NC, além da amostra de BN_{pura}, utilizada como referência. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

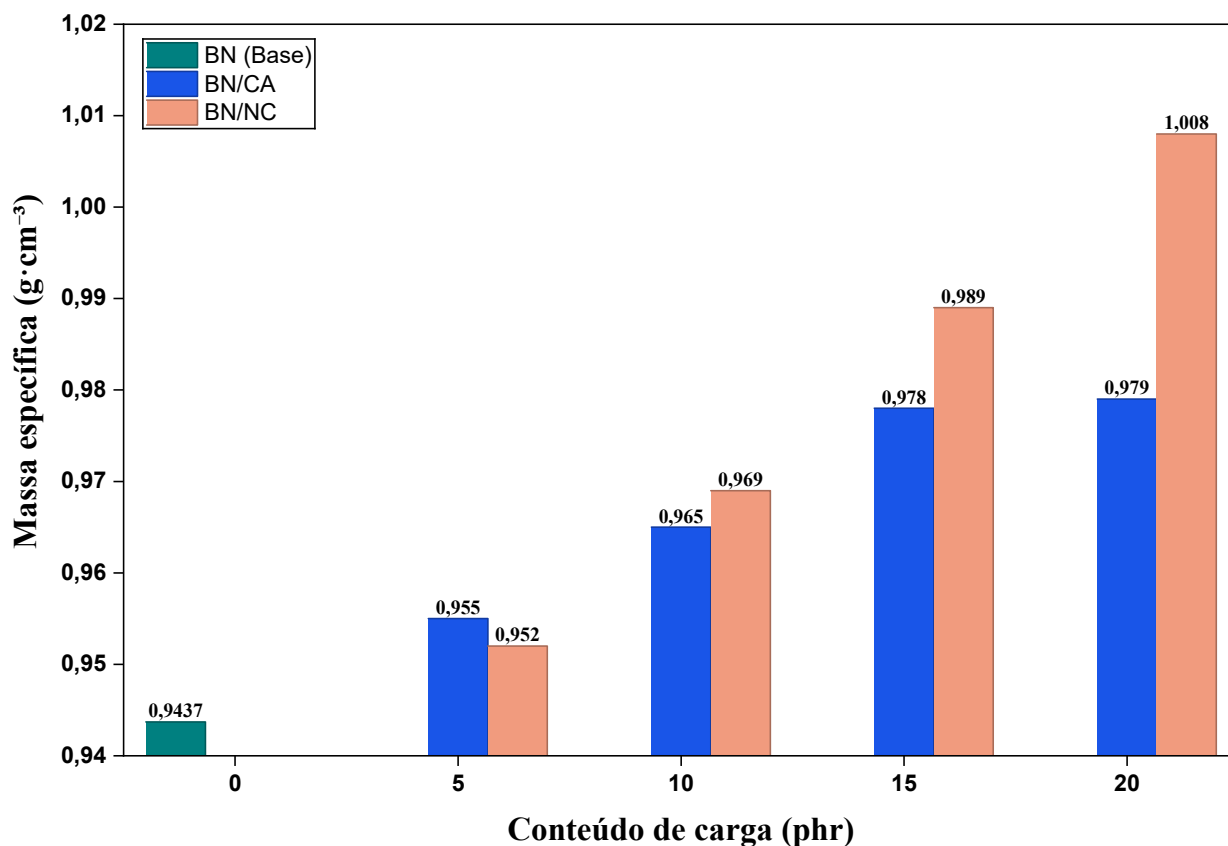
Tabela 7. *Massa específica dos compósitos de NR com diferentes teores de CA e NC.*

Compósito	Massa Específica (g/cm ³)
BN _(pura)	0,9437
BN/CA _{5phr}	0,9523
BN/CA _{10phr}	0,9654
BN/CA _{15phr}	0,9764
BN/CA _{20phr}	0,9771
BN/NC _{5phr}	0,9545
BN/NC _{10phr}	0,9690
BN/NC _{15phr}	0,9890
BN/NC _{20phr}	1,0071

Fonte: Autoria própria.

A representação gráfica dos valores de massa específica em função do teor e do tipo de carga é apresentada na Figura 29, permitindo uma comparação visual direta entre os sistemas contendo CA residual e NC.

Figura 29. Massa específica dos compósitos de borracha natural contendo carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), em função do teor de carga.



Fonte: Autoria própria.

A amostra de BN pura apresentou o menor valor de massa específica ($0,9437 \text{ g/cm}^3$), condizente com a ausência de cargas minerais em sua formulação. A incorporação progressiva de CA resultou em aumentos sucessivos: $0,9523 \text{ g/cm}^3$ (5 phr), $0,9654 \text{ g/cm}^3$ (10 phr), $0,9764 \text{ g/cm}^3$ (15 phr) e $0,9771 \text{ g/cm}^3$ (20 phr) (Khalil et al., 2022). Esse comportamento decorre da introdução de partículas sólidas na matriz, aumentando sua densidade global. Contudo, os valores permanecem relativamente baixos, o que reflete a natureza leve e porosa do CA. Estudos demonstram que a elevada micro e mesoporosidade do CA limita o ganho de densificação em sistemas poliméricos, mesmo em teores elevados (Bülbül; Ergün, 2024b; Khalil et al., 2022; Lee; Choi, 2020; Yim et al., 2023).

Já os compósitos com NC apresentaram valores sistematicamente superiores, atingindo $1,0071 \text{ g/cm}^3$ na formulação com 20 phr. Esse desempenho pode ser explicado pela maior

densidade intrínseca do NC, sua granulometria reduzida e a capacidade de empacotamento mais eficiente na matriz elastomérica, além da elevada interação interfacial que reduz a presença de vazios (Gobetti et al., 2024a).

A diferença entre os sistemas contendo CA e NC evidencia a influência das características morfológicas e superficiais das cargas no controle da massa específica. O CA, mesmo em concentrações mais altas, promove apenas aumentos moderados, o que pode ser vantajoso em aplicações que exigem redução de peso sem perda expressiva de desempenho (Tapangnoi et al., 2022). Em contrapartida, o NC, por sua natureza mais densa e maior eficiência como carga reforçante, resulta em compósitos mais pesados, porém mecanicamente superiores.

Assim, a substituição parcial do NC por CA, principalmente nas formulações com 5 e 10 phr, permite a obtenção de compósitos com menor massa específica e propriedades compatíveis com aplicações técnicas. Essa estratégia representa um avanço alinhado aos princípios da sustentabilidade e da economia circular, ao promover a valorização de resíduos e o desenvolvimento de materiais ambientalmente eficientes (Intapun et al., 2021; Miedzianowska-Masłowska; Masłowski; Strzelec, 2025b; Tapangnoi et al., 2022).

5.4.4 – Resistência à abrasão

A resistência ao desgaste por abrasão constitui uma propriedade fundamental para compósitos elastoméricos destinados a aplicações que envolvem contato mecânico contínuo, atrito e solicitações dinâmicas, como solados de calçados, correias transportadoras, revestimentos técnicos e componentes antivibratórios. Essa propriedade está diretamente relacionada à capacidade do material em manter sua integridade superficial sob esforços repetitivos e é influenciada por fatores como dureza, dispersão das partículas e qualidade da interação interfacial entre matriz e carga reforçante, conforme amplamente discutido na literatura (Tapangnoi et al., 2022).

No presente estudo, a resistência à abrasão dos compósitos de borracha natural foi avaliada para a borracha pura (BN) e para formulações contendo diferentes teores de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC), com o objetivo de analisar a influência do tipo e da concentração de carga sobre o comportamento ao desgaste.

Tabela 8. Perda volumétrica por abrasão ($\text{mm}^3 \cdot 40 \text{ m}^{-1}$) dos compósitos de borracha natural (BN) com diferentes teores de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC).

Amostra do Compósito	Perda volumétrica ($\text{mm}^3/40 \text{ m}$)
----------------------	--

BN	171 ± 20
BN/CA _{5phr}	224 ± 28
BN/CA _{10phr}	291 ± 20
BN/CA _{15phr}	351 ± 33
BN/CA _{20phr}	204 ± 13
BN/NF _{5phr}	122 ± 9
BN/NF _{10phr}	110 ± 9
BN/NF _{15phr}	100 ± 6
BN/NF _{20phr}	103 ± 9

Fonte: Autoria própria.

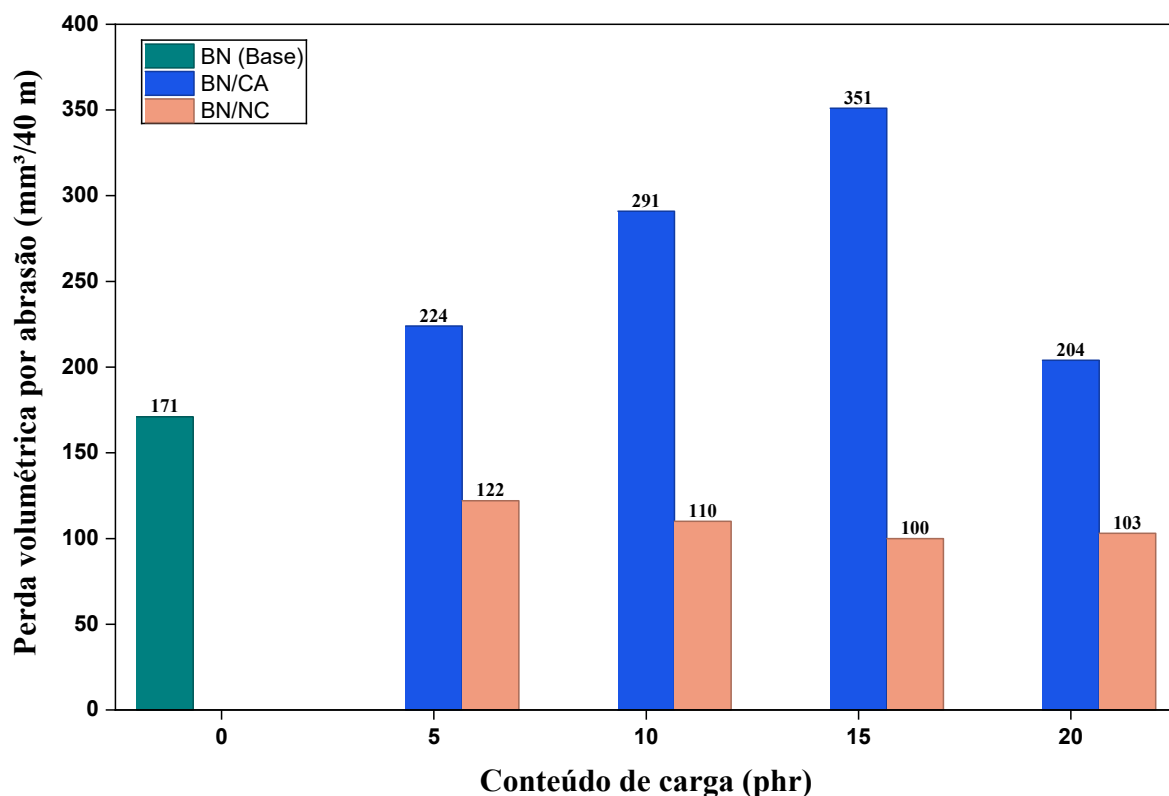
A partir dos dados apresentados na Tabela 8, observa-se que a incorporação do carvão ativado residual resultou em aumento progressivo da perda volumétrica por abrasão com o incremento do teor de carga, especialmente até 15 phr, indicando maior suscetibilidade ao desgaste mecânico em comparação à borracha natural pura. Para a formulação BN/CA_{15phr}, registrou-se a maior perda volumétrica ($351 \pm 33 \text{ mm}^3/40 \text{ m}$), sugerindo que, nesse teor, a eficiência do sistema matriz–carga ainda é limitada em termos de resistência ao desgaste.

Esse comportamento pode estar associado à natureza porosa e à morfologia irregular do carvão ativado residual, características que, segundo a literatura, tendem a favorecer a dispersão heterogênea e o destacamento de partículas durante o atrito, reduzindo a eficiência do material como carga de reforço em condições abrasivas (De Carvalho et al., 2024).

Por outro lado, para a formulação BN/CA_{20phr}, verifica-se uma redução da perda volumétrica em relação ao teor de 15 phr, indicando um possível efeito de melhor empacotamento das partículas ou alterações na distribuição da carga na matriz. Esse comportamento pode estar relacionado a mudanças na dispersão e na organização da rede elastomérica, bem como a variações na densidade de ligações cruzadas do sistema, aspectos que influenciam indiretamente a resistência ao desgaste.

A Figura 30 apresenta, de forma comparativa, a variação da perda volumétrica por abrasão em função do teor de carga, permitindo visualizar com maior clareza as diferenças de desempenho entre os compósitos contendo carvão ativado residual e aqueles reforçados com negro de fumo.

Figura 30. Perda volumétrica por abrasão ($\text{mm}^3 \cdot 40 \text{ m}^{-1}$) dos compósitos de borracha natural (BN) em função do teor de carvão ativado residual (CA) e negro de carbono (NC).



Fonte: Autoria própria.

Em contraste, os compósitos reforçados com negro de carbono apresentaram desempenho significativamente superior em relação à resistência à abrasão, evidenciando a eficiência dessa carga convencional como agente de reforço. As perdas volumétricas variaram de $122 \pm 9 \text{ mm}^3/40 \text{ m}$ para 5 phr a $100 \pm 6 \text{ mm}^3/40 \text{ m}$ para 15 phr, correspondendo a uma redução de aproximadamente 60 a 70 % em relação à borracha natural pura e de até 70 % quando comparados ao sistema BN/CA_{15phr}. Esse comportamento está em concordância com a literatura, que atribui o elevado desempenho do negro de fumo à sua estrutura grafitica, elevada área superficial, boa dispersão na matriz elastomérica e à predominância de interações físicas eficientes, além do efeito lubrificante que contribui para a redução do atrito superficial (Lubura et al., 2023).

De modo geral, os resultados indicam que o carvão ativado residual apresenta desempenho inferior ao negro de carbono no que se refere à resistência ao desgaste abrasivo. No entanto, seu uso pode ser considerado tecnicamente viável em formulações sustentáveis destinadas

a aplicações de menor exigência mecânica. O teor de 10 phr representa um ponto de equilíbrio entre desempenho funcional e incorporação de resíduo, possibilitando a substituição parcial do negro de fumo em aplicações não estruturais, alinhando critérios técnicos e ambientais.

5.5 – Considerações finais sobre desempenho técnico e sustentabilidade

Os resultados obtidos confirmam que o carvão ativado (CA) residual, proveniente de filtros domésticos saturados, apresenta potencial técnico e ambiental para atuar como carga funcional alternativa ao negro de carbono (NC) em compósitos de borracha natural (BN). Entre as formulações avaliadas, a amostra BN/CA_{10phr} destacou-se como a de melhor desempenho global, conciliando resistência mecânica, estabilidade dimensional e comportamento de abrasão compatível com aplicações de exigência moderada.

Em concentrações de até 10 phr, o CA promoveu aumento da dureza Shore A, melhoria da resistência à tração e redução discreta do alongamento na ruptura, indicando reforço efetivo sem perda acentuada de elasticidade. Esse comportamento reflete uma dispersão adequada das partículas e interação interfacial satisfatória entre carga e matriz, possibilitando uma boa transferência de tensão e estrutura de rede estável (Bülbül; Ergün, 2024b; Intapun et al., 2021). Em contrapartida, teores superiores a 15 phr favoreceram a aglomeração e o destacamento de partículas, o que resultou em queda de desempenho na abrasão, com perdas volumétricas acima de 300 mm³/40 m, indicando limitação no reforço devido à saturação da matriz e à menor coesão interfacial.

A caracterização por fluorescência de raios X (XRF) revelou composição predominantemente carbonácea (99,24 %) e baixos teores de metais potencialmente tóxicos, confirmando a viabilidade ambiental da reutilização do resíduo. Resultados semelhantes foram observados em estudos recentes de carvão ativado obtido de biomassa natural, nos quais a alta pureza elementar e a ausência de metais pesados evidenciam seu caráter ambientalmente seguro (Djezzar et al., 2024).

Sob a ótica da sustentabilidade, a substituição parcial do NC por CA residual representa uma rota técnica viável e ambientalmente vantajosa, reduzindo a dependência de insumos petroquímicos e promovendo a valorização de resíduos urbanos de alta geração. Essa incorporação controlada alinha o desenvolvimento de compósitos elastoméricos aos princípios da economia circular, favorecendo a transição para uma indústria de materiais de menor impacto ambiental (Miedzianowska-Masłowska; Masłowski; Strzelec, 2025b).

Portanto, a formulação BN/CA_{10phr} pode ser considerada tecnicamente otimizada, unindo desempenho mecânico satisfatório, processabilidade estável e benefícios ambientais, constituindo

uma alternativa de reforço sustentável e de baixo custo para aplicações industriais de média solicitação mecânica.

6. Conclusão

Este estudo comprovou a viabilidade técnica, ambiental e econômica do reaproveitamento de carvão ativado residual de filtros domésticos como carga funcional substitutiva ao negro de carbono em compósitos de borracha natural vulcanizada. Os resultados experimentais demonstraram que a amostra BN/CA_{10phr} apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho mecânico e sustentabilidade, com ganhos expressivos em resistência à tração, aumento moderado de dureza e comportamento satisfatório frente à abrasão ($\approx 291 \pm 20 \text{ mm}^3/40 \text{ m}$).

A incorporação de 10 phr de CA residual possibilitou reforço estrutural sem comprometer a elasticidade da matriz, enquanto teores mais elevados ($\geq 15 \text{ phr}$) resultaram em aglomeração de partículas e redução significativa do desempenho. A comparação direta com o NC mostrou que, embora o CA apresente desempenho inferior em termos de resistência ao desgaste, sua eficiência em propriedades de tração e dureza em baixos teores o torna tecnicamente competitivo em aplicações não estruturais.

As análises químicas (XRF) e morfológicas confirmaram que o material é majoritariamente carbonáceo e livre de contaminantes relevantes, assegurando sua segurança ambiental. Assim, o reaproveitamento de CA residual representa uma estratégia concreta de valorização de resíduos urbanos e redução da dependência de cargas petroquímicas, configurando-se como uma solução alinhada aos princípios da economia circular e da química verde.

Do ponto de vista econômico, o uso do CA residual oferece vantagens expressivas em redução de custos, sem comprometer o desempenho mecânico essencial para aplicações em produtos técnicos de borracha, como calçados, vedações, bases antivibratórios e componentes flexíveis.

Conclui-se, portanto, que a substituição parcial do negro de carbono por 10 phr de CA residual constitui o ponto ótimo de equilíbrio entre desempenho técnico, viabilidade ambiental e competitividade econômica. Essa proporção garante reforço eficiente, mantém propriedades mecânicas adequadas e contribui para a mitigação de impactos ambientais por meio da reutilização de resíduos carbonáceos pós-consumo.

Para estudos futuros, recomenda-se a análise de durabilidade e envelhecimento acelerado, testes de escalonamento industrial e a avaliação de formulações híbridas com cargas

complementares ou aditivos compatibilizantes, visando aprimorar a adesão interfacial e expandir o campo de aplicação dos compósitos desenvolvidos.

Assim, esta dissertação reforça a importância estratégica da ciência dos materiais aplicada à sustentabilidade, ao demonstrar que resíduos urbanos de alto volume, como o carvão ativado de filtros domésticos, pode ser transformados em insumos funcionais de valor agregado, promovendo uma transição efetiva para uma indústria elastomérica mais limpa, circular e resiliente.

7. Referências

ABBAS, S. H.; AL-JUOTHRY, S. A. The influence of surface area and structure of carbon black particles on cure characteristics and mechanical properties of natural rubber. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*. [S.l.]: IJARET, 2014. Disponível em: <www.iaeme.com/ijaret.asp>.

AFZAL, Ali; MAHREEN, Naima. Emerging insights into the impacts of heavy metals exposure on health, reproductive and productive performance of livestock. *Frontiers in Pharmacology*, v. 15, 19 mar. 2024.

ALBELADI, Nawaf; MOKAYA, Robert. Modulating the porosity of N-doped carbon materials for enhanced CO₂ capture and methane uptake. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 12, n. 32, p. 21025–21040, 2024.

ALVARINO, Lauro Adeilson da Silva *et al.* Antibacterial Potential of Activated Carbon Impregnated with Garlic Extract. *Processes* 2023, Vol. 11, Page 2948, v. 11, n. 10, p. 2948, 11 out. 2023.

ALVES, Adenes Teixeira *et al.* The Potential of Activated Carbon in the Treatment of Water for Human Consumption, a Study of the State of the Art and Its Techniques Used for Its Development. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, v. 12, n. 06, p. 143–153, 10 jun. 2021.

ALVES DOS SANTOS, Marcos. DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPOSTOS ELASTOMÉRICOS COM BIOCHAR PARA UTILIZAÇÃO COMO CARGA EM COMPOSTOS ELASTOMÉRICOS A BASE DE POLI (BUTADIENO-CO-ESTIRENO). [S.l.: S.n.].

AMIRFAKHRI, Seyed Javad *et al.* Enhanced PFBS adsorption via silver-impregnated activated carbon: Mechanistic insights and Thermodynamic analysis. *Chemosphere*, v. 375, 1 abr. 2025.

ANSARIFAR, Ali. Mineral Kaolin-A Highly Versatile Filler for Rubber. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-03/documents/pahs_factsheet_>.

ANTONIO, Marco; DUARTE, Calazans. Tratamento de água para consumo humano de reservatório eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração. São Carlos: Universidade de São Paulo, 25 fev. 2011.

APARECIDA, Nilva *et al.* AVALIAÇÃO DE FILTROS DOMÉSTICOS COMERCIAIS PARA PURIFICAÇÃO DE ÁGUAS E RETENÇÃO DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS. *[S.l.: S.n.]*.

ARAÚJO, Larissa Sene. Comparação do desempenho de carvão ativado produzido a partir de diferentes matrizes para remoção de microcistina-LR de águas de abastecimento. 7 mar. 2017.

ASHEGHMOALLA, Mina; MEHRVAR, Mehrab. Adsorption of a Multicomponent Pharmaceutical Wastewater on Charcoal-Based Activated Carbon: Equilibrium and Kinetics. *Water* 2024, Vol. 16, Page 2086, v. 16, n. 15, p. 2086, 24 jul. 2024.

ASTM INTERNATIONAL. Test Method for Rubber Property--Durometer Hardness. West Conshohocken, PA ASTM International, , 1 ago. 2015. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D2240-15>>

AZEH ENGWA, Godwill *et al.* Mechanism and Health Effects of Heavy Metal Toxicity in Humans Autores: Godwill Azeh Engwa, Paschaline Udoka Ferdinand, Friday Nweke Nwalo, Marian N. Unachukwu. *[S.l.: S.n.]*.

AZEVEDO, Rita de Cássia de Araújo. ESTUDO DE REGENERAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO SATURADO UTILIZANDO DIÓXIDO DE CARBONO COMO FLUIDO

SUPERCRÍTICO. *In:* Editora Integrar, 11 jul. 2023. Disponível em: <<https://ime.events/consamei2023/pdf/21316>>

BACARIN, Giovani B. *et al.* Natural rubber composites with Grits waste from cellulose industry. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, n. 4, p. 1126–1139, 21 jul. 2020.

BALASOORIYA, Winoj *et al.* The Effect of the Surface Area of Carbon Black Grades on HNBR in Harsh Environments. *Polymers* 2019, Vol. 11, Page 61, v. 11, n. 1, p. 61, 4 jan. 2019.

BARDHA, Alexander; PRASHER, Shiv; DUMONT, Marie-Josée. Waste biomass-derived rubber composite additives: Review of current research and future investigations into biowaste tire formulation. *Biomass and Bioenergy*, v. 183, p. 107149, 1 abr. 2024.

BARRERA TORRES, G. *et al.* Application of Post-Industrial Leather Waste for the Development of Sustainable Rubber Composites. *Polymers*, v. 17, n. 2, p. 190, 14 jan. 2025.

BELHACHEMI, Meriem *et al.* Preparation of activated carbon from date pits: Effect of the activation agent and liquid phase oxidation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 86, n. 1, p. 168–172, 1 set. 2009.

BERNI, J. V. ;. DE CESARO, J. P. V. ;. SCHEUFELLE, F. B. ;. VIEIRA, M. F. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CARVÃO ATIVADO PROVENIENTE DO CAROÇO DE AÇAÍ. *[S.l.: S.n.]*.

BESEGATTO, Stefane Vieira. Desenvolvimento de catalisadores à base de óxidos metálicos mistos para degradação de contaminantes químicos orgânicos em ambiente escuro. 2021.

BESSEN, Gina Rizpah *et al.* (ORGS.). 14 Anos da Política Nacional de Resíduos Sólidos: instrumentos de implementação inovação e reflexões críticas. *[S.l.]*: Universidade de São Paulo. Instituto de Energia e Ambiente, 2025.

BHATNAGAR, Amit *et al.* An overview of the modification methods of activated carbon for its water treatment applications. *Chemical Engineering Journal*, v. 219, p. 499–511, 1 mar. 2013.

BIESSIKIRSKI, Andrzej *et al.* Evaluation of the Porosity and Morphology of Microstructured Charcoal. *Materials* 2025, Vol. 18, Page 1730, v. 18, n. 8, p. 1730, 10 abr. 2025.

BITTENCOURT, Nathalia Leite *et al.* Natural rubber composites reinforced with Dregs residue from cellulose Kraft industry. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, v. 36, n. 2, p. 102–114, 1 maio 2020.

BOGDAHN, Sebastian *et al.* Application of recovered Carbon Black (rCB) by Waste Tire Pyrolysis as an Alternative Filler in Elastomer Products. *Advanced Materials & Sustainable Manufacturing* 2025, Vol. 2, Page 10008, v. 2, n. 2, p. 10008, 29 abr. 2025.

BOKOBZA, Liliane. Natural Rubber Nanocomposites: A Review. *Nanomaterials* 2019, Vol. 9, Page 12, v. 9, n. 1, p. 12, 22 dez. 2018.

BRITA. Ficha técnica do filtro Brita® LONGLAST+® (Modelo #OB06). Disponível em: <<https://www.brita.com/longlast-plus-ob06>>. Acesso em: 21 out. 2025.

BÜLBÜL, Şaban; ERGÜN, Halime. Investigation of the usability of activated carbon as a filling material in nitrile butadiene rubber/natural rubber components and modeling by regression analysis. *Journal of Elastomers & Plastics*, v. 56, n. 1, p. 53–73, 1 fev. 2024a.

BUNKER, Brendan; DVORAK, Bruce; ALY HASSAN, Ashraf. Thermal Regeneration of Activated Carbon Used as an Adsorbent for Hydrogen Sulfide (H₂S). *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 6435, v. 15, n. 8, p. 6435, 10 abr. 2023.

BYERS, Harris L.; MCHENRY, Lindsay J.; GRUNDL, Timothy J. XRF techniques to quantify heavy metals in vegetables at low detection limits. *Food Chemistry: X*, v. 1, p. 100001, mar. 2019.

CASTAÑO-RIVERA, Patricia *et al.* In Situ Silanization of Ligno-Cellulosic Microfibers Derived from Industrial Waste to Enhance Mechanical Properties of Natural Rubber Compounds. *Polysaccharides*, v. 6, n. 3, p. 70, 8 ago. 2025.

CHAIKUMPOLLERT, Oraphin *et al.* Mechanical properties and cross-linking structure of cross-linked natural rubber. *Polymer Journal*, v. 44, n. 8, p. 772–777, 6 ago. 2012.

CHAROEYTHORNKHAJHORNCHAI, Pollawat *et al.* Enhancement of Mechanical Properties of Natural Rubber Filled Activated Carbon Materials from Agricultural Waste. *Journal of Renewable Materials*, v. 13, n. 4, p. 817–827, 21 abr. 2025.

CHEN, Guifang *et al.* Performance of Powdered Activated Coke Produced by One-Step Rapid Process from Lignite: Phenol Adsorption from Synthetic Wastewater and Hydrothermal Regeneration. *Water* 2025, Vol. 17, Page 1161, v. 17, n. 8, p. 1161, 13 abr. 2025.

CHOO, Hyunwook; WON, Jongmuk; BURNS, Susan E. Thermal conductivity of dry fly ashes with various carbon and biomass contents. *Waste Management*, v. 135, p. 122–129, 1 nov. 2021.

CHU, Qingchen *et al.* Optimization of Mechanical and Dynamic Properties of Tread Rubber Using Fumed Silica and Hydration Processing. *Polymers*, v. 17, n. 6, 1 mar. 2025.

COLOM, Xavier; CAÑAVATE, Javier; CARRILLO-NAVARRETE, Fernando. Towards Circular Economy by the Valorization of Different Waste Subproducts through Their Incorporation in Composite Materials: Ground Tire Rubber and Chicken Feathers. *Polymers*, v. 14, n. 6, p. 1090, 1 mar. 2022.

COMISSÃO EUROPEIA. Decisão de Execução (UE) 2018/1147 da Comissão de 10 de agosto de 2018. *[S.l.: S.n.]*.

COSTA PIMENTEL, Hudson *et al.* Produção e uso de filtros de água com carvão ativado derivado de matérias sustentáveis. *Journal of Health & Biological Sciences*, v. 10, n. 1, p. 1–7, 22 nov. 2022.

CRISTINO, Nicolle Regina *et al.* AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE CINZAS DE FUNDO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE PARA USO EM COBERTURA FINAL DE ATERROS SANITÁRIOS. *[S.l.: S.n.]*.

CRISTÓVÃO, Marta Alexandra Modesto. Avaliação de sistemas híbridos LCM e adsorção em carvão ativado na remoção de fármacos. *[S.l.: S.n.]*.

CRUZ; BELEZA, Priscila. Atributos do solo em área de descartes de resíduos urbanos no Sul do Amazonas. Humaitá (AM): Universidade Federal do Amazonas (campus Humaitá), 3 fev. 2025.

DA SILVA, Adrielli C. P. *et al.* Functionalization of activated carbon with melamine binder for adsorption of metallic species from aqueous environments. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2024.

DA SILVA, Janice. Estudo da eficiência e aplicabilidade de carvão ativado resultante de pirólise de casca de arroz em barreiras reativas na remoção de contaminantes em solos. *[S.l.: S.n.]*.

DADKHAH, Mehran; MESSORI, Massimo. A comprehensive overview of conventional and bio-based fillers for rubber formulations sustainability. *Materials Today Sustainability*, v. 27, p. 100886, 1 set. 2024.

DA'NA, Enshirah; AWAD, Awatif. Regeneration of spent activated carbon obtained from home filtration system and applying it for heavy metals adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 5, n. 4, p. 3091–3099, 1 ago. 2017.

DE CARVALHO, Arthur Pimentel *et al.* Sustainable Composites: Analysis of Filler–Rubber Interaction in Natural Rubber–Styrene–Butadiene Rubber/Polyurethane Composites Using the Lorenz–Park Method and Scanning Electron Microscopy. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 471, v. 16, n. 4, p. 471, 8 fev. 2024.

DE PAIVA, Fábio Friol Guedes *et al.* Sugarcane bagasse fiber as semi-reinforcement filler in natural rubber composite sandals. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 21, n. 2, p. 326–335, 15 mar. 2019.

DEMIRAL, İlknur; SAMDAN, Canan; DEMIRAL, Hakan. Enrichment of the surface functional groups of activated carbon by modification method. *Surfaces and Interfaces*, v. 22, p. 100873, 1 fev. 2021.

DENG, Jianping *et al.* Nano silver oxide-modified activated carbon as a novel catalyst for efficient removal of bacteria and micropollutants in aquatic environment. *RSC Advances*, v. 14, n. 41, p. 30180–30191, 23 set. 2024.

DIKOBÉ, Paki Israel *et al.* Removal of contaminants of emerging concern from drinking water using bio-based activated carbon. *Journal of Water Process Engineering*, v. 68, p. 106313, 1 dez. 2024.

DJEZZAR, Zohra *et al.* Characterization of activated carbon produced from the green algae *Spirogyra* used as a cost-effective adsorbent for enhanced removal of copper(ii): application in industrial wastewater treatment. *RSC Advances*, v. 14, n. 8, p. 5276–5289, 9 fev. 2024.

DOS SANTOS, Renivaldo José *et al.* Sugarcane bagasse ash: new filler to natural rubber composite. *Polímeros*, v. 24, n. 6, p. 646–653, 1 nov. 2014.

EL GAMAL, Maisa *et al.* Bio-regeneration of activated carbon: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, v. 197, p. 345–359, 31 maio 2018a.

EL-KHATIB, Ahmed M. *et al.* Novel slag/natural rubber composite as flexible material for protecting workers against radiation hazards. *Scientific Reports*, v. 13, n. 1, 1 dez. 2023.

EL-WAKIL, Ahmad M. *et al.* Triazine-Based Functionalized Activated Carbon Prepared from Water Hyacinth for the Removal of Hg²⁺, Pb²⁺, and Cd²⁺ Ions from Water. *ACS Omega*, v. 7, n. 7, p. 6058–6069, 22 fev. 2022.

EPA, Us. Community Guide to Granular Activated Carbon Treatment. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://clu-in.org/>>.

FERIANCOVÁ, Andrea *et al.* Modification of the Filler based on Kaolin and its Use in the Polymer Composites. MATEC Web of Conferences, v. 357, p. 07004, 2022.

FERREIRA, Ilomara Vasconcelos. Carvão ativado de resíduo de Baru para adsorção de fármacos. [S.l.: S.n.].

FILGUEIRA, Matheus da Silva *et al.* Evaluation of the Antioxidant Properties of Black Acacia (*Acacia mearnsii*) Tannin in Vulcanized Natural Rubber Using Different Vulcanization Systems. Sustainability 2024, Vol. 16, Page 11213, v. 16, n. 24, p. 11213, 20 dez. 2024.

FORMELA, Krzysztof *et al.* Processing and structure–property relationships of natural rubber/wheat bran biocomposites. Cellulose, v. 23, n. 5, p. 3157–3175, 1 out. 2016.

FOUDA-MBANGA, Bienvenu Gael; ONOTU, O. P.; TYWABI-NGEVA, Zikhona. Advantages of the reuse of spent adsorbents and potential applications in environmental remediation: A review. Green Analytical Chemistry, v. 11, p. 100156, 1 dez. 2024.

FUNDNEIDER, T. *et al.* Empty bed contact time: The key for micropollutant removal in activated carbon filters. Water Research, v. 191, 1 mar. 2021.

GALAN, Crislaine Rodrigues. Impregnação de carvão ativado com nanopartículas de cobre por um método de síntese verde utilizando extrato de folhas de moringa oleífera para remoção de nitrato da água. [S.l.: S.n.].

GEÇA, Marlena *et al.* Surface Treatment of Biochar—Methods, Surface Analysis and Potential Applications: A Comprehensive Review. Surfaces, v. 6, n. 2, p. 179–213, 2 jun. 2023.

GEORGIN, Jordana *et al.* Adsorption of the First-Line Covid Treatment Analgesic onto Activated Carbon from Residual Pods of *Erythrina Speciosa*. Environmental Management, v. 71, n. 4, p. 795–808, 1 abr. 2023.

GKIKI, Despina A. *et al.* Cost-effectiveness of regenerated green materials for removal of pharmaceuticals from wastewater. *Waste Management*, v. 204, p. 114952, 1 ago. 2025.

GOBETTI, Anna *et al.* A novel and sustainable rubber composite prepared from electric arc furnace slag as carbon black replacement. *Carbon Resources Conversion*, v. 7, n. 4, p. 100230, 1 dez. 2024a.

GREENOUGH, Stephanie; DUMONT, Marie Josée; PRASHER, Shiv. The physicochemical properties of biochar and its applicability as a filler in rubber composites: A review. *Materials Today Communications*, v. 29, p. 102912, 1 dez. 2021.

GUERREIRO, Érica Machado da Silva. Aproveitamento energético a partir de pré-processamento de resíduos: análise panorâmica comparativa com foco nos casos de Brasil e Alemanha. 6 maio 2025.

GUTKOSKI, Júlia Pedó; SCHNEIDER, Elisângela Edila; MICHELS, Camila. How effective is biological activated carbon in removing micropollutants? A comprehensive review. *Journal of Environmental Management*, v. 349, p. 119434, 1 jan. 2024.

HAN, Qiaoning *et al.* High adsorption of methylene blue by activated carbon prepared from phosphoric acid treated eucalyptus residue. *Powder Technology*, v. 366, p. 239–248, 15 abr. 2020.

HIRANOBE, Carlos Toshiyuki *et al.* Cross-Linked Density Determination of Natural Rubber Compounds by Different Analytical Techniques. *Materials Research*, v. 24, n. S1, p. e20210041, 23 jul. 2021.

HIRANOBE, CT. Avaliação da densidade de ligações cruzadas da borracha natural reticulada em diferentes sistemas de vulcanização por meio de ensaios mecânicos. *[S.l.]*: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), 2020a.

HUABCHAROEN, Potchanaporn *et al.* Purification and Characterization of Silica from Sugarcane Bagasse Ash as a Reinforcing Filler in Natural Rubber Composites. *BioResources*, v. 12, n. 1, 4 jan. 2017.

HUANG, Feifan *et al.* Microwave thermal regeneration characteristics of spent activated carbon based on a coupled electromagnetic, heat and mass transfer multiphase porous media model. *Energy*, v. 292, p. 130437, 1 abr. 2024.

HWANG, Sang Youp *et al.* Pre-Treatment Methods for Regeneration of Spent Activated Carbon. *Molecules*, v. 25, n. 19, p. 4561, 1 out. 2020.

HYEON, Geon Woong *et al.* Optimization of Activated Carbon Synthesis from Spent Coffee Grounds for Enhanced Adsorption Performance. *Molecules*, v. 30, n. 12, 1 jun. 2025.

ICC; EY. Putting the circular economy into motion: From barriers to opportunities. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <www.iccwbo.org/news-publications/policies-reports/Putting-the-circular-economy-into-motion-from-barriers-to-opportunities>. Acesso em: 20 set. 2025.

IMARC GROUP. Cellulose Acetate Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2024-2032. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com/cellulose-acetate-market?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 26 set. 2025.

INPHONLEK, Supharat *et al.* Synergistic Effects of Hybrid Bio-Fillers and Modified Natural Rubber on Natural Rubber Composite Properties. *Polymers* 2025, Vol. 17, Page 632, v. 17, n. 5, p. 632, 26 fev. 2025a.

INTAPUN, Jutharat *et al.* The Characteristics of Natural Rubber Composites with Klason Lignin as a Green Reinforcing Filler: Thermal Stability, Mechanical and Dynamical Properties. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 1109, v. 13, n. 7, p. 1109, 31 mar. 2021.

IRAZUSTA, Silvia Pierre *et al.* Determinação da capacidade adsorptiva (Ca) de carvão ativado granulado (Cag) usado em filtros químicos para retenção de vapores orgânicos. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 11, p. e1809119662–e1809119662, 11 nov. 2020.

IWANOW, Melanie *et al.* Activated carbon as catalyst support: precursors, preparation, modification and characterization. Beilstein Journal of Organic Chemistry, v. 16, p. 1188, 2 jun. 2020.

J. JEYARAJ PANDIAN; T. GOVINDAN. Comparative Studies on the Mechanical Properties of Natural Rubber and Natural Rubber Carbon Black Composites. International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE), v. 13, 2015.

JAWAD, Ali H. *et al.* Insights into the modeling, characterization and adsorption performance of mesoporous activated carbon from corn cob residue via microwave-assisted H₃PO₄ activation. Surfaces and Interfaces, v. 21, p. 100688, 1 dez. 2020.

JUNKONG, Preeyanuch *et al.* Effect of fatty acids on the accelerated sulfur vulcanization of rubber by active zinc/carboxylate complexes. RSC Advances, v. 10, n. 8, p. 4772, 2020.

KARUNANAYAKE, Laleen *et al.* Role and potential of biochar as a sustainable alternative reinforcing filler to carbon black in rubber composites. Biochar, v. 7, n. 1, p. 60, 18 mar. 2025a.

KAYIWA, R. *et al.* Upcycling spent activated carbon from wastewater treatment systems: Industrial and ecological options. International Journal of Environmental Science and Technology, v. 22, n. 8, p. 7445–7458, 1 abr. 2025.

KĘDZIA, Jacek; HAPONIUK, Józef; FORMELA, Krzysztof. Natural Rubber Latex Wastes from Balloon Production as Valuable Source of Raw Material: Processing, Physico-Mechanical Properties, and Structure. Journal of Composites Science, v. 8, n. 9, p. 365, 18 set. 2024.

KHALIL, Yas *et al.* Investigating the Feasibility of Processing Activated Carbon/UHMWPE Polymer Composite Using Laser Powder Bed Fusion. Polymers, v. 14, n. 16, p. 3320, 1 ago. 2022.

KIM, Do Young *et al.* Correlation between the crosslink characteristics and mechanical properties of natural rubber compound via accelerators and reinforcement. *Polymers*, v. 12, n. 9, p. 2020, 2020a.

KIM, Gyung Hyun *et al.* Influence of Carbon Black and Silica Fillers with Different Concentrations on Dielectric Relaxation in Nitrile Butadiene Rubber Investigated by Impedance Spectroscopy. *Polymers*, v. 14, n. 1, p. 155, 1 jan. 2022.

KIM, Ji Hyun *et al.* Impact of the oxygen functional group of nitric acid-treated activated carbon on KOH activation reaction. *Carbon Letters*, v. 29, n. 3, p. 281–287, 1 jun. 2019.

KIM, SM; NAM, CS; KIM, KJ. feitos dos aceleradores TMTD, MBTS e CBS em um composto de borracha natural preenchido com sílica sobre as propriedades de vulcanização. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/286499036_TMTD_MBTS_and_CBS_accelerator_effects_on_a_silica_filled_natural_rubber_compound_upon_vulcanization_properties>. Acesso em: 16 set. 2025.

KORIEM, Adel A. *et al.* Management of agricultural waste to manufacture biochar: An alternative reinforcing filler for carbon black in nitrile butadiene rubber composites. *Journal of Cleaner Production*, v. 428, p. 139360, 20 nov. 2023.

KYEI-MANU, William Amoako *et al.* The Influence of Colloidal Properties of Carbon Black on Static and Dynamic Mechanical Properties of Natural Rubber. *Polymers*, v. 14, n. 6, p. 1194, 1 mar. 2022.

LAITHONG, Tawan *et al.* Quality improvement of recycled carbon black from waste tire pyrolysis for replacing carbon black N330. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 1–17, 1 dez. 2025.

LEE, Jaeseon *et al.* A Study on Aqueous Dispersing of Carbon Black Nanoparticles Surface-Coated with Styrene Maleic Acid (SMA) Copolymer. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 5455, v. 14, n. 24, p. 5455, 13 dez. 2022.

LEE, Jungsoo; CHOI, Young Cheol. Pore Structure Characteristics of Foam Composite with Active Carbon. *Materials* 2020, Vol. 13, Page 4038, v. 13, n. 18, p. 4038, 11 set. 2020.

LEITE, Bruna Jann. Remoção de glifosato em meio aquoso usando carvão ativado proveniente de resíduos da casca da Acácia Negra (*Acácia mearnsii* De Wild). Universidade Federal do Pampa, , 31 mar. 2025. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/10160>>. Acesso em: 7 ago. 2025

LI, Yi *et al.* Study on the Properties of Rubber with Different Contents of Carbon Black. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 677, n. 2, 10 dez. 2019.

LI, Z. H.; ZHANG, J.; CHEN, S. J. Effects of carbon blacks with various structures on vulcanization and reinforcement of filled ethylene-propylene-diene rubber. *Express Polymer Letters*, v. 2, n. 10, p. 695–704, 2008.

LIU, Shan *et al.* Simultaneous regeneration of activated carbon and removal of adsorbed atrazine by ozonation process: From laboratory scale to pilot studies. *Water Research*, v. 251, p. 121113, 1 mar. 2024a.

LOTIFY, Vivian F.; BASTA, Altaf H.; SHAFIK, Emad S. Assessment the performance of chemical constituents of agro wastes in production safety alternative carbon black filler in rubber composite purpose. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 1–16, 1 dez. 2025a.

LUBURA, Jelena *et al.* Influence of biochar and carbon black on natural rubber mixture properties. *Polymer International*, v. 71, n. 11, p. 1347–1353, 3 nov. 2022.

LUBURA, Jelena *et al.* Natural Rubber Composites Using Hydrothermally Carbonized Hardwood Waste Biomass as a Partial Reinforcing Filler- Part I: Structure, Morphology, and Rheological Effects during Vulcanization. *Polymers*, v. 15, n. 5, p. 1176, 26 fev. 2023.

LUBURA STOŠIĆ, Jelena *et al.* Herbal Waste from Filter-Tea Production as Eco-Friendly Ash for Sustainable Natural Rubber Composites. *Materials*, v. 18, n. 1, p. 204, 6 jan. 2025.

LUIZ KOWALSKI, Edemir. ANSELMO POMBEIRO AVALIAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE DUREZA SHORE A E O MÓDULO DE YOUNG EM MATERIAIS ELASTOMÉRICOS APLICADOS NA MANUTENÇÃO COM REDES ENERGIZADAS. [S.l.: S.n.].

MA, Hongfang *et al.* Removal of chromium (VI) from water by porous carbon derived from corn straw: Influencing factors, regeneration and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, v. 369, p. 550–560, 5 maio 2019.

MACIEJEWSKA, Magdalena; SOWIŃSKA, Anna; GROCHOLEWICZ, Agata. Zinc Complexes with 1,3-Diketones as Activators for Sulfur Vulcanization of Styrene-Butadiene Elastomer Filled with Carbon Black. *Materials*, v. 14, n. 14, p. 3804, 7 jul. 2021.

MAGO, Jonty; NEGI, Ashutosh; FATIMA, S. Vibration Damping Properties of Natural Rubber Composites Developed with Waste Carbonaceous Fillers *The Journal of Acoustical Society of India*. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/384284441>>.

MAILLER, R. *et al.* Mastering granular activated carbon filtration to remove organic micropollutants, antibiotic resistance and metals for municipal wastewater reuse. *Science of The Total Environment*, v. 952, p. 175918, 20 nov. 2024.

MARSZAŁEK, Anna; PUSZCZAŁO, Ewa. Evaluation of the use of regenerated activated carbons for the adsorption of phenol from a river. *Journal of Water and Land Development*, v. 59, p. 93–99, 2023.

MARSZAŁEK, Anna; PUSZCZAŁO, Ewa. Evaluation of the use of regenerated activated carbons for the adsorption of phenol from a river. *Journal of Water and Land Development*, v. 59, p. 93–99, 3 jan. 2024.

MARTIGNONI, Beatrix Nery Villa. Biofiltração de compostos orgânicos voláteis e gás sulfídrico em estações de despejos industriais de processamento de hidrocarbonetos. [S.l.: S.n.].

MARTINS, Isabela M. *et al.* Application of textile (PAN-based) activated carbon fibers decorated with silver nanoparticles in water treatment. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, p. 1100583, 10 jan. 2023.

MAUER, Carlos Eduardo Saraiva. Estudo da compatibilidade da casca do arroz como veículo dissipador de *Bacillus sp* num protótipo de lodos ativados para tratamento de esgoto doméstico. *[S.l.: S.n.]*.

MENG, Lingyi *et al.* Research Progress on Flue Gas Desulfurization and Denitrification by Activated Carbon Method. *Processes* 2025, Vol. 13, Page 1396, v. 13, n. 5, p. 1396, 3 maio 2025.

MIAN, Md Manik *et al.* Recent advances in activated carbon driven PFAS removal: structure-adsorption relationship and new adsorption mechanisms. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, v. 19, n. 6, p. 1–20, 1 jun. 2025.

MIEDZIANOWSKA-MASŁOWSKA, Justyna *et al.* Waste management of straw to manufacture biochar: An alternative reinforcing filler for natural rubber biocomposites. *Industrial Crops and Products*, v. 222, p. 119629, 15 dez. 2024.

MIEDZIANOWSKA-MASŁOWSKA, Justyna; MASŁOWSKI, Marcin; STRZELEC, Krzysztof. Biomass, Phyto-Ash, and Biochar from Beech Wood as Functional Additives for Natural Rubber-Based Elastomer Composites. *Materials*, v. 18, n. 7, p. 1659, 4 abr. 2025a.

MOSTAFA, A. *et al.* Insight into the effect of CB loading on tension, compression, hardness and abrasion properties of SBR and NBR filled compounds. *Materials & Design*, v. 30, n. 5, p. 1785–1791, 1 maio 2009.

MOSTONI, Silvia *et al.* Zinc-Based Curing Activators: New Trends for Reducing Zinc Content in Rubber Vulcanization Process. *Catalysts* 2019, Vol. 9, Page 664, v. 9, n. 8, p. 664, 2 ago. 2019.

MOTÚZOVÁ, Tereza; KOUTNÍK, Ivan; VRÁBLOVÁ, Martina. Removal of Pesticides from Water by Adsorption on Activated Carbon Prepared from Invasive Plants. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 235, n. 12, p. 1–18, 1 dez. 2024.

NAEBPETCH, Weerawut *et al.* Utilization of waste high calcium oxide fly ash as hybrid activator for vulcanization of natural rubber/carbon black composites: Reducing zinc oxide requirement. *Industrial Crops and Products*, v. 215, p. 118648, 1 set. 2024.

NASRUDDIN *et al.* Characterization of Natural Rubber, Styrene Butadiene Rubber, and Nitrile Butadiene Rubber Monomer Blend Composites Loaded with Zinc Stearate to Be Used in the Solid Tire Industry. *Applied Sciences*, v. 13, n. 3, p. 1277, 18 jan. 2023.

NBR 13221. ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

NEETHIRAJAN, Jeevanandham *et al.* Functional rubber composites based on silica-silane reinforcement for green tire application: the state of the art. *Functional Composite Materials*, v. 3, n. 1, p. 7, 31 out. 2022.

NEME, Ibsa; GONFA, Girma; MASI, Chandran. Castor seeds hull activated carbon impregnated with silver nanoparticles for removal of *Escherichia coli* from water. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 7, p. 100320, 1 jun. 2023.

NUILEK, Kanokon *et al.* Sustainable bio-reinforcing mangosteen peel biochar filler in styrene-butadiene rubber: Analysis of thermal, physical, mechanical, and dielectric properties. *Polymer Composites*, 2025.

NZEREUGU, P. U. *et al.* Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications. *Hybrid Advances*, v. 4, p. 100111, 1 dez. 2023.

OLIVEIRA, Thamayne Valadares de. Remoção de compostos sulfurados e nitrogenados presentes em combustível diesel utilizando processos adsortivos. *[S.l.: S.n.]*.

OLUPOT, Peter Wilberforce *et al.* Optimization of heavy metal removal by activated carbon obtained as a co-product from fast pyrolysis of rice husks. *Results in Materials*, v. 21, p. 100545, 1 mar. 2024.

ÖNCEL, Şehriban *et al.* Coffee grounds as sustainable filler for bio-based rubber composites. *Polymer Composites*, v. 45, n. 14, p. 12611–12623, 10 out. 2024.

ORNELLAS DO VALLE, Alexandre *et al.* Avaliação preliminar do processo PACT® no tratamento de efluente de refinaria. *[S.l.: S.n.]*.

PAI, Sung Jin *et al.* Swelling Behaviors of Natural Rubber/Solvent Systems Based on the Extended Modified Double Lattice Model. *Macromolecular Theory and Simulations*, v. 33, n. 4, 11 jul. 2024.

PAL, Chandrika Ashwinikumar *et al.* Plasma-assisted MnO surface engineered activated carbon felt for enhanced heavy metal adsorption. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 1–18, 1 dez. 2025.

PASSOS, Erik Santos. Reúso de águas cinzas: análise da eficiência de filtro composto por materiais alternativos. *[S.l.: S.n.]*.

PATSIDIS, Anastasios C.; SOULIOTIS, Manolis. End-Of-Use Fly Ash as an Effective Reinforcing Filler in Green Polymer Composites. *Polymers*, v. 15, n. 16, p. 3418, 16 ago. 2023.

PEDRO, Nilva Aparecida Ressinetti *et al.* Avaliação de filtros domésticos comerciais para purificação de águas e retenção de contaminantes inorgânicos. *Química Nova*, v. 20, n. 2, p. 208–212, mar. 1997.

PEREIRA TORRES, Alemar. COMPÓSITOS COM BIOCHAR E CARVÃO VEGETAL PARA CAMADAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. *[S.l.: S.n.]*.

PETERSON, Steven C. Carbon Black Replacement in Natural Rubber Composites Using Dry-Milled Calcium Carbonate, Soy Protein, and Biochar. *Processes* 2022, Vol. 10, Page 123, v. 10, n. 1, p. 123, 7 jan. 2022a.

PETERSON, Steven C.; CHISHOLM, Bret J. Utilizing Pistachio Shell Biochar to Replace Carbon Black in Natural Rubber Composites. *Journal of Composites Science* 2024, Vol. 8, Page 482, v. 8, n. 11, p. 482, jul. 2024.

PHOTHONG, Krittamet; TANGSATHITKULCHAI, Chaiyot; LAWTAE, Panuwat. The Analysis of Pore Development and Formation of Surface Functional Groups in Bamboo-Based Activated Carbon during CO₂ Activation. *Molecules*, v. 26, n. 18, p. 5641, 1 set. 2021.

PIAI, Laura *et al.* Prolonged lifetime of biological activated carbon filters through enhanced biodegradation of melamine. *Journal of Hazardous Materials*, v. 422, p. 126840, 15 jan. 2022.

PITTAYAVINAI, Pitchapa; THANAWAN, Sombat; AMORNSAKCHAI, Taweechai. Manipulation of mechanical properties of short pineapple leaf fiber reinforced natural rubber composites through variations in cross-link density and carbon black loading. *Polymer Testing*, v. 54, p. 84–89, 1 set. 2016.

PÖSCHL, Marek; SATHI, Shibulal Gopi; STOČEK, Radek. A chemical interpretation for the post-reversion upturn in the natural rubber/accelerated sulfur system based on the viscoelastic properties and cross-link density measurements. *Polymer Bulletin*, v. 81, n. 14, p. 12521–12541, 1 set. 2024.

PREGLO, Aj Rosemay *et al.* Paracetamol Removal from Aqueous Solution Through Activated Carbon from Mango Seeds. *Chemistry Africa*, v. 6, n. 2, p. 699–710, 1 abr. 2023.

PROCHNOW, Fernando Duarte. Biochar: uma revisão bibliográfica dos avanços científicos e industriais, das possibilidades no contexto brasileiro e do seu potencial para o desenvolvimento sustentável. *[S.l.: S.n.]*.

QUINTAS SALAMBA, Maurício *et al.* Porosity of Activated Carbon in Water Remediation: A Bibliometric Review and Overview of Research Perspectives. *ACS ES&T Water*, v. 5, n. 5, p. 2070–2086, 9 maio 2025.

RAHMA, Ghaita Inayat *et al.* Effect of Variation of Cocamide DEA, Activated Carbon, and Addition of Orange Peel Extract on the Characteristics of Liquid Hand Soap from Cooking Oil. *Proceeding of International Conference on Digital, Social, and Science*, v. 2, n. 01, p. 1680–1689, 14 ago. 2025.

RAJU, Gunasunderi *et al.* Preparation and Characterization of Eco-Friendly Spent Coffee/ENR50 Biocomposite in Comparison to Carbon Black. *Polymers*, v. 13, n. 16, p. 2796, 2 ago. 2021.

RATTANASOM, N.; SAOWAPARK, T.; DEEPRASERTKUL, C. Reinforcement of natural rubber with silica/carbon black hybrid filler. *Polymer Testing*, v. 26, n. 3, p. 369–377, 1 maio 2007.

REHMAN, Adeela; PARK, Mira; PARK, Soo Jin. Current Progress on the Surface Chemical Modification of Carbonaceous Materials. *Coatings 2019, Vol. 9, Page 103*, v. 9, n. 2, p. 103, 8 fev. 2019.

RENU; SITHOLE, Thandiwe. A review on regeneration of adsorbent and recovery of metals: Adsorbent disposal and regeneration mechanism. *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 50, p. 39–50, 1 out. 2024.

REOWDECHA, Manuchet *et al.* Film and latex forms of silica-reinforced natural rubber composite vulcanized using electron beam irradiation. *Heliyon*, v. 7, n. 6, p. e07176, jun. 2021.

RIBEIRO, Ana R. *et al.* An overview on the advanced oxidation processes applied for the treatment of water pollutants defined in the recently launched Directive 2013/39/EU. *Environment International*, v. 75, p. 33–51, 1 fev. 2015.

RIOS, Regiane Débora Fernandes. Produção de materiais baseados em carvão ativado granular obtidos de resíduos do endocarpo da macaúba e da mineração de ferro para remediação ambiental. *[S.l.: S.n.]*.

RIVERA-UTRILLA, J. *et al.* Regeneration of ortho-chlorophenol-exhausted activated carbons with liquid water at high pressure and temperature. *Water Research*, v. 37, n. 8, p. 1905–1911, 1 abr. 2003.

ROBERTSON, Christopher G.; HARDMAN, Ned J. Nature of Carbon Black Reinforcement of Rubber: Perspective on the Original Polymer Nanocomposite. *Polymers*, v. 13, n. 4, p. 538, 2 fev. 2021a.

ROCHA, Sandra Andreola Franco da. Utilização de carvão comercial e biochar proveniente de borra de café gasta na adsorção de octocrileno. *[S.l.: S.n.]*.

ROY, Kumarjyoti *et al.* Recent advances of natural fibers based green rubber composites: Properties, current status, and future perspectives. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 138, n. 35, p. 50866, 15 set. 2021.

SABITOV, Aitugan *et al.* Surface Characteristics of Activated Carbon Sorbents Obtained from Biomass for Cleaning Oil-Contaminated Soils. *Molecules*, v. 29, n. 16, p. 3786, 10 ago. 2024.

SANJUAN-NAVARRO, Lorenzo; MOLINER-MARTÍNEZ, Yolanda; CAMPÍNS-FALCÓ, Pilar. Characterization and Quantitation of Carbon Black Nanomaterials in Polymeric and Biological Aqueous Dispersants by Asymmetrical Flow Field Flow Fractionation. *ACS Omega*, v. 6, n. 47, p. 31822–31830, 30 nov. 2021.

SANTHOSH, Krishnamoorthy *et al.* Unveiling the silent threat: Heavy metal toxicity devastating impact on aquatic organisms and DNA damage. *Marine Pollution Bulletin*, v. 200, p. 116139, 1 mar. 2024.

SANTOS, Danilo Henrique da Silva. Avaliação da eficiência dos processos oxidativos avançados na regeneração de carvão ativado saturado com poluente orgânico. 24 mar. 2021a.

SANTOS, Flávio Andreote dos; PEDROSO, Márcio Pozzobon; RIBEIRO, André Geraldo Cornélio. Gestão de resíduos sólidos industriais: análise de resíduo sólido siderúrgico. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 9, n. 21, p. 877–886, 31 ago. 2022.

SANTOS, Jeferson Willian dos. Efeito da ativação por vapor ou dióxido de carbono na porosidade do carvão ativado produzido a partir de briquetes de bagaço de malte e levedura. [S.l.: S.n.].

SANTOS, Renivaldo José dos. Obtenção de compósitos de borracha natural com resíduo industrial de couro reticulados com diferentes peróxidos. 11 jul. 2014.

SANTOS, Renivaldo J. *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, 29 dez. 2015.

SATYAM, Satyam; PATRA, Sanjukta. Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review. *Heliyon*, v. 10, n. 9, p. e29573, 15 maio 2024.

SAYFO, Petra; PÖLÖSKEI, Kornél; MÉSZÁROS, László. Improving the mechanical and abrasion properties of silica-reinforced styrene-butadiene rubber composites by optimizing the concentrations of compatibilizers. *Polymer Bulletin*, v. 81, n. 14, p. 12715–12731, 1 set. 2024.

SCHREIBER, Fábio *et al.* Efficiency of home water filters on pesticide removal from drinking water. *Environmental Pollution*, v. 341, 15 jan. 2024.

SHAFEEYAN, Mohammad Saleh *et al.* A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 89, n. 2, p. 143–151, 1 nov. 2010.

SHANMUGAM, Vigneshwaran *et al.* Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Composites Part C: Open Access*, v. 5, p. 100138, 1 jul. 2021.

SILVA, Lucicleide Angelo. Avaliação da capacidade adsorptiva de carvão ativado e bentonita para a remoção de micropoluentes. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental)—Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 15 dez. 2017.

SINGH, Balwant *et al.* Chapter 3. Biochar pH, electrical conductivity and liming potential Biochar ageing effects on N and P dynamics: Mechanisms and controlling factors View project Soils in the global agenda-ITPS-GSP?FAO View project 3 Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/319206365>>.

SLAVIK, Irene; BECHLE, Thomas S.; UHL, Wolfgang. Practical implications of adding powdered activated carbon in advanced wastewater treatment for process and plant design. Water Practice and Technology, v. 19, n. 11, p. 4303–4310, 1 nov. 2024.

SOUZA, de Bianca. COPPE/UFRJ COPPE/UFRJ AVALIAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS ACOPLADOS COM CARVÃO ATIVADO GRANULADO COM BIOFILME PARA REÚSO DE EFLUENTES DE REFINARIA DE PETRÓLEO. [S.l.: S.n.].

SOWIŃSKA-BARANOWSKA, Anna; MACIEJEWSKA, Magdalena. Influence of the Silica Specific Surface Area and Ionic Liquids on the Curing Characteristics and Performance of Styrene–Butadiene Rubber Composites. Materials, v. 14, n. 18, p. 5302, 1 set. 2021.

STELESCU, Maria Daniela *et al.* Mechanical Properties and Equilibrium Swelling Characteristics of Some Polymer Composites Based on Ethylene Propylene Diene Terpolymer (EPDM) Reinforced with Hemp Fibers. Materials, v. 15, n. 19, p. 6838, 1 out. 2022.

SYED ISMAIL, Sharifah Nafisah *et al.* REINFORCEMENT OF CHARCOAL ACTIVATED CARBON (CAC) IN NATURAL RUBBER (NR) COMPOUND: IN COMPARISON WITH CARBON BLACK. ASEAN Engineering Journal, v. 12, n. 2, p. 161–167, 1 jun. 2022.

TAKAHASHI, Gakuto. Sample preparation for X-ray fluorescence analysis III. Pressed and loose powder methods. Rigaku Journal, v. 31, n. 1, p. 26–30, 2015.

TALIOTTO, Camila *et al.* COMPOSIÇÕES ELASTOMÉRICAS REFORÇADAS COM FIBRAS PARA O REVESTIMENTO DE SUPERFÍCIES METÁLICAS. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br>>.

TAPANGNOI, Peerayut *et al.* Preparation of purified spent coffee ground and its reinforcement in natural rubber composite. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 15, n. 7, p. 103917, 1 jul. 2022.

TEKIĆ, Danijela *et al.* Innovative Green Strategy for the Regeneration of Spent Activated Carbon via Ionic Liquid-Based Systems. *Applied Sciences*, v. 15, n. 18, p. 9880, 9 set. 2025.

THAMER, Badr M. *et al.* Single-step preparation of copper nanoparticle-enhanced activated carbon for anionic dye adsorption. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 711, p. 136359, 20 abr. 2025.

TILOKAVICHAI, Varanya *et al.* Effects of Recycled Polyethylene on Natural Rubber Composite Blends Filled with Aluminum Trihydroxide and Polyurethane Waste: Mechanical and Dynamic Mechanical Properties, Flammability. *Polymers*, v. 16, n. 12, p. 1657, 11 jun. 2024.

TISLER, Selina *et al.* A non-target evaluation of drinking water contaminants in pilot scale activated carbon and anion exchange resin treatments. *Water Research*, v. 271, p. 122871, 1 mar. 2025.

TODESCHINI, Fernando Corrêa. Regeneração eletroquímica de carvão ativado granulado saturado de carbendazim. *[S.l.: S.n.]*.

VIEGAS, Rui M. C. *et al.* Key Factors for Activated Carbon Adsorption of Pharmaceutical Compounds from Wastewaters: A Multivariate Modelling Approach. *Water*, v. 14, n. 2, p. 166, 8 jan. 2022.

VIEIRA, Cleber Corrêa. Estudo da regeneração de carvão ativado saturado de filtro químico usado em respirador semifacial. 14 mar. 2019.

VIEIRA, José Sebastião Cidreira *et al.* Pirólise dos caroços do açaí para obtenção de carvão granulado ativado para tratamento de água destinada ao consumo humano. *Brazilian Journal of Development*, v. 10, n. 8, p. e71776, 8 ago. 2024.

VIEIRA, Priscila Magalhães. Avaliação de um biorreator piloto de lodo ativado no controle de odores. *[S.l.: S.n.]*.

WESTPHALEN, Ana Paula Campos; CORÇÃO, Gertrudes; BENETTI, Antônio Domingues. Utilização de carvão ativado biológico para o tratamento de água para consumo humano. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, n. 3, p. 425–436, 1 jul. 2016.

WIŚNIEWSKA, Paulina *et al.* Green Approaches in Rubber Recycling Technologies: Present Status and Future Perspective. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 11, n. 24, p. 8706–8726, 19 jun. 2023.

WONG, Dominick *et al.* A critical review: Recent developments of natural fiber/rubber reinforced polymer composites. *Cleaner Materials*, v. 13, p. 100261, jul. 2024.

XU, Wei *et al.* Effect of Activation Temperature on Properties of H₃PO₄-Activated Carbon. *BioResources*, v. 16, n. 2, p. 4007, 1 maio 2021.

XU, Xingxin *et al.* A Green Synthesis of Controllable Shear-Assisted Catalytically Graphitized Biomass-Derived Carbon and Its Multi-Scale Reinforcement Mechanism in Natural Rubber. *Molecules*, v. 30, n. 9, p. 1936, 1 maio 2025.

YAMAGUCHI, Shunta. International trade and circular Economy - Policy alignment: OECD Trade and Environment Working Papers. *[S.l.: S.n.]*. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/publications/international-trade-and-circular-economy-policy-alignment_ae4a2176-en.html>.

YANKOVYCH, H.; MELNYK, I.; VÁCLAVÍKOVÁ, M. Compreensão dos mecanismos de remoção de organohalogênicos em carvão ativado granular mesoporoso com propriedades ácido-base. *Microporoso e Mesoporoso*, 2021.

YIM, Y. J. ;. *et al.* Preparation and Characterization of Activated Carbon/Polymer Composites: A Review. *Polymers* 2023, Vol. 15, Page 3472, v. 15, n. 16, p. 3472, 19 ago. 2023.

YIM, Yoon Ji; KIM, Byung Joo. Preparation and Characterization of Activated Carbon/Polymer Composites: A Review. *Polymers*, v. 15, n. 16, p. 3472, 1 ago. 2023.

YODPANYA, Sasiwan *et al.* Properties and Potential of Green Natural Rubber Composites Filled with Biofillers from *Cassia bakeriana* Craib and *Cassia fistula* L. Pods. *ACS Omega*, v. 10, n. 20, p. 20875–20885, 27 maio 2025.

YU, Hsin Yin; GUPTA, Shreya; ZHOU, Zhi. Removal of metals and assimilable organic carbon by activated carbon and reverse osmosis point-of-use water filtration systems. *Chemosphere*, v. 365, p. 143251, 1 out. 2024a.

ZHANG, Tao *et al.* Combining ozonation and powdered activated carbon adsorption for organic micropollutants removal in municipal wastewater treatment plants: Single versus two-reactor systems. *Water Research*, v. 284, p. 124035, 15 set. 2025.

ZHANG, Xiyu *et al.* Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: A Review. *Polymers* 2024, Vol. 16, Page 2807, v. 16, n. 19, p. 2807, 3 out. 2024.

ZHAO, Xiaohui *et al.* A low cost magnetic biochar manufactured solely from solid wastes by one-step pyrolysis for removal of tetracycline. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, p. 1–21, 1 dez. 2025.

ZHAO, Zhouxiang *et al.* Fiber Orientation Reconstruction from SEM Images of Fiber-Reinforced Composites. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 3700, v. 13, n. 6, p. 3700, 14 mar. 2023.